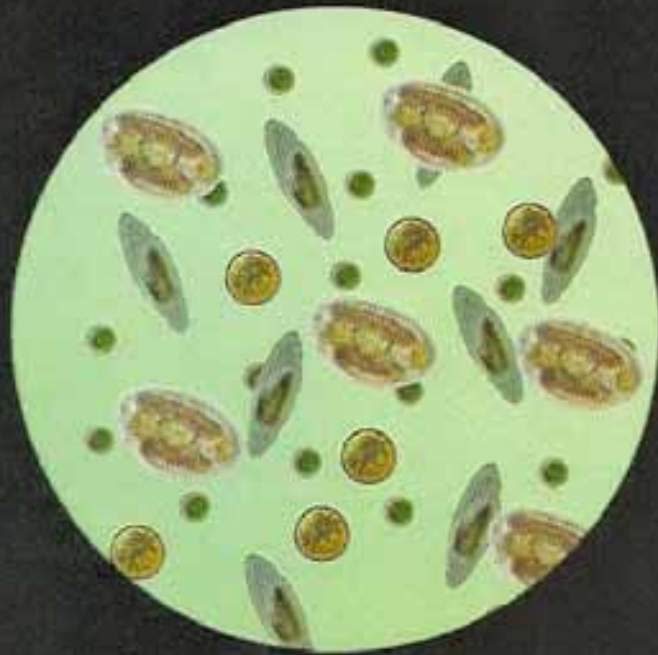


UNA VISION INTEGRADA SOBRE EL CULTIVO DE MICROALGAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Dr. José Pedro Cañavate Hors

Diseñado por Samuel Cañavate Fernández



La obtención de biocombustibles a partir del cultivo de microalgas no es viable con la tecnología actual debido al alto coste de producción y la carencia de estirpes seleccionadas.

Una visión integrada sobre el cultivo de microalgas para la producción de biocombustibles

José Pedro Cañavate Hors

IFAPA Centro El Toruño. Instituto de Investigación y Formación Agraria, Pesquera y de la Producción Ecológica. Junta de Andalucía.
Camino Tiro de Pichón s/n - 11500 Puerto de Santa María. Cádiz. España.

Antecedentes y objeto del documento.

En años recientes, la idea de utilizar biomasa de microalgas cultivadas para la obtención de nuevas fuentes de biocombustibles ha proliferado en el planeta, creando expectativas y confianza en una solución a corto plazo para los ya conocidos problemas asociados al uso de combustibles fósiles. Esta situación se ha visto favorecida por ciertas iniciativas, aparentemente en posesión de nuevas tecnologías, que no han trascendido en los medios de difusión científicos, que prevén una producción masiva de microalgas en el exterior muy por encima de valores esperados de acuerdo al nivel de conocimiento científico-técnico actual. Algunas propuestas, sorprendentemente, llegan a reclamar valores de producción de biomasa de microalgas superiores a los límites termodinámicos impuestos por el propio proceso de fotosíntesis. La difusión de estas iniciativas en medios de comunicación masivos, que obviamente no poseen la suficiente y especializada capacidad crítica para evaluar su viabilidad, está contribuyendo a crear la idea generalizada de que la obtención de una fuente de energía alternativa, a partir de biomasa de microalgas, es una realidad inminente.

A la vista de la rápida popularidad que las microalgas han alcanzado en los últimos años por su consideración para la elaboración de biocombustibles, se podría percibir la idea de que su cultivo es una actividad nueva. Nada mas lejos de la realidad. Mas de sesenta años de investigación en ficología aplicada avalan un conocimiento actual sobre producción masiva de microalgas que ha permitido su uso como alimento en la acuicultura de criadero de especies marinas, la depuración de aguas residuales y la producción de compuestos para sectores como la dietética y la cosmética. Se trata de productos cuyo valor de mercado permite llevar a cabo de forma rentable este tipo de actividad económica.

