

## DETECCIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ASPECTOS CRÍTICOS DEL CICLO DE VIDA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE BIOMASA.

N. Clauser<sup>1</sup>, S. Manrique<sup>2</sup>, J. Franco<sup>3</sup>

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO)  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Universidad Nacional de Salta (UNSa)  
Tel. 0387-425-5424 – Fax. 387-425-5489 e-mail: [nicolas.clauser@gmail.com](mailto:nicolas.clauser@gmail.com)

**RESUMEN:** La Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) es una herramienta utilizada mundialmente para analizar los principales impactos de la producción de un bien o servicio. En el campo de la energía se ha empleado principalmente para evaluar la sustentabilidad de sistemas de producción de biodiesel y bioetanol. En Salta es escasa la información generada en cuanto a ECV de cadenas bioenergéticas posibles de desarrollarse. Este trabajo apunta a aplicar dicha metodología para evaluar dos sistemas con base en microalgas para generación energética (bioelectricidad y biodiesel), buscando contribuir al armado de una base de datos sobre aspectos críticos de dichos sistemas e identificando aspectos y técnicas que podrían ser incluidos en esquemas de certificación provinciales. Se plantea: caracterizar mediante ensayos, la producción, conversión energética y distribución de la energía; relevar variables críticas; cuantificar las entradas y salidas de los sistemas; definir variables transversales y comparar los sistemas estudiados.

**Palabras Clave:** Biomasa; Microalgas; Bioelectricidad; Biodiesel; Evaluación de Ciclo de Vida.

### ANTECEDENTES

La Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) o Life Cycle Assessment (LCA) es una técnica útil para detectar, observar, medir y monitorear los principales impactos resultantes de la producción de un determinado bien o servicio. A partir del año 2000 la utilización de la ECV como una herramienta de estudio, ha incrementado rápidamente en todo el mundo. En los últimos años, en el campo de la energía, ha sido utilizada particularmente como una herramienta para evaluar la sustentabilidad de los sistemas de producción de biocombustibles líquidos, principalmente biodiesel y bioetanol en base a cultivos oleaginosos y azucarados respectivamente, dado el vertiginoso crecimiento mundial de estas industrias, y sus promisorias ganancias económicas (Delucchi, 2006; Davis et al., 2009; Kendall et al., 2009; Juri et al., 2009). Estas evaluaciones comenzaron a poner de manifiesto en la mesa de discusión internacional algunos impactos ambientales negativos de dichas producciones (Mol, 2007; Bindrabán et al., 2009) y a cuestionar la real magnitud de los beneficios que el empleo de la biomasa podría traer aparejada.

La biomasa, sin embargo, engloba recursos orgánicos no fósiles de diferente naturaleza (Álvarez, 2009; Singh et al., 2010), además de los cultivos energéticos dedicados para la producción de los biocombustibles líquidos mencionados, como por ejemplo, residuos forestales, pecuarios, agroindustriales, agrícolas, entre otros. Incluye asimismo, otros cultivos dedicados (sembrados sólo con fines energéticos) diferentes de soja, girasol, colza o caña de azúcar, y otros cultivos energéticos de oportunidad (vegetación nativa que puede ser aprovechada con fines energéticos allí donde está creciendo, manejándola mediante planes técnicamente fundados). Y cada recurso de biomasa puede ser utilizado para diferentes aplicaciones y en sistemas de distintas configuraciones (Biswas et al., 2005; Queiroz et al., 2011; Foteinis et al., 2011; Grisi et al., 2011; Man et al., 2012). Las evaluaciones integrales o ECV de estos otros sistemas en base a diferentes recursos de biomasa en los que poca atención se ha puesto hasta la fecha, permitirían conocer de manera más precisa los impactos positivos y negativos de cada sistema en particular, y evaluar los reales alcances de su empleo en los sitios en los que se proyecta su aprovechamiento.

---

<sup>1</sup> Investigador Doctoral, INENCO, CONICET

<sup>2</sup> Investigadora Postdoctoral, INENCO, CONICET

<sup>3</sup> Investigadora Adjunta INENCO, CONICET

En este sentido, las microalgas, como uno de los recursos de biomasa, aparecen como una opción prometedora de beneficios no sólo por ser potencialmente útiles como fuente de energía renovable (Demirbas, 2011), sino también porque en la medida en que son organismos fotosintéticos, utilizan una cantidad importante de  $\text{CO}_2$ . Esto último significaría una solución interesante para mitigar el problema de sobrecalentamiento global por acumulación de dicho gas en la atmósfera, como el principal gas de efecto invernadero (Demirbas, op.cit). La biomasa producida por hectárea es modesta, entre 5 y 8 toneladas anuales. Sin embargo se podría aumentar drásticamente –aproximadamente 20 veces-utilizando LED's para proveer luz a los cultivos (Amer et al., 2011).

