

ANÁLISIS ENERGÉTICO E IMPACTOS DE USO DE AGUA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA SECA DE MICROALGAS EN FOTOBIOREACTORES

P.D. Rodríguez¹, A. P. Arena², B.M. Civit³, R. Piastrellini⁴

Grupo CLIOPE, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza- Cnel. Rodríguez
273 – C. P. 5500 –Mendoza – Teléfono 54 261 5243001

Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnicas, CCT Mendoza- Avenida Ruiz Leal s/n-C.
P. 5500 – Localidad Mendoza – Mendoza – Teléfono 54 261 5244054

pdrodriguez@mendoza-conicet.gob.ar

Recibido 13/08/16, aceptado 09/10/16

RESUMEN: Los problemas ambientales asociados al uso de combustibles fósiles sitúan a los biocombustibles como una importante fuente de energía alternativa. Las microalgas han sido señaladas como la fuente de biomasa óptima para la obtención de biodiesel. No obstante, en algunos estudios ambientales y energéticos, los resultados hallados no confirman su superioridad frente a otras fuentes de biomasa. Este trabajo tiene como objetivos realizar un análisis energético y evaluar los impactos por el uso del agua de la producción de biomasa seca de microalgas cultivadas en un fotobiorreactor piloto, construido en la Universidad Federal de Paraná (Brasil). Los resultados muestran que esta producción genera una pérdida neta de energía, mientras que su impacto por el uso del agua es menor que el asociado a otras fuentes. Por lo tanto, es necesario mejorar el proceso de producción para que el balance energético sea positivo, permitiendo considerar a las microalgas como una fuente real de energía.

Palabras clave: biomasa seca, energías alternativas, microalgas

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles han sido la principal fuente energética y el motor de la economía global durante muchas décadas. Sin embargo, los problemas ambientales asociados a su uso, sumados a la creciente demanda energética de la población mundial, han demostrado la necesidad de utilizar energías alternativas (Ahmad *et al.*, 2010; 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 contexto, los combustibles líquidos derivados de biomasa (biocombustibles), como el biodiesel y el etanol, cobran relevancia como sustitutos de los combustibles tradicionales, con una producción creciente en los últimos años. Durante 2014 la producción global de biocombustibles fue estimada en 127,7 mil millones de litros, teniendo como mayores productores a Estados Unidos, Brasil, Alemania, China y Argentina (Abomohra *et al.*, 2016). El 23% de la producción de biocombustibles está representado por el biodiesel, cuya obtención aumentó un 13% entre 2005 y 2014, siendo la Unión Europea, Estados Unidos y Brasil los mayores productores (Ahmad *et al.*, 2010; Abomohra *et al.*, 2016).

El biodiesel es un recurso energético atractivo debido a una serie de características, como su similitud con el diésel de petróleo y su carácter biodegradable y renovable, que lo colocan como una alternativa

¹ Becaria doctoral CONICET

² Investigador Adjunto CONICET

³ Investigador Adjunto CONICET

⁴ Becaria postdoctoral CONICET

fuerte al uso de combustibles fósiles. Puede ser obtenido a partir de varias materias primas: cultivos comestibles, cultivos no comestibles y microalgas (primera, segunda y tercera generación de biocombustibles, respectivamente). Actualmente, los biocombustibles de primera generación enfrentan una serie de controversias, entre las que se destacan 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 los estudios se focalizan en el desarrollo de biocombustibles obtenidos a partir de materia prima no alimentaria, entre los que se encuentran los de segunda y tercera generación. Sin embargo, la segunda generación, a pesar de no usar recursos destinados a la alimentación, requiere el uso de tierras, agua e insumos agrícolas para su producción (Sander y Murthy, 2010). Esta situación ha provocado que las microalgas sean consideradas como la fuente de biomasa óptima para la obtención de biocombustibles, principalmente biodiesel.