La idea de utilizar microalgas con fines energéticos no ha surgido ahora, ya que existen documentos publicados hace mas de treinta años en los que ya se apuntaba en este sentido. De especial relevancia es el trabajo realizado en Estados Unidos entre 1978 y 1996, recogido en un amplio informe (*A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae*). Este informe concluyó que la producción de microalgas con fines energéticos es potencialmente viable desde la perspectiva técnica, pero no desde el punto de vista económico. En la actualidad estos criterios aún perduran. La pregunta que surge entonces es ¿por qué ahora súbitamente han aparecido tantas iniciativas que postulan disponer de métodos para la producción industrial de biocombustibles a partir de microalgas?.

Según se detalla mas adelante, no existen evidencias científico-técnicas publicadas que avalen sistemas de producción de microalgas en el exterior con costes y dimensiones de la explotación compatibles con un uso económicamente rentable para biocombustibles. Aunque no sea posible encontrar unas causas claras para explicar este auge, sí se puede hacer coincidir con una serie de circunstancias que han acontecido casi a la par, y que pueden haber estimulado este fenómeno. Entre ellas se podría destacar el establecimiento de un precio para el CO₂ de origen industrial, derivado de las medidas para combatir la emisión de gases con efecto invernadero, así como la inestabilidad en el precio del petróleo, unida a la continua amenaza de su agotamiento. Por otro lado, el descrédito del uso de materias primas agrícolas con fines energéticos, por su efecto negativo sobre la alimentación de gran parte de la humanidad, ha contribuido también a la búsqueda de otras fuentes renovables de energía que no estén directamente relacionadas con la alimentación del hombre.

A partir de la biomasa de microalgas producidas a expensas de la fotosíntesis, y con la participación de CO₂ capturado de la industria y nutrientes de desecho resultantes de la actividad humana, se crea un escenario en el que se percibe una atractiva posibilidad técnica de conseguir compuestos energéticos. Los principales compuestos con potencial de obtención a partir de microalgas son etanol y aceites. El primero requiere de la consecución de microalgas capaces de desviar compuestos del ciclo de Calvin hacia rutas que rindan etanol, siendo necesario para ello una labor de investigación en ingeniería genética que permita disponer de estirpes en las que los genes implantados en su genoma se expresen de manera estable. Debido a esto, solamente se consideran cianobacterias dada la mayor simplicidad de su genoma procarionta. Las cianobacterias no son, por el contrario, adecuadas como fuente de aceites debido a que su contenido lipídico no sobrepasa el 10%. Como fuente de aceites que puedan ser transformados en biodiesel existen microalgas incluidas en diferentes Clases taxonómicas, cuya principal diferencia interespecífica radica en el grado de saturación de los ácidos grasos sintetizados por las mismas.

El objetivo de este documento es el de presentar una serie de reflexiones personales sobre el estado actual y las posibilidades del cultivo masivo en el exterior de microalgas cuando estas se pretenden destinar a fines energéticos. Estas reflexiones se basan en los conocimientos adquiridos tras años de investigación y desarrollo en el cultivo, cosecha y preservación de microalgas marinas, así como en conclusiones extraídas de documentos publicados por ficólogos de reconocido prestigio internacional. Asimismo, las consideraciones aquí presentadas se ciñen exclusivamente a procesos biológicos y económicos relacionados con la producción de microalgas, ignorando eventuales fenómenos financieros o subvenciones, que puedan modificar lo que debe ser un balance económico real. Se trata simplemente de difundir de manera concisa y clara una serie de conceptos elementales, extraídos del conocimiento científico-técnico actual en producción de microalgas, que puedan ser útiles al no especialista para comprender mejor las posibilidades reales de esta actividad en el presente. El documento tiene también como finalidad la de manifestar el temor de que un eventual fracaso en la obtención de biocombustibles a partir de microalgas, debido a un escaso conocimiento tecnológico, pueda acarrear el descrédito ante

la opinión pública de las microalgas. La profusa y descompensada difusión de las microalgas como fuente de biocombustibles, en comparación con el resto de las numerosas aplicaciones potenciales de las microalgas, podría tener ese efecto, y dicho fracaso podría afectar colateralmente al interés social por importantes aplicaciones futuras de las microalgas en materia de nutrición y farmacia.