En la última década, por los motivos mencionados, la idea de producir energía a partir de algas ha adquirido gran relevancia, si bien existen experiencias previas. Quizás uno de los primeros estudios sea el programa denominado “The Aquatic Species Program” desarrollado entre los años 1980 y 1996 por las Naciones Unidas, para evaluar la producción de biodiesel a partir de algas (Sheenan et al., 1998). En cuanto al rendimiento, el máximo mencionado para la producción de bioetanol en base a caña de azúcar, es de 5900 l/ha.año, similar al obtenido en la producción de biodiesel en base a palma aceitera. En el caso de las microalgas, para la producción de biodiesel, se mencionan productividades entre 24000, 80000 y hasta 135000 l/ha.año (Singh et al., 2010; Wijffels et al., 2010a; Demirbas, 2010). Con respecto a la demanda de espacio físico, para un mismo volumen de producción, el biodiesel obtenido desde aceite de algas requiere un espacio entre 10 y 20 veces menor el que demanda producir el biodiesel desde aceite de palma (Demirbas, 2011).

Por otra parte, una de las mayores desventajas en la actualidad, es el costo de producción de biodiesel desde algas teniendo en cuenta las tecnologías actuales, con respecto al petróleo tradicional y a otros cultivos de aceite (Amer, et al., 2011), principalmente en cuanto a la etapa de recuperación del aceite (Patil et al., 2010), que en la mayoría de los cultivos se realiza mediante extracción mecánica por aplastamiento. En el caso de las algas, este método resulta ineficiente (Johnson y Wen, 2009) por lo que se han comenzado a investigar otros métodos tales como extracción ultrasónica, extracción con fluidos supercríticos y extracción con disolventes, siendo todos ellos procesos altamente demandantes de tiempo y recursos. Los últimos estudios ensayan la extracción con microondas y la transesterificación (Patil et al., 2010), procedimiento que se ha utilizado en la extracción de aceites de materia prima vegetal (Bernabas et al., 1995; Kiss et al., 2000; Pan et al, 2002; Li et al., 2004; Lucchesi et al., 2004), logrando reducir los tiempos de extracción, los costos, y aumentar la eficiencia. En términos generales, los investigadores señalan que para lograr la viabilidad de la producción energética en base a algas es necesario reducir la energía requerida para su producción, aumentar la producción de lípidos e incrementar el valor de la biomasa (Wijffels, et al., 2010b).

Aún así, si bien existen cultivos, recursos y tecnologías mucho más desarrolladas para producción energética, las algas -actualmente en fase exploratoria- han mostrado potenciales tales que, mejorando las tecnologías y metodologías de cultivo y producción podrían conseguirse relaciones costo-productividad superiores que los actuales cultivos para biocombustibles líquidos (Demirbas, 2010; Gholamhassan et al., 2011). Así por ejemplo, se han realizado estudios aprovechando plantas de tratamiento de aguas residuales, en las cuales se conseguirían mejorías importantes en la producción de algas, aunque aún es necesario influir sobre parámetros como la dosificación de  $\text{CO}_2$ , el control de especies y de parásitos que afectan a las algas (Park et al., 2010). Por tanto, aún hay mucha investigación que desarrollar en este campo, para poder resolver los principales cuellos de botella de estos sistemas.

En el país se ha comenzado a incursionar en la producción algas con fines energéticos, en plantas cementeras, lo que permitiría mitigar emisiones de  $\text{CO}_2$ , además de la utilización de las biomasa de algas como combustible para los hornos (Codina et al., 2011). Sin embargo, no se hallaron estudios de ECV de la producción de biocombustibles líquidos -biodiesel- con base en algas ni tampoco de la producción de electricidad en base a algas, que aunque menos eficiente energéticamente, podría brindar soluciones alternativas en sitios aislados de la red o alejados de centros poblados. En la provincia de Salta, en particular, existen sectores con escaso o nulo acceso a servicios, como energía eléctrica y energía térmica de red. Un avance significativo en la producción de bioenergía en base a algas, podría significar una notable mejora en las condiciones de vida de este sector de la población, especialmente si fueran utilizadas para la generación de electricidad. Por otra parte, la producción de biodiesel en base a estos cultivos podría asimismo constituirse en una fuente alternativa y promisoría de generación de energía renovable, posiblemente menos impactante que los cuestionados cultivos energéticos actualmente utilizados (principalmente en base a soja, en el país).