Microalgas como materia prima

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 biodiesel. Además, las microalgas tienen la capacidad de generar otros 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 desde la atmósfera y/o de gases provenientes de la industria 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 capacidad de estos microorganismos para producir combustibles (Batan *et al.*, 2010; Collet *et al.*, 2014).

A pesar de su potencial, algunas limitaciones han impedido el desarrollo de tecnologías para la producción de biodiesel a partir de microalgas a escala comercial (Brennan y Owende, 2009). Económicamente el biodiesel de microalgas debería ser competitivo frente al diésel derivado de petróleo, siendo necesario introducir mejoras en los procesos de producción de la biomasa para que esto ocurra (Abomohra *et al.*, 2016). Desde el punto de vista ambiental, las distintas consideraciones metodológicas de los estudios realizados no permiten ofrecer una conclusión general acerca de los impactos ambientales asociados, por lo que resulta importante profundizar y armonizar los estudios para asegurar que estos biocombustibles generan impactos significativamente menores que los combustibles fósiles a los que sustituirían (Thomassen *et al.*, 2016). Por último, para que un combustible sea aceptable debe asegurarse un balance energético positivo, encontrándose también aquí resultados muy dispares (Clarens *et al.*, 2010; Jorquera *et al.*, 2010). Este es un aspecto muy importante, ya que si el biocombustible no genera un aporte neto de energía no es de utilidad.

Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar el desempeño ambiental de la producción de biomasa seca de microalgas en un fotobiorreactor (FBR) tubular compacto, construido en la Universidad Federal de Paraná (UFPR), Brasil. Para ello se realiza un análisis energético de ciclo de vida y se evalúan los impactos por el uso de agua. Si bien el propósito del prototipo analizado es la producción de biodiesel, en esta etapa el estudio se limitará a las fases que conducen a la producción de biomasa de microalgas y su posterior secado.

METODOLOGÍA

Análisis del ciclo de vida

En este trabajo se utilizó la metodología del Análisis del ciclo de vida (ACV), siguiendo los principios y recomendaciones de las normas ISO 14040 (2006a) e ISO 14044 (2006b). Según la norma ISO 14040 (2006a), “*el análisis del ciclo de vida es la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida*”. La mencionada norma establece la realización de cuatro fases dentro de un ACV:

- la definición del objetivo y el alcance,
- el análisis del inventario,

- la evaluación del impacto, y
- la interpretación.

Definición del objetivo y del alcance

Objetivo y Unidad Funcional

En este análisis se abordó un sistema integrado de producción de biomasa de microalgas y otros productos (etanol, alimento animal, entre otros), con el objetivo de cuantificar los requerimientos energéticos y de agua para la obtención de biomasa seca de microalgas, y los impactos ambientales asociados al consumo de estos recursos. La unidad funcional (o unidad de análisis) escogida fue 1 kg de biomasa seca de microalgas lista para ser procesada para la generación de productos de valor energético y alimenticio.