Aspectos sobre la producción de microalgas en el exterior.

En la actualidad, cuatro especies de microalgas (*Dunaliella*, *Arthrospira*, *Haematococcus* y *Chlorella*) representan el grueso de una producción mundial de biomasa en torno a 10.000 Tm anuales. La demostración de que las microalgas puedan representar una fuente eficiente de biocombustibles representaría un sorprendente y espectacular incremento exponencial de esta cifra, debido a la cuantía de la producción que se ha previsto. Pero ello pasa inexorablemente por la consecución de extensas zonas en las que se lleven a cabo cultivos con muy bajos costes de producción.

La producción masiva de microalgas en el exterior se efectúa en dos tipos principales de estructuras, tanques abiertos a la atmosfera (TA), con o sin consumo energético para la agitación del medio, y fotobiorreactores cerrados (FBR), en los que el cultivo de microalgas es continuamente recirculado a través de estructuras con diseños más o menos complejos, y protegidos de la influencia de la atmosfera. Existen numerosas diferencias en las prestaciones que TA y FBR ofrecen de cara a la producción masiva de microalgas, pero la que más hay que destacar cuando se trata de encontrar una aplicación energética para la biomasa cultivada de microalgas es la relacionada con los costes de producción.

De manera general, la elevada inversión inicial en infraestructuras y la mayor demanda energética para mantener las suspensiones celulares de microalgas en agitación/circulación, sitúan los costes de explotación para los FBR entre 3 y 10 veces por encima de los costes registrados para la producción en TA. En algunas ocasiones estas diferencias son aún mayores y solo justifican la producción de biomasa de microalgas en FBR para casos con muy elevado valor económico, en los que además las estirpes de microalgas cultivadas son sensibles a la contaminación de sus cultivos por otros microorganismos no deseados.

De acuerdo a estas diferencias en costes de producción entre FBR y TA, no parece razonable por el momento recurrir a FBR como elementos de producción para obtener compuestos de bajo valor comercial. Además, la experiencia en la investigación sobre la producción en el exterior en FBR ha demostrado como el diseño y operación de estos ha de adaptarse a las variables necesidades fisiológicas que presentan las diferentes especies de microalga. Hoy ya se sabe que la variabilidad taxonómica para la tolerancia a la amplitud de los ciclos diarios de radiación y temperatura, y parámetros como foto-inhibición o foto-respiración, es muy elevada. Estos fenómenos resultan además ampliamente magnificados al utilizar suspensiones celulares de microalgas mas densas en sistemas más intensivos de cultivo, con reducido paso de luz, como es el caso de los FBR. Así, la diferencia de respuesta dada por distintas especies de microalgas en un mismo sistema de cultivo en FBR llega a ser muy alta. Se conoce también el

escaso rendimiento del cultivo en FBR de algunas especies que son capaces de crecer bien en TA. Por lo tanto, reclamar un único sistema de cultivo de microalgas en FBR, apto para cualquier especie, resulta de escaso sentido, y contrario a la lógica que se deriva de los conocimientos más recientes sobre la fisiología de microalgas sujetas a crecimiento en condiciones intensivas con elevada densidad celular. Antes de tener un sistema de FBR optimizado es altamente aconsejable pues determinar que estirpe de microalga va a ser objeto de la explotación.

En consonancia con los menores costes de producción en TA, es preciso resaltar el hecho de que en la actualidad el 98% de la biomasa de microalgas producida en el mundo con fines comerciales es obtenida mediante cultivos en TA. A destacar también el hecho de que las especies de microalgas explotadas lo son gracias a su capacidad de crecimiento en ambientes extremos. Esta característica les permite reducir al mínimo los riesgos de contaminación por otros microorganismos competidores o depredadores. Sin embargo, crecer en condiciones extremas lleva implícito una sensible disminución de la producción. Un ejemplo claro y ya antiguo de explotación comercial de microalgas es el de *Dunaliella*, especie capaz de crecer en ambientes altamente hipersalinos, y que es fuente de betacaroteno en el mercado internacional de la dietética. Por otro lado, también es bien conocida la producción de *Arthrospira* (*Spirulina*) en cultivos en TA, caracterizados por una elevada alcalinidad carbonatada, factor que actúa como barrera para el desarrollo de otros microorganismos no deseados.

