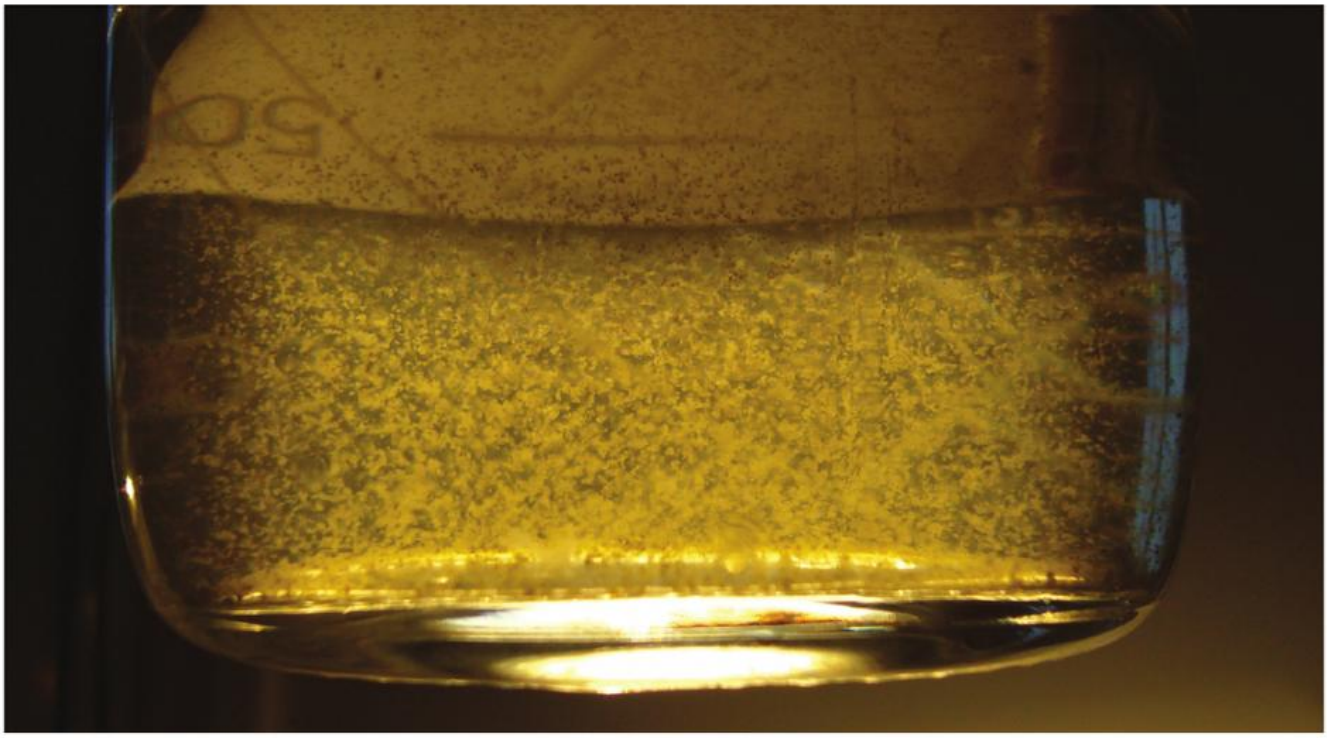

El uso de biomasa microalgal para la producción de bioenergía en Chile

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
Cristián Bravo[1], Egresado
César Sáez[2], Profesor asociado
[1] DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL
[2] DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOPROCESOS

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son organismos unicelulares que presentan distintos metabolismos. Por lo general se las considera fotoautótrofos, ya que poseen la capacidad de transformar carbono inorgánico (CO_2) en materia orgánica compleja (p.ej. lípidos, glúcidos y proteínas) [1,2]. Se encuentran presentes en ambientes naturales diversos y resultan relevantes para la industria bioenergética por su carácter renovable, su capacidad para utilizar CO_2 desde diversas fuentes y por no requerir suelos de uso agrícola para su producción.

Estos microorganismos han sido estudiados intensivamente en los últimos años dentro del campo de la bioenergía, ya que pueden ser empleados como materia prima sustentable en una planta bioquímica industrial o biorrefinería. A partir de ellos es posible producir combustibles como biodiesel, bioetanol, biohidrógeno y biogás; además de otros productos relevantes como fuentes proteicas para alimentación, nutracéuticos y fármacos.