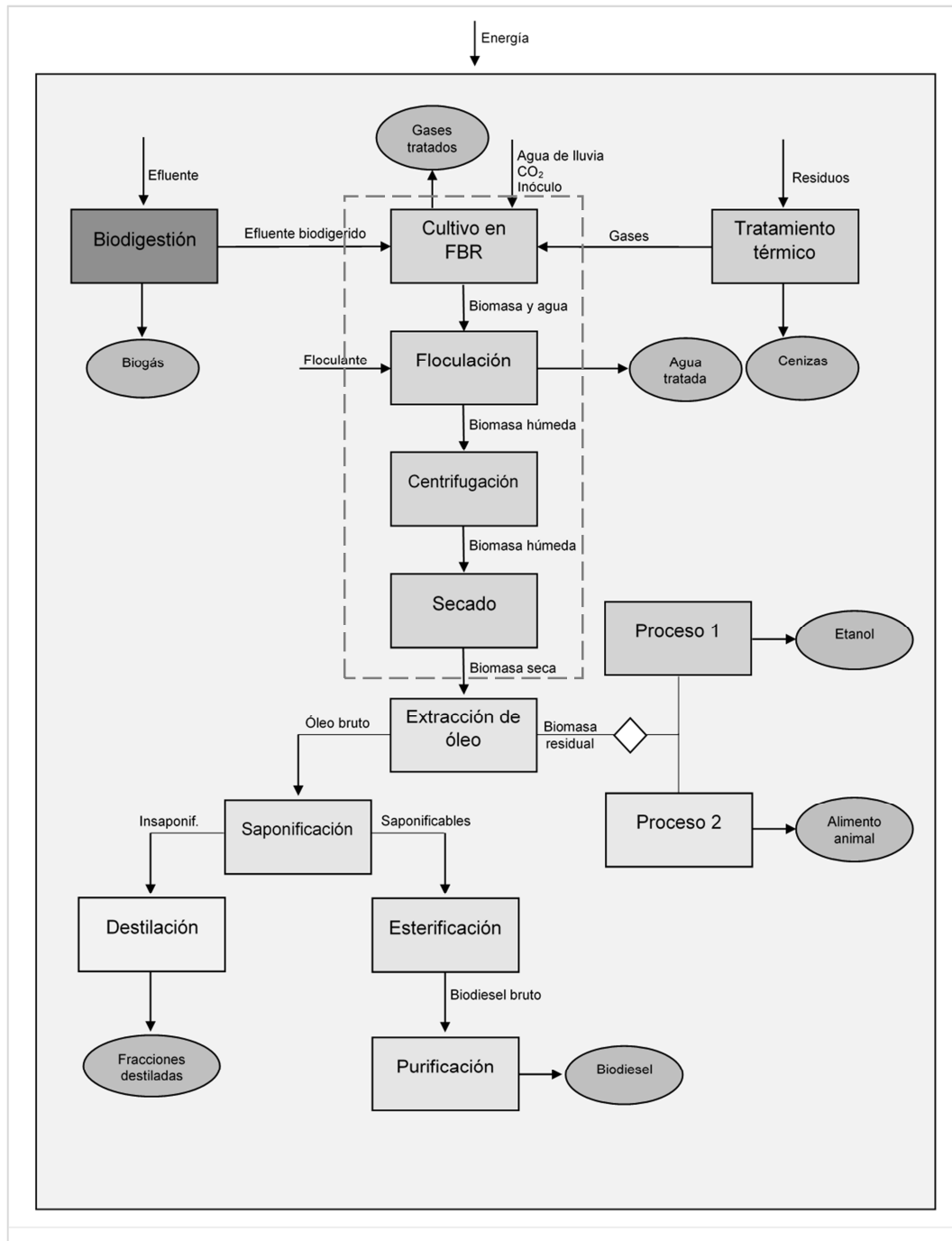


Figura 1: Sistema integrado de producción de biomasa seca de microalgas y otros productos. La línea de trazos indica los procesos incluidos en este estudio. (FBR: fotobiorreactor).

Descripción y límites del sistema

El sistema estudiado se sitúa en el estado de Paraná, en la región sur de Brasil. Consiste en un sistema multiproducto, es decir que tiene la capacidad potencial de generar varios productos de alto valor comercial. Además, provee de servicios al ambiente, como el tratamiento de agua residual, el tratamiento térmico de residuos sólidos no renovables y la depuración de gases de combustión, mediante el cultivo de microalgas del género *Scenedesmus*. Para ello cuenta con biodigestores anaeróbicos, fotobiorreactores, un tratador térmico de residuos y otros equipamientos necesarios para el procesamiento de la biomasa cultivada. El proceso de producción de biomasa seca de microalgas está comprendido en dicho sistema y se divide en cuatro etapas: el cultivo de las microalgas, la floculación de la biomasa, la centrifugación y el secado. Todas ellas se incluyen dentro de los límites definidos en este estudio (ver Fig. 1). A continuación, se detallan cada una de las etapas del proceso productivo de la biomasa.