Es necesario por tanto, analizar todas las etapas de cultivo (producción, cosecha, conversión energética, distribución) mediante una evaluación integral a fin de conocer y generar información local sobre los puntos críticos y fortalezas de cada uno de estos sistemas en base a microalgas, y analizar en un balance total estos aspectos de tal manera que posibilite tomar decisiones que impacten positivamente en la región y no repitan los viejos errores de los actuales sistemas empleados. La ECV se constituye en una herramienta valiosa para alcanzar estas metas.

El objetivo general de la presente investigación, que constituye un proyecto de tesis doctoral, plantea por tanto contribuir al armado de una base de datos sobre aspectos críticos del ciclo de vida de los sistemas de producción energética mencionados, generando información y conocimientos, construyendo herramientas y desarrollando métodos que permitan implementar y

monitorear principios de sustentabilidad. Se definen como objetivos específicos los siguientes: i) analizar dos sistemas con base en microalgas para generación energética (bioelectricidad y biocombustible); ii) precisar los límites de cada uno de los sistemas a investigar; iii) caracterizar las siguientes etapas de ciclo de vida: producción (cultivo de algas); transporte del recurso, conversión energética del recurso, distribución de la energía, uso final; iv) relevar las variables críticas de cada una de las etapas caracterizadas, que serán analizadas; v) cuantificar las entradas y salidas relevantes de los sistemas, incluyendo por lo menos un aspecto de las siguientes dimensiones: ambiental, social y económico; vi) comparar los sistemas bioenergéticos analizados y, construir y proponer las variables críticas transversales a los mismos; vii) sistematizar los resultados obtenidos extrayendo las principales conclusiones e identificando aspectos, métodos y técnicas que deberían ser incluidos en sistemas de certificación de cadenas bioenergéticas de la provincia.

## METODOLOGIA

Se propone un estudio de tipo exploratorio, descriptivo y explicativo, cuyo método de abordaje y aproximación metodológica de análisis se expone a continuación.

**i) Aproximación metodológica: Evaluación de Ciclo de Vida.** La evaluación o análisis de Ciclo de Vida (ECV o ACV) es una herramienta que permite evaluar los impactos potenciales de productos o servicios de una forma global porque considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final y todos los vectores involucrados (Gnansounou et al., 2009). Esta herramienta será empleada para evaluar los sistemas bioenergéticos en base a microalgas.

**ii) Diseño de la investigación.** Partiendo del reconocimiento de insumos básicos demandados por la propia metodología a emplear, el proceso de investigación seguirá las siguientes etapas:

**-Definición de los sistemas bioenergéticos a estudiar.** Se evaluará la producción de energía a partir de microalgas. Se estudiarán dos sistemas con aplicaciones energéticas diferentes: i) producción de bioelectricidad y ii) producción de biodiesel como biocombustible. Se realizará un Análisis de Ciclo de Vida comparativo. El estudio estará localizado en la provincia de Salta principalmente. Siguiendo las experiencias viables desarrolladas a nivel internacional (Park et al., 2010), se analizará la posibilidad de aprovechar plantas de tratamiento de efluentes y residuos urbanos, industriales y agrícolas para el cultivo de las algas debido a que en muchos casos estos residuos contienen nutrientes importantes para el crecimiento de las mismas liberando de la necesidad de construir un lugar específico para el cultivo. Dada la ausencia de información sobre los temas a trabajar a nivel regional, se plantea la realización de ensayos a escala experimental y planta piloto.

**- Definición de los ensayos a realizar.** En función de un trabajo previo de gabinete que incluirá la consulta a expertos, se definirán los dos tipos de ensayos a realizarse, las especies a utilizar, las técnicas de cultivo, las piletas de reproducción, los tipos de efluentes a utilizar, entre otros. Si fuera posible observar experiencias en desarrollo en otros sitios, se procederá a realizar las gestiones pertinentes para visitar y relevar información sobre estas experiencias.

**- Realización de los ensayos.** Una vez definidos los detalles de los ensayos, se dispondrá de un espacio en el campo experimental del INENCO para el cultivo de algas y su estudio y evaluación de sus respuestas en condiciones controladas y no controladas, su productividad, su rendimiento de lípidos, y cada uno de los aspectos definidos para su monitoreo y evaluación. La segunda etapa de los ensayos, de producción de biodiesel y bioelectricidad, procurará realizarse en instituciones idóneas, mediante convenios marcos previamente celebrados.