Cuestiones específicas respecto a la aplicación de microalgas como biocombustibles.

La producción de *Dunaliella* y *Arthrospira* en TA se considera como la que actualmente presenta menores costes, estimándose entre 3€ y 5€ por Kg de biomasa seca producida. No se ha descrito hasta el momento un proceso de producción industrial con costes inferiores. En este sentido, si las microalgas están llamadas a competir con los aceites vegetales de origen terrestre que se emplean en la actualidad con fines energéticos, será preciso demostrar que se dispone de procesos industriales capaces de reducir en más de un orden de magnitud el mínimo de 3€ Kg⁻¹ antes referido. Este es un factor seriamente condicionante para el desarrollo de una industria real en torno a biocombustibles a partir de microalgas, que se tiene muy poco en cuenta cuando se presentan propuestas en base a la superior productividad de las microalgas respecto de los vegetales cultivados en tierra. Evidentemente, y por cuestiones biológicas que no vienen ahora al caso, las microalgas presentan un potencial de producción por unidad de superficie mayor que el de las plantas terrestres. Aunque de manera osada se mencionen valores de productividad de las microalgas cien veces superiores a los registrados en la agricultura, situar esta teórica diferencia entre 10 y 20 veces resulta lo más razonable. Pero no se debe olvidar un aspecto clave, y es que estos valores no son más que proyecciones teóricas de resultados experimentales obtenidos en condiciones de reducidas dimensiones. La experiencia ha demostrado como el escalado, por ejemplo, de una explotación de girasol, es factible, permitiendo extrapolar y aplicar con

relativa facilidad lo que ocurre en una finca experimental de pocos metros cuadrados a extensiones de varias hectáreas. Asumir este concepto cuando se trata de superficies extensas dedicadas a la producción de microalgas es erróneo, y genera una situación de irrealidad en relación al posible éxito de cualquier propuesta que ignore este "pequeño gran matiz" diferencial entre la agricultura y la acuicultura de especies fotosintéticas.

Este documento no pretende menospreciar hipotéticos avances tecnológicos espectaculares que se puedan producir en el campo de la producción de microalgas en FBR. El autor se declara entusiasta de este sistema de cultivo en el que ha trabajado varios años y anima iniciativas que conduzcan a su mejor desarrollo. Sin embargo, reconoce que, de acuerdo a las características generales de la producción industrial de microalgas en la actualidad, lo más razonable para el planteamiento de una explotación acuícola de microalgas con fines energéticos sería el uso de TA en los que puedan crecer estirpes con elevado rendimiento en extensas superficies. Esta circunstancia encuentra un serio obstáculo en la definición de qué especie o estirpe de microalga es la adecuada para proliferar en sistemas abiertos sin sufrir de la invasión de otros microorganismos competidores o depredadores.

Trabajar para encontrar estirpes de microalgas capaces de crecer en extensos sistemas abiertos, sujetos a las fluctuaciones ambientales de radiación y temperatura, y expuestos a la acción de numerosos organismos invasores, es una tarea que requiere una larga y costosa labor de investigación básica. Este es un paso clave antes de alcanzar a medio o largo plazo uno de los elementos básicos para la producción de biocombustibles a partir de microalgas, como son las propias estirpes seleccionadas a tal efecto. Esta búsqueda ha de hacerse en combinación con las características del medio en el que se vayan a producir. Dada la elevada demanda de agua que se produce como consecuencia de la alta evaporación que suele existir en zonas bien irradiadas, resulta imprescindible aportar continuamente un volumen de reposición para mantener el nivel hidráulico del cultivo. Esta demanda hídrica tiende a concentrar las sales del medio de cultivo, razón por la que uno de los criterios de selección de estirpes tendría que estar relacionado con una alta capacidad de osmorregulación, en particular cuando se trate de estirpes marinas. Por lo tanto, hablar hoy día de una producción inminente de biocombustibles a partir de microalgas, sin describir (aunque solo sea de manera somera o encriptada, para así no desvelar eventuales secretos industriales) las características técnicas específicas del material biológico con el que se cuenta para la explotación, resta mucha credibilidad de cualquier propuesta.