A. Cultivo de microalgas

Durante esta etapa se produce la biomasa de microalgas en FBR tubulares compactos. El proceso de cultivo de las microalgas dura 15 días, desde que se carga el FBR hasta la cosecha. Para realizarlo se introduce el medio de cultivo, formado por estiércol de cerdo biodigerido y agua de lluvia, y se inocula con microalgas provenientes del ciclo de cultivo anterior. El cultivo es circulado constantemente por una bomba para evitar la formación de biofilms, que se adhieren a la superficie de los tubos, dificultando la penetración de la luz. Además, se inyecta aire atmosférico por medio de compresores para favorecer el intercambio gaseoso dentro de los tubos.

B. Floculación de la biomasa

Una vez finalizado el período de cultivo de las microalgas se procede a la recuperación de la biomasa. La mezcla que contiene el medio de cultivo junto con las microalgas es conducida, por medio de mangueras, hacia los tanques de floculación. Allí se adiciona un agente floculante (polímero orgánico catiónico) y se mezcla mediante el burbujeo de aire y agitación mecánica dentro de los tanques. Al finalizar el proceso, la biomasa se deposita en el fondo de los tanques y el agua queda encima. Esta agua puede ser destinada para consumo humano, luego de ser tratada por los métodos convencionales, para irrigación de algunas especies vegetales, para consumo animal, entre otros, según las disposiciones legales de Brasil (Taher, 2013), considerándose como un co-producto.

C. Centrifugación de la biomasa

Para continuar el proceso de recuperación, la biomasa de microalgas es sometida a un proceso de centrifugación, obteniéndose biomasa con un contenido de humedad de 90%.

D. Secado de la biomasa

Finalmente, la biomasa húmeda es colocada en estufas a 60°C, donde permanece por tres días para reducir el contenido de humedad, hasta 5-10%. De este modo se obtiene el producto final, la biomasa seca de algas, que podrá ser destinada a la generación de otros productos, como biodiesel.

Para realizar el inventario del proceso se consideraron las entradas y salidas de materiales y energía para todas las etapas descriptas anteriormente.

Datos de inventario

Etapa	Entradas	Salidas
Cultivo de microalgas	Microalgas Dióxido de carbono atmosférico Agua de lluvia Estiércol de cerdo biodigerido Transporte de insumos Energía eléctrica Llenado del FBR Circulación del contenido del FBR Bombeo de aire	Mezcla de biomasa de microalgas y agua
Floculación de la biomasa	Mezcla de biomasa de microalgas y agua Agente floculante Energía eléctrica Tanque floculador mecánico Tanques floculadores con burbujeo de aire	Biomasa húmeda de microalgas Agua tratada
Centrifugación de la biomasa	Biomasa húmeda de microalgas Energía eléctrica Centrífuga	Biomasa húmeda de microalgas
Secado de la biomasa	Biomasa húmeda de microalgas Energía eléctrica Estufas de secado	Biomasa seca de microalgas

Tabla 1: Entradas y salidas de materiales y energía consideradas en este estudio.

Análisis energético

El balance de energía de los biocombustibles se analiza usualmente utilizando la Tasa de Retorno de Energía (del inglés, “Energy Return on Invested”-EROI o “Energy Return on Energy Invested”-EROEI), concepto desarrollado por Hall *et al.* (1981) y Cleveland *et al.* (1984). El índice EROI expresa la relación entre la cantidad de energía obtenida en el proceso de producción del biocombustible y la energía no renovable requerida para la producción de dicho biocombustible, y se calcula a partir de la siguiente ecuación (Murphy y Hall, 2010):

$$\text{EROI} = \frac{\text{Energía ganada}}{\text{Energía no renovable necesaria para obtener la energía ganada}} \quad (1)$$

El numerador y el denominador de la ecuación 1 suelen evaluarse en las mismas unidades de medición, por lo que el índice EROI resulta adimensional. Valores de $\text{EROI} < 1$ indican una pérdida neta de energía, es decir que el biocombustible requiere mayor cantidad de energía durante su producción que la energía que genera y por lo tanto no puede ser utilizado como combustible. Por el contrario, valores de $\text{EROI} > 1$ sugieren una ganancia energética neta.