**-Caracterización de las etapas de ciclo de vida.** La caracterización de cada etapa se realizará considerando las dimensiones social, ambiental, económica y político-institucional. Las cinco etapas que serán analizadas son: a) Producción o generación del recurso (biomasa de microalgas); b) Transporte del recurso (si es necesario); c) Conversión energética del recurso; d) Distribución de la energía y e) Uso final de la energía. Esta etapa consistirá de relevamientos de información primaria (entrevistas a actores clave y trabajos de terreno) y secundaria.

**-Relevamiento de variables críticas de cada etapa.** Se identificarán las variables críticas que deberían ser cuantificadas y profundizadas para cada sistema. Se partirá de un análisis en profundidad de las últimas experiencias internacionales, la consulta a expertos, y los criterios propios formados durante la investigación.

**-Propuesta de variables críticas transversales.** Se propondrán las variables críticas transversales que posibilitarían el análisis de otros sistemas bioenergéticos similares en la provincia.

**-Selección de métodos para cuantificación de aspectos críticos.** Se seleccionarán o diseñarán los métodos y técnicas necesarios para relevar los aspectos detectados.

**-Cuantificación de aspectos críticos de cada sistema.** Se cuantificarán las entradas y salidas relevantes de cada sistema, tomando como referencia la unidad funcional.

**-Sistematización de los resultados obtenidos.** Se relevarán las principales conclusiones y recomendaciones que posibiliten orientar futuros estudios en este campo. Quedarán explícitos los procedimientos para el establecimiento de las inferencias causales o multi-causales logradas.

**-Confeción del informe Final.**

## RESULTADOS ESPERADOS

Se espera detectar, evaluar y monitorear las especies nativas que mejor se desarrollen en la región, teniendo en cuenta los costos del cultivo, rendimiento y productividad. Se busca determinar las variables críticas de cada etapa del ciclo de vida en la producción de biodiesel y bioelectricidad en base a microalgas, proponiendo soluciones creativas (que posibiliten la viabilidad de la producción de bioenergía a nivel local) e identifiquen las condiciones óptimas de cultivo a fin de maximizar la producción de biomasa y lípidos y la generación de energía.

Interesa especialmente lograr sistemas lo más eficientes posibles en cuanto al aprovechamiento de los recursos, por lo que el estudio pondrá especial énfasis en la detección de las microalgas capaces de reproducirse a partir de efluentes industriales, que serán definidos y ensayados oportunamente. El objetivo último es analizar los balances de las principales variables detectadas de las dimensiones social, ambiental y económica y proponer y profundizar aquellos aspectos cuyo balance neto es negativo, (generando mayores impactos adversos) y optimizar aquellos aspectos cuyo balance se evalúa como positivo. Además, se determinarán variables críticas transversales que permitan realizar análisis comparativos precisos de las cadenas de producción estudiadas y/o con otros sistemas de producción de energía en base a otros recursos de biomasa.

Se generará una base de datos para posteriores consultas, actualizaciones y/o investigaciones sobre nuevas especies de microalgas factibles de ser empleadas en sistemas de producción de energía, nuevos métodos de cultivo, nuevos sistemas de conversión energética, que posibiliten la posibilidad de replicar los ensayos exitosos a mayor escala.