Una vez que se dispone del material biológico adecuado, así como de las condiciones más idóneas para su cultivo masivo, es el momento de proceder a estimar la capacidad de producción en el exterior. La rentabilidad de la operación pasa por su ubicación en una zona geográfica con elevada disponibilidad de energía solar, en la que además otros factores ambientales permitan una máxima conversión de la radiación solar en biomasa de algas. Según la FAO, las zonas más adecuadas para ejecutar este tipo de explotaciones se encuentran en latitudes comprendidas entre 37°N y 37°S. Evidentemente, pueden existir excepciones puntuales, en particular en lugares donde pueda

existir una fuente termal aprovechable sin coste. El sur de la Península Ibérica recibe una irradiación solar compatible con valores interesantes de producción de biomasa. En el entorno de la Bahía de Cádiz la radiación fotosintéticamente activa (PAR) incidente diariamente oscila entre valores medios de 3 MJ m^{-2} y 11 MJ m^{-2} . La integración de valores diarios arroja un global anual en torno a 2600 MJ m^{-2} . Sin embargo, al combinar valores ambientales de irradiación, temperatura y pluviosidad, el ciclo anual de producción se reduce aproximadamente a un 75%, dependiendo de la confluencia de valores compatibles para el crecimiento de las microalgas. En particular, las bajas temperaturas invernales merman la producción de las especies conocidas.

La biomasa de microalgas con elevado contenido calórico presenta valores en torno a 22 MJ kg^{-1} . Si se considera que la eficiencia energética de la conversión de la radiación solar en biomasa de microalgas a través de la fotosíntesis oscila entre el 3% y el 6%, según las especies y los sistemas de cultivo, se puede deducir una producción máxima en el entorno de $6 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Es de esperar que nuevos avances científicos y tecnológicos puedan elevar la eficiencia fotosintética en los cultivos masivos de microalgas en el exterior hasta un 10%, en cuyo caso podría trabajarse con un horizonte de producción sobre 9 kg m^{-2} . Una simple extrapolación de gabinete permitiría estimar un potencial de producción en 90 Tm Ha^{-1} . No obstante, hay que recordar la ya comentada gran dificultad para conseguir esos valores en el campo abierto, debido al elevado número de elementos que desestabilizan el desarrollo de poblaciones específicas de microalgas cuando estas crecen influenciadas por las condiciones del entorno.

La complejidad para estabilizar la producción de estirpes de microalgas "no extremófilas" en TA de grandes dimensiones es el principal argumento para proponer la utilización de FBR. En este sentido, es necesario encontrar razones económicas que justifiquen el uso de una u otra opción, algo que estará también en función del valor de mercado del producto o finalidad de las microalgas producidas. Unos cálculos sobre rendimiento económico, contemplando la amortización de costes iniciales en infraestructuras de cultivo, pueden facilitar un mejor entendimiento de que nivel de inversión es coherente con el valor económico de la biomasa de microalgas producida. En el caso específico de microalgas productoras de aceites para competir en el mercado con aceites derivados de vegetales terrestres, hay que fijar un valor de referencia para estos, algo muy variable hoy día debido a la fuerte influencia que el precio del petróleo ejerce sobre el de los aceites vegetales. Un valor ponderado de $0,8 \text{ € Kg}^{-1}$ para estos podría ser adecuado para tener un referente competitivo sobre el que estimar el coste de inversión inicial asumible para una planta de microalgas.