El aceite que producen muchas especies de microalgas en diversas condiciones ha mostrado ser materia prima utilizable en la producción de biodiesel. Este éster combustible se obtiene mediante un proceso llamado transesterificación y utiliza triglicéridos como materia prima convencional. Por su parte, a partir de la fracción de glúcidos de microalgas es posible producir bioetanol mediante la fermentación alcohólica de azúcares que se pueden obtener de ellas de manera directa o indirecta. También es posible obtener biohidrógeno, ajustando el metabolismo de diversas microalgas empleando diversas estrategias de proceso, y biogás, utilizando parte o la totalidad de la biomasa microalgal en un sistema de digestión anaeróbica. Todas estas fuentes combustibles resultan en una oportunidad relevante que

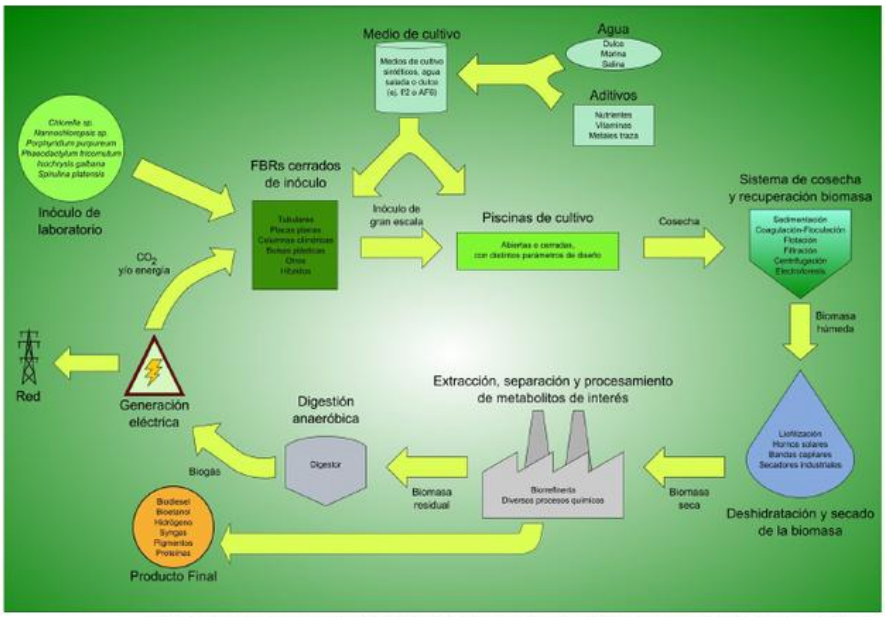

Figura 2: Diagrama general del proceso productivo de microalgas para la obtención de bioenergía.

podría permitir la disminución de la dependencia por los combustibles fósiles de la sociedad contemporánea.

A nivel mundial, EEUU, Alemania, China, Japón y España se encuentran a la vanguardia en la I&D de proyectos microalgales, ya sea bioenergéticos o alimenticios. En Chile, CORFO y el Ministerio de Energía han entregado fondos relevantes para la formación de consorcios empresariales para la producción de biocombustibles a partir de micro y macroalgas. Al respecto, la Pontificia Universidad Católica de Chile participa del Consorcio AlgaeFuels S.A. a través de académicos de las facultades de Ingeniería y Ciencias Biológicas. También en Chile se han establecido iniciativas privadas como Clean Energy E.S.B., localizada en Ventanas, V Región.

El objetivo general del trabajo aquí presentado es analizar -en términos económicos y energéticos- el uso de biomasa microalgal para la producción de biocombustibles en Chile, proveyendo un modelo que facilite la selección tecnológica, el diseño de procesos y el diseño de sistemas basados en microalgas. El modelo incluye el desarrollo de inóculo fotosintético en fotobiorreactores (FBRs), el cultivo de alta escala empleando la tecnología de piscinas abiertas, la cosecha de la biomasa microalgal, la extracción de compuestos de interés y la producción de biocombustibles y subproductos. El trabajo está siendo desarrollado en el contexto del convenio UC - Ministerio de Energía, cuyo objetivo es apoyar la investigación y obtener información relevante a nivel país sobre energías renovables no convencionales (ERNC), para contar con antecedentes actualizados y significativos que faciliten la elaboración de políticas en el ámbito energético.