Otros autores (Oliveira *et al.*, 2012; entre otros) utilizan el índice Relación de Energía Neta (del inglés, “*Net Energy Ratio*”-NER), que muestra la relación entre la energía producida por el biocombustible y la necesaria para su producción. Al igual que el índice EROI, valores de NER<1 revelan una pérdida neta de energía y valores de NER>1 indican ganancia neta de energía. A diferencia del EROI, el NER considera toda la energía consumida, incorporando también aquella que proviene de fuentes renovables. Es un índice adimensional y se calcula según la siguiente ecuación:

$$\text{NER} = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía consumida en la producción}} \quad (2)$$

En ambos índices, para calcular la energía total y la energía no renovable requerida en el proceso de obtención de biomasa seca de microalgas se utilizó el indicador Demanda de energía acumulada (del inglés, “*Cumulative Energy Demand*”-CED), calculado con el software SimaPro versión 8.0.5.13. De esta forma es posible calcular no sólo el uso directo de energía en el proceso, debido al consumo energético de los equipamientos, sino también contabilizar las entradas indirectas de energía asociadas a la producción y transporte de insumos. La energía contenida en la biomasa seca de microalgas fue considerada según el poder calorífico reportado en el trabajo de Cancela *et al.* (2016).

Posteriormente, con los valores de energía requerida en el proceso y de energía contenida en la biomasa seca, se determinaron los índices EROI y NER correspondientes a la biomasa seca de microalgas (ecuaciones 1 y 2).

Impacto por el uso del agua

Para comparar el impacto por el uso del agua se utilizó el indicador Índice de escasez de agua (del inglés, “*Water Scarcity Index*”-WSC), desarrollado por Pfister *et al.* (2009), que se define según la siguiente ecuación:

$$\text{WSC} = \Sigma \frac{\text{Uso consuntivo de agua} * \text{Índice de estrés hídrico de la cuenca}}{\text{Índice de estrés hídrico global}} \quad (3)$$

El Uso consuntivo de agua representa el consumo de agua del proceso, mientras que el Índice de estrés hídrico de la cuenca manifiesta la disponibilidad regional de agua y el Índice de estrés hídrico global, la disponibilidad global de agua. El valor de WSC queda expresado en unidades de agua equivalentes (H₂Oe) por unidad funcional. Este cálculo se llevó a cabo con el software SimaPro versión 8.0.5.13.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis energético

La Tabla 2 muestra los valores de los índices EROI y NER calculados para el proceso de producción de 1 kg de biomasa seca de microalgas en el sistema descrito. En ambos casos se obtuvieron valores inferiores a 1, lo que indica una pérdida neta de energía. Esta es una situación no deseable, puesto que para que un combustible sea aceptable debe asegurarse un balance positivo de energía, es decir, es necesario que pueda aportar más energía que la consumida para generarlo.

Como puede observarse en las ecuaciones 1 y 2, la diferencia entre los índices EROI y NER es que el segundo incorpora el consumo total de energía para la producción del biocombustible, mientras que el primero sólo considera el uso de energía proveniente de fuentes no renovables. Esta discrepancia se pone de manifiesto en el caso estudiado, donde existe una diferencia notable en la demanda energética

al incorporar el consumo de energía proveniente de fuentes renovables. Esto se debe al uso de energía eléctrica de la matriz brasileña, conformada mayoritariamente por energía hidroeléctrica. Por ello, al calcular el índice NER, se observa más claramente la pérdida neta de energía que existe en la producción de biomasa seca de microalgas.

	EROI	NER
Energía ganada (MJ)	1,406E+01	1,406E+01
Energía consumida (MJ)	1,644E+03	5,780E+03
Valor del índice	8,550E-03	2,431E-03

Tabla 2: Índices EROI y NER para 1 kg de biomasa seca de microalgas.