Considerando una situación optimista de producción ($7,5 \text{ Kg m}^{-1} \text{ año}^{-1}$), que es intermedia entre los valores antes calculados, y para una biomasa que tuviese un contenido lipídico máximo (30%), la producción de aceite por unidad de superficie sería $2,3 \text{ Kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Si se asigna un máximo del 35% del valor de la producción destinado para amortizar los gastos iniciales de infraestructura resulta que cada año sería preciso dedicar $2,3 \times 0,80 \times 0,35 = 0,65 \text{ € m}^{-2}$ en amortización. Por lo tanto, una explotación comercial que pretenda cubrir los costes de la inversión inicial en un plazo de 20 años no podrá acceder a infraestructuras de cultivo con un coste inicial de construcción superior a

$20 \times 0,65 = 13 \text{ € m}^{-2}$. Este valor no solo cae muy por debajo de los costes de fabricación de instalaciones para FBR, sino también de aquellas que usen estructuras de invernadero, o incluso algunos tipos de TA con agitación por paletas. Este nivel de inversión inicial podría ser compatible con la construcción de estanques excavados con protección plástica del fondo.

La cuantía de la inversión inicial necesaria para construir una planta de producción a base de FBR puede ser un orden de magnitud superior a la estimada para TA. De acuerdo a esto, y efectuando cálculos razonados similares a los anteriores, esta planta tendría que imputar un mínimo de 5 € Kg^{-1} solo en el apartado de amortización (20 años). Si este valor es el 35% de la producción, el precio mínimo de esta tendría que ser de 14 € Kg^{-1} . Por otro lado, los costes energéticos imputables a la producción serían también superiores. A cambio, es de esperar que la producción en FBR reduzca los costes de procesado.

Naturaleza, cosecha y procesado de biomasa.

La alta variabilidad de respuesta interespecífica que las microalgas muestran frente a las condiciones de cultivo masivo en el exterior se encuentra también para los productos obtenidos a partir de ellas. Esta bien demostrado que la composición bioquímica de las microalgas varía enormemente, no solo entre especies, sino también en función de condiciones de temperatura, irradiancia y concentración de nutrientes. En este sentido, el potencial de aprovechamiento de compuestos antioxidantes, fotoprotectores, inmunoestimulantes, toxinas o factores de crecimiento está aún por explorar dentro de campos como la farmacia, cosmética y nutrición. Más avances existen en torno a las excelentes propiedades de los lípidos producidos por las microalgas, las cuales son las grandes productoras en la biosfera de ácidos grasos altamente insaturados de cadena larga (HUFA). Se trata de nutrientes de muy elevado valor en nutrición humana y ganadera (destacando aquí lógicamente la acuícola).

La producción de aceites a partir de microalgas puede llegar a ser elevada, pero es preciso tener muy claro que durante su fase de crecimiento activo no suelen poseer más de un 15% de lípidos. Estos compuestos solo se acumulan cuando las microalgas son privadas de nutrientes, y esta situación va asociada a una detención del crecimiento durante un periodo de tiempo, variable según la especie. Este fenómeno reduce significativamente el periodo de producción, y por lo tanto es importante considerarlo cuando se efectúan estimas teóricas, como las anteriores, de productividad por unidad de superficie y tiempo.

Los cultivos de microalgas, incluso en sus estados más avanzados de crecimiento, son suspensiones celulares muy dispersas, en las que el volumen que corresponde a la población de microalgas no excede del 0,2% del volumen total. Descartar por lo tanto 998 L de medio de cultivo para retener tan solo 2 L de volumen celular empaquetado es una labor que requiere de un importante esfuerzo en concentración. Los métodos empleados en la actualidad para cosechar microalgas recurren a la centrifugación en continuo y al empleo de compuestos floculantes. Se trata de sistemas que presentan un coste mínimo de $0,5 \text{ € Kg}^{-1}$ de biomasa cosechada. Este valor habría que añadirlo a los costes

anteriormente estimados y representa un factor más en la falta de viabilidad económica para la elaboración de biocombustibles a partir de microalgas.