METODOLOGÍA

Para modelar el proceso completo de producción de microalgas fue necesario realizar algunas actividades específicas: (1) recopilar información del estado del arte de las tecnologías que lo componen, (2) analizar las principales características que debe reunir el territorio nacional que favorezcan la producción de microalgas con fines bioenergéticos, (3) identificar a los principales actores y empresas que comercializan o investigan con biomasa microalgal a nivel local y mundial, y finalmente (4) evaluar -desde el punto de vista energético- los distintos fines de la biomasa. Gracias al desarrollo de estos cuatro puntos, se pudo obtener información respecto de cada una de las etapas del modelo (ver Figura 2).

Actualmente, el desarrollo del modelo económico-energético se encuentra en desarrollo. A partir de él, el usuario podrá seleccionar las principales tecnologías de cada etapa del proceso productivo y las principales condiciones de operación de una planta productora de biocombustibles a partir de microalgas. La localización precisa de la planta se realizará empleando los criterios de selección del sitio de cultivo propuestos por Milbrandt y Jarvis [3], que consideran aspectos climáticos, geográficos, hídricos y de suministro de CO_2 [3].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La siguiente descripción se enfocará en la producción de biodiesel de microalgas, de modo que la productividad de lípidos o aceite de microalgas será utilizada como criterio base de selección del microorganismo a cultivar.

1. Especies más adecuadas para producción de biodiesel de microalgas

La Figura 3 recompila las especies de microalgas con mayor productividad de lípidos. Es importante destacar que la composición de lípidos entre diversas especies de microalgas puede variar, lo que afectará el proceso de extracción y de producción de biodiesel. Además, el indicador de productividad tampoco entrega información respecto de la dificultad de extracción de estos aceites de microalgas. Pese

a esto, la recopilación realizada resulta valiosa por cuanto permitió jerarquizar diversas especies estudiadas con fines energéticos entre un grupo de 69 especies, cuya información fue compilada desde bases de datos científicas. Los resultados obtenidos indican que las especies *Nannochloropsis sp.* (marina), *Porphyridium purpureum* (marina), *Isochrysis galbana* (marina), *Spirulina platensis* (agua salina), *Phaeodactylum tricornutum* (marina) y *Chlorella sorokiniana* (agua dulce), podrían ser fuentes factibles de biomasa para la industria de biocombustibles

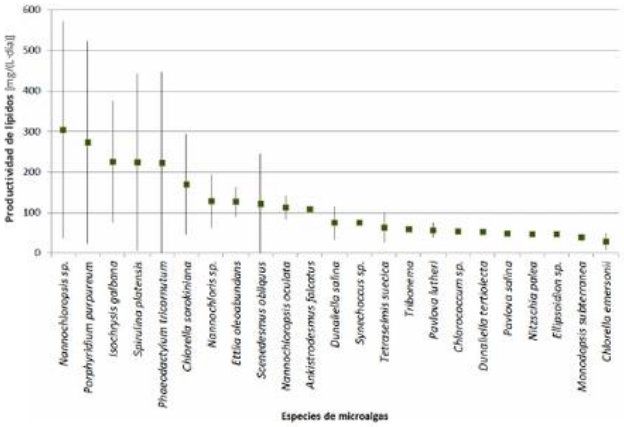

Figura 3: Rangos y media de la productividad de lípidos informados en la literatura especializada. Fuente: Elaboración propia.

Las características de la especie de microalga que se decida emplear en cultivos comerciales (en el caso de cultivos puros), determinará la tecnología o tecnologías factibles de utilizar en cada una de las etapas del proceso. Para los fines de este trabajo, se escogió la especie *Nannochloropsis sp.*, basándose en su productividad de lípidos.

2. Lugar óptimo para cultivo en Chile

La aplicación de los criterios de selección del sitio de cultivo propuestos por Milbrandt y Jarvis [3], que consideran aspectos climáticos, geográficos, hídricos y de suministro de CO_2, arrojaron como mejor sitio a nivel país para la instalación de una planta productora de biomasa de microalgas, a la bahía de Mejillones, II Región , Antofagasta (Chile). Al respecto, resulta relevante hacer notar que los criterios bajo los cuales se realizó la selección de la localización indicada, no consideran aspectos ambientales, como la contaminación del aire o la presencia de precipitación seca de partículas contaminantes que ciertamente afectarán el cultivo en piscinas abiertas. Tampoco se incluyen aspectos relacionados con la evaporación de agua, la utilización de cultivos multiespecie o cultivos heterotróficos, que empleen sustratos energéticos orgánicos de manera complementaria o exclusiva, entre otros.