## REFERENCIAS

- Álvarez, C.M. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa* 359, 63-89.
- Amer, L., Adhikari, B., Pellegrino, J. (2011). Technoeconomic analysis of five microalgae-to-biofuels processes of varying complexity. *Bioresource Technology* 102, 9350–9359.
- Barnabas, I.J., Dean, J.R., Fowles, I.A., Owen, S.P., 1995. Extraction of polycyclic hydrocarbons from highly contaminated soils using microwave energy. *Analyst* 120, 1897–1904.
- Bindrabán, P.S., Bulte, E.H. y Conijn, S.G. (2009). Can large-scale biofuels production be sustainable by 2020?. *Short Communication. Agricultural Systems* 101, 197–199.
- Biswas, J., Chowdhury, R., Bhattacharya, P. (2005). Kinetic studies of biogas generation using municipal waste as feed stock. *Enzyme and Microbial Technology* 38, 493–503.
- Codina, F., Pérez Hurtado, C., Gobbi, F., Barón, J. (2011). Análisis de Ciclo de Vida de Sistemas de Producción de Biomasa de Microalgas para Captura de CO<sub>2</sub> en Plantas Cementeras. Comunicación presentada en el II Congreso Internacional de Ambiente y Energías Renovables, Villa María, Córdoba. Desde el 9 al 11 de noviembre.
- Davis, S., Aderson-Teixeira, K., DeLucia, E. (2009). Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. *Trends in Plant Science* 14, 140-146.
- Delucchi, M. (2006). *Lifecycle Analyses of Biofuels*. Institute of Transportation Studies University of California.
- Demirbas, A. (2010). Use of Algae as Biofuel Sources. *Energy Conversion and Management* 51, 2738–2749.
- Demirbas, A. (2011). Biodiesel from algae, biofixation of carbon dioxide by microalgae. A solution to pollution problems. *Applied Energy* 88, 3541–3547.
- Foteinis, S., Kouloumpis, V., Tsoutsos, T. (2011). Life cycle analysis for bioethanol production from sugar beet crops in Greece. *Energy Policy* 39, 4834–4841.
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Villegas, J. y Panichelli, L. (2009). Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. *Bioresour. Technol.* doi:10.1016/j.biortech.2009.05.067.
- Grisi, E., Yusta, J., Dufo-Lopez, R. (2011). Opportunity costs for bioelectricity sales in Brazilian sucro-energetic industries. *Applied Energy* 92, 860–867.
- Jury, C., Benetto, E., Koster, D., Schmitt, B., Welfring, J. (2009). Life Cycle Assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid. *Biomass and bio energy* 34, 54–66.
- Kendall, A., Chang, B., Benjamin, S. (2009). Accounting for Time-Dependent Effects in Biofuel Life Cycle Greenhouse Gas Emissions Calculations. *Environmental Science Technology* 43, 7142–7147.
- Kiss, G.A.C., Forgacs, E., Cserhati, T., Mota, T., Morais, H., Ramos, A., 2000. Optimization of the microwave-assisted extraction of pigments from paprika (*Capsicum annum* L.) powders. *J. Chromatogr. A* 889, 41–49.
- Li, H., Pordesimo, L.O., Weiss, J., Wilhelm, L.R., 2004. Microwave and ultrasound assisted extraction of soybean oil. *Trans. ASAE* 47, 1187–1194.
- Lucchesi, M.E., Chemat, F., Smadja, J., 2004. Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: comparison with conventional hydrodistillation. *J. Chromatogr. A* 1043, 323–327.
- Mol, A.P.J. (2007). Boundless Biofuels? Between Environmental Sustainability and Vulnerability. *Sociologia Ruralis* 47 (4), 297-315.
- Man, Z., Elsheikh, Y., Bustam, M., Yusup, S., Mutalib, M., Muhammad, N. (2012). A Brønsted ammonium ionic liquid-KOH two-stage catalyst for biodiesel synthesis from crude palm oil. *Industrial Crops and Products* 41, 144-149.

- Nafaji, G., Ghobadian, B., Yusaf, T. (2011). Algae as a sustainable energy source for biofuel production in Iran: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 3870–3876.
- Pan, X., Niu, G., Liu, H., 2002. Comparison of microwave-assisted extraction and conventional extraction techniques for the extraction of tanshinones from *Salvia miltiorrhiza* bung. *Biochem. Eng. J.* 12, 71–77.
- Park, J., Craggs, J., Shilton, A. (2010). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology* 102, 35–42.
- Patil, D., Gude, V., Mannarswamy, A., Cooke, P., Munson-McGee, S., Nirmalakhandan, N., Lammers, P., deng, S. (2010). Optimization of microwave-assisted transesterification of dry algal biomass using response surface methodology. *Bioresource Technology* 102, 1399–1405.
- Queiroz, A., França, L., Ponte, M. (2011). The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“dendê”) in the Amazon. *Biomass and Bioenergy* 36, 50-59.
- Sheenan, J., Dunahay T., Benemann, J., Roessler, P. (1998). A Look at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae. *National Renewable Energy Laboratory*, 1-328.
- Singh, A., Nigam, P., Murphy, .D. (2010). Renewable fuels from algae: An answer to debatable land based fuels. *Bioresource Technology* 102, 10–16.
- Wijffels, H., Barbosa, M., Eppink M. (2010). Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 4:287–295.
- Wijffels, H., Barbosa M. (2010). An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science* 329, 796-799.

## ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a method used worldwide to analyze the main impacts of the production of a good or service. In the area of energy has been used primarily to assess the sustainability of production systems for biodiesel and bioethanol. In Salta generated little information about potential bioenergy chains LCA develop. This work aims to apply this methodology to evaluate two systems based on microalgae for energy generation (biodiesel and bioelectricity), seeking to contribute to the assembly of a database on critical aspects of such systems and identifying issues and techniques that could be included in schemes provincial certification. We propose to characterize through testing, production, energy conversion and distribution of energy; relieve critical variables; quantify the inputs and outputs of the systems, define variables and compare cross the systems studied.

**Keywords:** Biomass; Microalgae; Bioelectricity; Biodiesel; Life Cycle Assessment.