Jorquera *et al.* (2010) también hallaron que al cultivar microalgas en FBR tubulares se produce una pérdida neta de energía, reportando un valor de NER=0,20 para la producción de biomasa.

En la Figura 2 se observa que el cultivo de las microalgas en FBR presenta el mayor consumo energético, seguido por el secado de la biomasa en estufas, mientras que las etapas de floculación y centrifugación son las menos demandantes en energía.

El mayor consumo de energía reportado en la etapa de cultivo se debe a la demanda energética de los compresores de aire utilizados para inyectar aire atmosférico en los FBR, sumado al uso continuo de la bomba necesaria para recircular el contenido del FBR. Por su parte, el secado de la biomasa requiere el uso continuo de estufas durante tres días, generando también una alta demanda energética. Es importante destacar que el sistema analizado presenta capacidad instalada subutilizada, que implica consumo energético sin aportar a la producción de biomasa, contribuyendo a la ineficiencia energética del proceso.

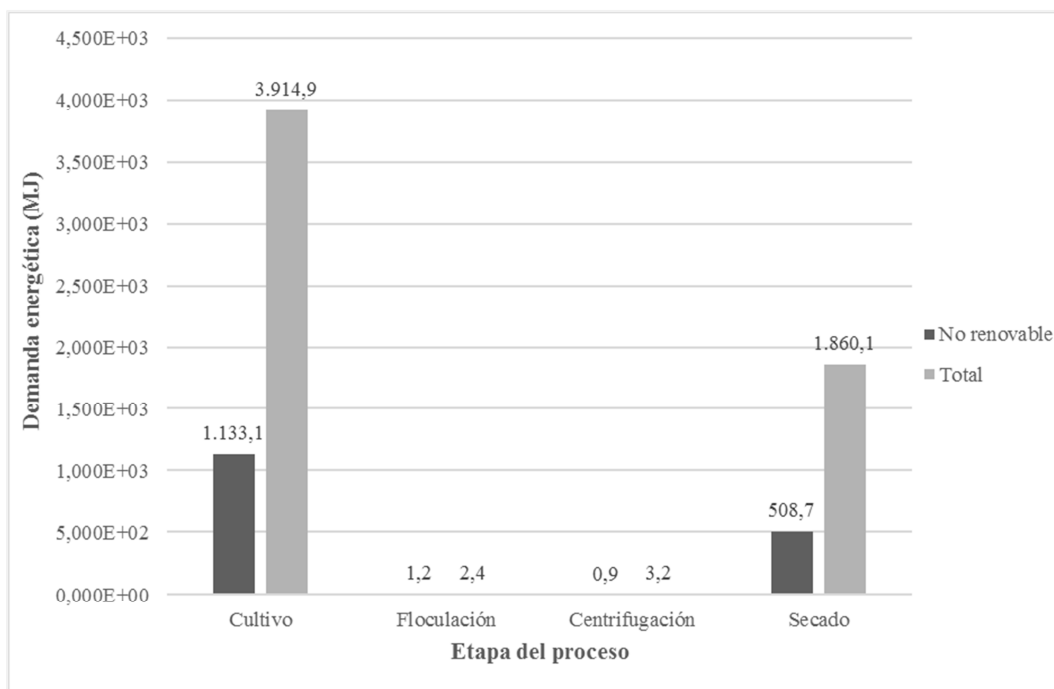


Figura 2: Demanda energética no renovable y total por etapa del proceso de producción de 1 kg de biomasa seca de microalgas.

Los resultados del análisis energético para la biomasa de microalgas encontrados en este estudio son muy desfavorables en comparación con otras fuentes de biomasa destinadas a la producción de biocombustibles. En la Tabla 3 se presenta un claro ejemplo de ello: la biomasa seca de granos de soja presenta valores de EROI y NER 633 y 2773 veces superiores, respectivamente, a los de la biomasa seca de microalgas. Estos valores indican que la biomasa obtenida a partir de soja produce una

ganancia neta de energía, mientras que la obtenida a partir de microalgas produce una pérdida neta de energía. Batan *et al.* (2010) encontraron que la energía requerida durante el cultivo de las microalgas es 2.1 veces superior que la energía necesaria para el cultivo de la soja, a lo que se suma la energía suministrada en la etapa de secado de la biomasa de microalgas, proceso que no se requiere realizar con la biomasa de soja destinada a biocombustibles.