La consecución de métodos más económicos para cosechar microalgas pasa por el desarrollo de nuevas investigaciones en fenómenos de autofloculación, que permitan en un plazo medio de tiempo acceder a una tecnología que facilite la agregación celular sin necesidad de efectuar gasto en compuestos químicos o energía centrífuga. La biomasa húmeda escurrida ha de ser posteriormente desecada y sus aceites extraídos. En el caso de su transformación en biodiesel será necesario también añadir los costes de la transesterificación. Esto es común con los aceites de origen terrestre, pero en el caso de microalgas marinas los especialistas en el procesado químico del aceite tendrán que prestar especial atención a su mayor grado de instauración, y por tanto mayor sensibilidad a la oxidación, así como a su elevado contenido de yodo.

Usos alternativos y/o colaterales de la biomasa de microalgas.

Una de las razones argumentadas para el cultivo masivo de microalgas que produzcan biocombustibles es su papel en el secuestro del CO₂ emitido por la industria. Al margen de cuestiones de ingeniería para el correcto tratamiento y un eficaz suministro de los gases emitidos, es preciso considerar algunos aspectos generales relacionados con la utilización del CO₂ en los cultivos de microalgas. La dosificación de CO₂ se efectúa de manera automatizada de acuerdo a sistemas de retroalimentación que controlan su entrada en función de la demanda que del mismo hacen los cultivos de algas. Un ligero exceso de CO₂ inyectado en el medio de cultivo no suele ser perjudicial para gran parte de las microalgas, pero esta circunstancia disminuye su eficacia de conversión en biomasa. Así pues, un diseño simplista con una inyección directa y no regulada de CO₂ en los cultivos representaría un mecanismo muy poco eficaz para secuestrar CO₂, sobre todo si se considera la ausencia de demanda durante las horas de oscuridad. Es necesario pues utilizar elementos relativamente sofisticados para regular la inyección de CO₂ cuando la producción de microalgas se pretende hacer de manera acoplada a una fuente industrial de CO₂. Este tipo de inversión es difícil de justificar cuando se trabaja en grandes TA de coste reducido, aunque sería muy importante encontrar una vía económicamente rentable.

Uno de los atractivos para acoplar cultivos de microalgas a fuentes industriales de CO₂ radica en los aproximadamente 30 € Tm⁻¹ que se cotiza el secuestro de este gas. Teniendo en cuenta que, para una hipotética eficiencia total de incorporación, serían necesarios 1,8 Kg de CO₂ para su conversión en 1,0 Kg de biomasa, es posible deducir que por cada Kg de biomasa existiría un "bono ecológico" de 0,05€. Esta bonificación resulta muy interesante si la producción de biomasa presentase unos costes (<0,25 € Kg⁻¹) que permitieran obtener aceites competitivos con los de origen terrestre. Sin embargo, para los mínimos costes de producción descritos, esta bonificación apenas supone un 2%.

Conociendo el factor de conversión de CO₂ en biomasa y asumiendo el mejor de los casos de producción antes teorizado, se puede estimar que una Ha

de terreno podría secuestrar 162 Tm del gas emitido en un año. De acuerdo a este valor, para una industria que emitiese 10^6 Tm de CO_2 anualmente sería necesaria una extensión de terreno ligeramente superior a las 6000 Ha para capturar toda la emisión. Por otro lado, hay que tener muy claro que el término que se utiliza es el de secuestro de CO_2 , y no el de inmovilización. La diferencia es importante, ya que el secuestro no es más que una retención temporal del CO_2 en la biomasa, antes de retomar su camino hacia la atmósfera, al efectuarse la combustión de aquella. No se puede considerar pues que esta actividad contribuya a un balance negativo de emisión de CO_2 a la atmósfera, sobre todo si se tiene en cuenta la insignificancia que representa el tiempo que el CO_2 permanece retenido en la biomasa, en comparación con el ritmo a que acontecen los procesos en la ecosfera. Por el contrario, la producción en TA a expensas del CO_2 atmosférico, aunque mucho menos eficiente en términos de productividad, sí representaría un balance cero real en términos de carbono. Quizás una solución intermedia, con producción en TA asociada a industria, podría ser interesante, pero eso es algo que hay que averiguar.