3. Principales tecnologías vigentes asociadas al cultivo, cosecha y procesamiento de la biomasa microalgal

Figura 4: FBR cerrado tipo *airlift* con iluminación artificial (una de las tecnologías investigadas). Laboratorio de Energías Renovables y Residuos, Profesor César Sáez N.

Gracias a la investigación del estado del arte de los procesos de cultivo, cosecha, deshidratación y extracción de componentes de microalgas, se logró diseñar el modelo bajo el concepto de inoculación inicial (inclusión de microalgas en un medio de cultivo abundante para su reproducción y desarrollo) y posterior cosecha con bajo consumo energético. El inóculo de microalgas se prepararía en FBRs cerrados de placas planas para luego terminar su crecimiento en piscinas tipo *raceway*. Paralelamente, la cosecha se realizaría por medio de sedimentación asistida, empleando floculantes convencionales (por ejemplo, $FeCl_3$), más una posterior deshidratación de la biomasa por medio de bandas capilares, terminando en la ruptura celular y separación de los compuestos de interés en la biorrefinería [4].

De todas las aplicaciones y empresas estudiadas, resultan interesantes las investigaciones y desarrollos tecnológicos realizadas por las empresas Algenol Biofuels y Joule Unlimited. Ambas se encuentran experimentando con cianobacterias capaces de secretar bioetanol al medio de cultivo (fermentación oscura intracelular) que al mismo tiempo pueden acumular una importante fracción de lípidos [5].

4. Modelo económico-energético

A pesar de que no está concluido el estudio, se ha encontrado que la variable de decisión más importante del modelo desarrollado es la escala productiva del biodiesel a producir. Esta variable determinará la cantidad de piscinas, FBRs, estanques de almacenamiento y equipos varios que deberán ser construidos o comprados. Tomando como referencia el consumo nacional 2010 de petróleo diesel para el sector transporte (3.530.445 [t/año]), y asumiendo que

se desea abarcar un 0,2% de dicho consumo, la planta a lo menos debiera poseer 14.600 FBRs para inóculo de 440 [L/cu], 730 *raceway ponds* de 2.500 [m^2/cu], 16 estanques de almacenamiento de agua de mar y medio de cultivo (f/2 o equivalente) de 12.000 [m^3/cu], y una biorrefinería de 6.500 [m^2] aproximadamente.

CONCLUSIONES

El estudio realizado en este trabajo ha permitido abordar el proceso productivo de microalgas desde una perspectiva cercana a la ingeniería conceptual. Vincula decisiones puntuales sobre la especie, el lugar y la tecnología, con implicancias globales que determinarán el rendimiento económico-energético de la planta. Además, actualiza y recopila información relevante con respecto al estado del arte de las tecnologías que rigen el proceso.

Una vez terminado el modelo económico-energético, se podrá evaluar el tamaño de producción necesario para alcanzar beneficios económicos. Así también se podrá sensibilizar en torno al precio de mercado del biodiesel o realizar modificaciones tecnológicas en alguna etapa productiva para obtener una evaluación diferente (árbol de decisiones).

Finalmente, es necesario destacar la importancia de contar con un contexto socio-económico-ambiental favorable a la industria de las ERNC para que la industria de microalgas sea sustentable en el tiempo. Variables externas al proyecto como políticas tributarias que ayuden a las ERNC, un mercado regulado de bonos de carbono (p.ej. MDL) que permita el desplazamiento de combustibles fósiles por el consumo de biocombustibles microalgales y/o alianzas estratégicas con empresas termoeléctricas, cementeras o equivalentes que busquen disminuir su impacto ambiental, podrían ayudar a hacer más rentable proyectos bioenergéticos de esta naturaleza.