Índice	Microalgas	Granos de soja ¹
EROI	0,009	5,695
NER	0,002	5,546

¹ Piastrellini (2015)

Tabla 3: Índices EROI y NER para biomasa seca de microalgas y de granos de soja.

Impacto por el uso del agua.

Durante la etapa de cultivo se utiliza agua como medio de crecimiento de las microalgas, lo que supone un consumo de este recurso. El indicador WSC calculado para la producción de 1 kg de biomasa seca de microalgas arrojó un valor de 0,02 H₂Oe. Este resultado se presenta como favorable al compararlo con otras fuentes de biomasa destinadas a la producción de biocombustibles, como puede verse en la Tabla 4. En ella se observa que el impacto por el uso del agua es, aproximadamente, 11 veces mayor para producir 1 kg de biomasa seca a partir de granos de soja, cultivada en un sistema bajo riego.

Esto es debido al elevado requerimiento hídrico de los cultivos energéticos (Piastrellini, 2015), uno de los aspectos más discutidos al hablar de biocombustibles de primera generación, mientras que las microalgas cultivadas en este sistema presentan una menor demanda de agua, satisfecha por agua de lluvia recolectada, lo que las coloca en una situación ventajosa en cuanto al impacto por el uso del agua.

Indicador	Microalgas	Granos de soja ¹
WSC (H ₂ Oe)	0,02	0,23

¹ Piastrellini (2015)

Tabla 4: Resultados del impacto por el uso del agua según el indicador “Índice de escasez de agua”

CONCLUSIONES

Las microalgas han sido señaladas como una materia prima óptima para la producción de biocombustibles, especialmente biodiesel. Sin embargo, en la actualidad, aún no se alcanza el escenario prometedor sugerido para ellas y los estudios realizados no permiten tener una idea clara del impacto que genera la producción y uso de estos biocombustibles de tercera generación.

En este trabajo puede verse que la producción de biomasa seca de microalgas, fuente para la obtención de biodiesel y otros productos, se presenta como favorable frente a la obtención de biomasa seca de granos de soja, utilizados con la misma finalidad, con respecto al impacto por el uso del agua. Este es un aspecto importante para destacar, puesto que es uno de los puntos controversiales de la producción de biocombustibles de primera generación que se pretende superar con el desarrollo de los biocombustibles de tercera generación.

No obstante, el análisis energético realizado muestra que la producción de biomasa seca de microalgas genera una pérdida neta de energía, debido a la alta demanda energética del proceso, principalmente atribuible al cultivo de microalgas en FBR y al secado de la biomasa. Esto señala que es necesario mejorar sustancialmente el proceso de producción para disminuir el consumo energético. En este sentido, se están realizando esfuerzos para utilizar equipamientos con mayor eficiencia, por ejemplo, en el secado de la biomasa, con la intención de rebajar la demanda de energía. Otro aspecto a mejorar es la productividad, ya que en el sistema analizado se observó capacidad ociosa que podría ser utilizada para elevar la producción de biomasa seca por unidad de energía utilizada.

Innovaciones tecnológicas pertinentes y aumentos en la productividad podrían causar que el balance energético de la biomasa seca de microalgas se torne positivo, permitiendo considerar a las microalgas como una opción real para la producción de biocombustibles, situación que aún no se ha alcanzado.