En términos generales, el uso de biocombustibles derivados del aprovechamiento de CO_2 industrial solo tendría un sentido de protección ambiental si ello redundase en una reducción del uso de combustibles fósiles, pero eso es algo altamente improbable dada la impresionante demanda que tiene la especie humana por los recursos energéticos. La transformación de grandes extensiones de terreno para producir biocombustibles acelera el ritmo de deforestación masiva y pérdida de biodiversidad, cuestiones ambientales que parecen eclipsadas por el monopolio ejercido por el gran tema de debate actual como es el de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Hasta el momento, la producción de biocombustibles a partir de microalgas se ha referenciado solo a los aceites vegetales de origen terrestre, con los cuales deberían de ser económicamente competitivos. En este sentido, llama la atención la práctica inexistencia de propuestas específicas para la producción de biomasa de microalgas destinadas a mercados de aceites con mejor cotización. Aparentemente, parecería más lógico ubicar los productos derivados de las microalgas, incluyendo por supuesto los aceites, en el mercado de la alimentación. El precio del aceite de pescado supera en un 50% al de aceites vegetales y debería resultar por lo tanto más atractivo como objetivo comercial para los aceites obtenidos a partir de microalgas. Además, la producción de aceites de pescado hace mucho tiempo que alcanzó su techo y las pesquerías mundiales no dan para más. Sin embargo, su demanda continúa en ascenso, con la acuicultura acaparando casi un 80% de la misma, y creciendo a un ritmo del 10% anual. Además del factor económico, hay que recordar también que la máxima calidad nutricional de los lípidos existentes en las microalgas marinas representan un factor más a favor de su empleo prioritario en alimentación.

A pesar de la mejor adecuación económica de la producción de biomasa de microalgas para la alimentación, este sector presenta valores que todavía serían insuficientes para rentabilizar la producción, de acuerdo a los cálculos efectuados anteriormente. Pero no cabe duda que es un elemento de referencia mucho más sensato que el de los biocombustibles, simplemente por los precios que cotiza, y sin querer entrar desde este documento en cuestiones sociales. Ante

la dificultad de disponer por el momento de procedimientos económicamente viables para usar productos de las microalgas en campos de aplicación masiva como el energético y el de la alimentación, se debe presentar la opción de comercializar compuestos de elevado valor de mercado. De esta manera, los productos destinados a alimentación o energía tendrían el carácter de co-productos. Esta sería una situación ideal, pero requiere de una larga trayectoria de investigación y desarrollo antes de poder considerar la existencia de una actividad industrial económicamente viable, sobre todo si algunos de los compuestos de elevado valor son destinados al campo de la farmacia. Solo bajo estas condiciones, y previsiblemente en un futuro después de invertir fuerte en investigación, podría plantearse la producción de microalgas para biocombustibles de manera industrial.

Conclusiones

No se conoce un sistema de producción de microalgas en el exterior capaz de rentabilizar económicamente la producción de microalgas para biocombustibles. La producción de microalgas en FBR solo es económicamente viable para compuestos de elevado valor de mercado.

Una estima de producción escalada artificialmente para grandes superficies, y basada en resultados optimizados de crecimiento actuales, puede predecir una capacidad de producción de biomasa de microalgas en el entorno de la Bahía de Cádiz de $60 \text{ Tm Ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Esta previsión de producción está sujeta a disponer de estirpes adecuadas al entorno, que toleren condiciones de crecimiento en tanques abiertos y resistan la influencia de microorganismos contaminantes. Conseguir estas estirpes es una ardua labor que requerirá un gran esfuerzo de investigación.

Una de las claves para el éxito de una futura explotación de microalgas dedicada a la obtención de biocombustibles radicará en la habilidad para saber efectuar el escalado de la producción.

La rentabilidad de una explotación futura de microalgas para biocombustibles dependerá de la coproducción de otros compuestos de elevado valor comercial, aún por investigar y desarrollar. Esta es la única vía que podría facilitar la producción en FBR.

El Puerto de Santa María, Diciembre de 2008.

josep.canavate@juntadeandalucia.es