PRINCIPO CIENTÍFICO UTILIZADO

Las microalgas pueden ser concebidas como pequeñas fábricas en sí mismas. En su interior producen varios metabolitos de alto interés para el ser humano. Gracias a la fotosíntesis que desarrollan, pueden acumular varios tipos de lípidos, glúcidos, proteínas y pigmentos. Los procesos físico-químicos que permiten transformar estas materias primas en energía son los siguientes:

Transesterificación:

$$\underset{TAG}{\text{Triacilglicérido (o lípido)}} + \underset{3R'OH}{\text{Alcohol}} \xleftrightarrow{\text{Catalizador}} \underset{3R'COOR}{\text{Éster de ácido graso (o biodiesel)}} + \underset{C_3H_5(OH)_3}{\text{Glicerol}}$$

Fermentación alcohólica:

$$\underset{C_6H_{12}O_6}{\text{Glucosa}} + 2Pi + 2ADP \longrightarrow \underset{2C_2H_5OH}{\text{Etanol}} + 2CO_2 + \underset{2ATP}{\text{Energía}} + 2H_2O$$

Digestión anaeróbica: Suele dividirse en 4 etapas metabólicas (hidrólisis, fermentación, acetogénesis y metanogénesis)

Metanogénesis:

$$\text{Reductiva:} \quad 4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$
$$\text{Aceticlástica:} \quad CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$$

Este es el concepto fundamental de la biorrefinería, aprovechar todos los tipos de biomasa presentes en las microalgas para generar diferentes productos con alto valor económico-energético [6].

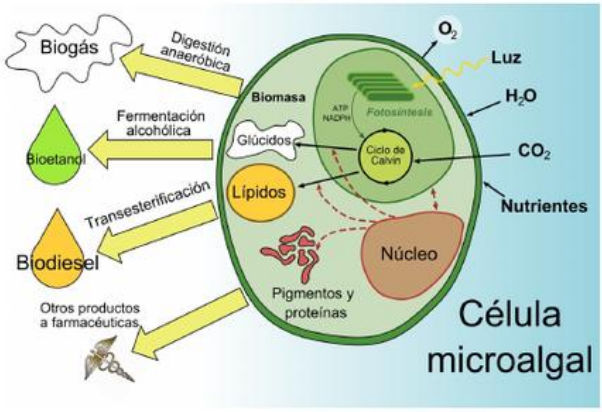

Figura 5: Diagrama de microalga con metabolitos de interés y productos de alto valor económico-energético. Fuente: Elaboración propia a partir de [6].

GLOSARIO

FBRs (Fotobiorreactores): Son reactores en los que se desarrollan organismos fotoautótrofos (microbianos, algas o células vegetales) o que son utilizados para llevar a cabo reacciones fotobiológicas.

ERNC (Energías Renovables No Convencionales): Sigla para referirse comúnmente a alternativas generadoras de energía eléctrica con baja o nula emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Suele incluirse en este grupo a la energía eólica, solar, biomásica, mareomotriz, geotérmica y mini-hidráulica.

Raceway ponds: Piscinas de baja profundidad con forma de pista atlética, que mantienen el flujo de medio de cultivo en movimiento mediante la acción de paletas rotatorias.

f/2 (medio de cultivo f/2): Es un medio de cultivo líquido, empleando para el desarrollo de diversas especies microalgales marinas. Su composición consiste en un 99,55% de agua de mar filtrada y desinfectada, 0,1% de metales traza, 0,05% de vitaminas y 0,3% de otros nutrientes.

MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio): Acuerdo suscrito durante el Protocolo de Kioto (1997) que permite a gobiernos, empresas, fundaciones y personas naturales, firmar acuerdos de reducción efectiva de GEI, por medio de financiamiento de proyectos en países en vías de desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio de Energía, por medio de Viviana Ávalos y Karin von Osten, por dar este tipo de oportunidades a alumnos de la UC. A Leandro Herrera, Leonardo Rodríguez y Sebastián Sas, por estar siempre presente en momentos en que se requirió su conocimiento. A Natalia, familiares y amigos, por su ayuda y paciencia durante las distintas etapas de la investigación.

REFERENCIAS

1. Mata, T. Martins, A. y Caetano, N. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1): 217-232, 2010.

2. Andersen, R. Algal Culturing Techniques. San Diego (EEUU), Academic Press, 2005, cap. 13 y 14.

3. Milbrandt, A. and Jarvis, E. Resource evaluation and site selection for microalgae production in India: Technical Report. Golden, CO (EEUU), National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010.

4. Richmond, A. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. 4ta Ed, Oxford (UK), Blackwell Science, 2004, cap. 9 y 10.

5. Savage, N. Algae: The scum solution. Nature, 474, S15-16, 2011.

6. Rosenberg, J. Oyler, G. Wilkinson, L. y Betenbaugh, M. A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. Current Opinion in Biotechnology, 19(5), 430-436, 2008.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Cristián Bravo
2 Profesor César Sáez

1

2