REFERENCIAS

- Abomohra, A., Jin, W., Tu, R., Han, S., Eid, M. y Eladel, H. (2016). Microalgal biomass production as a sustainable feedstock for biodiesel: Current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 64, 596-606.
- Ahmad, A.L., Mat Yasin, N.H., Derek, C.J.C. y Lim, J.K. (2010). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 584-593.
- Batan, L., Quinn, J., Willson, B., Bradley, T. (2010). Net energy and greenhouse gas emission evaluation of biodiesel derived from microalgae. *Environmental Science and Technology*. 44 (20), 7975-7980.
- Brennan, L. y Owende, P. (2009). Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2), 557-577.
- Cancela, A., Sánchez, A., Álvarez, X., Jiménez, A., Ortiz, L., Valero, E. y Varela, P. (2016). Pellets valorization of waste biomass harvested by coagulation of freshwater algae. *Bioresource Technology*. 204, 152-156.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Science Direct-Biotechnology Advances*. 25, 294-306
- Clarens, A.F., Resurreccion, E.P., White, M.A., Colosi, L.M. (2010). Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. *Environmental Science & Technology*. 44, 1813-1819.
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.A.S., Kaufmann, R. (1984). Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. *Science*. 255, 890-897.
- Collet, P., Lardon, L., Hélias, A., Bricout, S., Lombaert-Valot, I., Perrier, B., Lépine, O., Steyer, J. y Bernard, O. (2014). Biodiesel from microalgae-Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. *Renewable Energy*. 71, 525-533.
- Hall, C.A.S., Cleveland, C., Berger, M. (1981). Yield per effort as a function of time and effort for United States petroleum, uranium, and coal. En *Energy and Ecological Modelling*; Mitsch, W.J., Bosserman, R.W., Klopatek, J.M., (Eds.); Elsevier Scientific: Amsterdam, Países Bajos. 715-724.
- ISO. (2006a). International Standard 14040. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.
- ISO. (2006b). International Standard 14044. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.
- Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E.A., Embiruçu, M., Ghirardi, M.L. (2010). Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology*. 101, 1406-1413.
- Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, C. y Dubois-Calero, N. (2008). Articles: Biocatalysts and Bioreactor Design. *Biotechnol. Prog.* 24, 815-820.
- Murphy, D.J., Hall, C.A. (2010). Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1185, 102-118.
- Oilgae. (2014). Comprehensive Report on Attractive Algae Product Opportunities – Preview. Tamilnadu, India.
- Oliveira, M; Beserra Carioca, J. y Macambira, S. (2012). Development of a methodology for net energy analysis in biorefineries, regarding microalgae cultivation to improve energy yields in industrial wastes. *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal*. 3(1), 59-79.

- Pfister, S., Koehler, A. y Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science and Technology*. 43, 4098-4104.
- Piastrellini, R. (2015). Aportes a la determinación de la huella ambiental de biocombustibles en Argentina. Influencia de los sistemas de manejo de cultivos sobre el impacto del consumo de agua, del uso del suelo y de las emisiones de gases de efecto invernadero para el biodiesel de soja. Tesis de doctorado. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza. Mendoza, Argentina.
- Sander, K. y Murthy, G. (2010). Life cycle analysis of algae biodiesel. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 15, 704-714.
- Suganya, T., Varman, M., Masjuki, H.H. y Renganathan, S. (2015). Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55, 909-941.
- Taher, D. (2013). Biodiesel de microalgas cultivadas em dejetto suíno biodigerido. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil.
- Thomassen, G., Van Dael, M., Lemmens, B. y Van Passel, S. (2016). A review of the sustainability of algal-based biorefineries: Towards an integrated assessment framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

ABSTRACT

The environmental problems associated with the use of fossil fuels has wakened up great scientific and technological interest for the potential use of biofuels as an alternative energy source. Several studies have pointed to microalgae as the major biomass source for biodiesel production. However, in some environmental and energetic studies, the results do not confirm microalgae superiority over other biomass sources. The aims of this study are to perform an energetic analysis and to assess the impacts for water use in the production of microalgae dry biomass grown in a pilot photobioreactor, built in the Federal University of Paraná (Brazil). The results confirm that this production causes a net energy loss, while its impact for water use is lower than the impact reported for other sources. Therefore, it is necessary to enhance the production process to make the energetic balance positive, turning microalgae into a real source of energy.