

Evaluación global de la producción de biocombustibles con microalgas: Establecimiento de capacidades, limitaciones y factores determinantes de la viabilidad del proceso

F.G. Acién^{*1}, J.M. Fernández-Sevilla¹, J.J. Magán², A. González-Céspedes², E.Molina¹

¹Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Almería, 04120 Almería, España

²Estación Experimental Las Palmerillas, Fundación Cajamar, 04710 Almería, España

* Autor para correspondencia: facien@ual.es

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis global de la producción de microalgas para la producción de biocombustibles. El punto de partida es el balance de energía al proceso que permite cuantificar la capacidad de producción máxima alcanzable en 200 ton/ha·año aunque los valores reales obtenidos a pequeña escala difícilmente superan las 100 ton/ha·año. Para lograr estas altas productividades es necesario utilizar sistemas de cultivo y microalgas de elevado rendimiento, es decir que permitan alcanzar altas productividades con bajos consumos energéticos o utilizando muy eficazmente la radiación solar disponible. Las tecnologías de cultivo a emplear deben ser optimizadas pero no necesariamente tienen que ser reactores abiertos de gran volumen por unidad de superficie, siendo posible utilizar reactores de poco volumen por unidad de área. El mayor cuello de botella para la producción de biocombustibles a partir de microalgas es el elevado coste de producción de la biomasa. El análisis económico llevado a cabo permite identificar los factores que más contribuyen a dicho costo. De este estudio se concluye que los reactores de elevada productividad y baja relación V/S son los más recomendables, aunque hoy día siguen siendo demasiado costosos frente a los tradicionales reactores abiertos tipo raceway.

Palabras clave: *Microalgas, biocombustibles, coste producción, productividad, fotobiorreactores.*

Abstract

This paper summarizes the major aspects in the production of biofuels from microalgae. Analysis begins from the energy balance to the process that allows to determine a maximum production capacity of 200 ton/ha·year, although values higher than 100 ton/ha·year are barely reported. To achieve maximum productivity it is mandatory to use photobioreactors and microalgae highly efficient, capable to produce biomass with lower power consumption and efficiently using the solar radiation. Although open reactors are the most used photobioreactors to produce microalgae, it can be produced including in closed photobioreactors with positive energy balance, the key parameter being the areal productivity and the specific power consumption of the reactor. Anyway, the bottleneck for the massive production of microalgae is their high cost. Cost analysis performed allows identifying major factors determining this production cost. From this analysis it is concluded that photobioreactors with high biomass productivity and low volume to surface ratio are recommended, although today this type of photobioreactors remain too expensive versus the most traditional open raceways.

Keywords: *Microalgae, biofuels, production cost, productivity, photobioreactors.*

1. Introducción

La idea de producir biocombustibles a partir de microalgas procede de los años 60 (Oswald and Golueke 1960). De esta época son los primeros intentos relevantes de llevar a cabo este proceso a gran escala, cuando Japón y EEUU pusieron en marcha proyectos de investigación nacionales con este objetivo (Benemann 1997; Hughes and Benemann 1997). A pesar de estos importantes esfuerzos no se alcanzó un desarrollo comercial viable debido a los elevados costos de producción de la biomasa de microalgas y de los biocombustibles obtenidos cuando se comparaban con el precio del petróleo y sus combustibles derivados. Por este motivo, hasta hace pocos años la producción de microalgas ha quedado restringida a la obtención de productos de alto valor o biomasa de alta calidad de uso en alimentación humana y animal, especialmente en acuicultura (Pulz and Gross 2004). Sin embargo, el alza en los precios del petróleo y el problema de calentamiento global derivado del uso del petróleo como combustible han vuelto a focalizar la atención en las microalgas como fuente de biocombustibles (Chisti 2007; Chisti 2008). Las microalgas han sido propuestas como sistema de captura de CO₂ y su transformación en productos de uso industrial como biocombustibles, aminoácidos, carotenoides, o incluso su empleo en el tratamiento de aguas residuales (Benemann 1997 ; Muñoz, *et al.* 2005 ; Olgún 2003, 2012 ; Pulz and Gross 2004 ; Rodolfi, *et al.* 2009 ; Romero García, *et al.* 2012) ya que aproximadamente el 40% del peso de la biomasa es carbono, por lo que la producción de 100 toneladas de biomasa requiere un consumo mínimo de 183 toneladas de dióxido de carbono. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la biomasa producida no puede ser almacenada por largos periodos ya que se corrompe fácilmente, por lo que el uso de microalgas

no puede ser considerada una estrategia de almacenamiento de dióxido de carbono.

Las microalgas tienen determinadas ventajas frente a los cultivos energéticos convencionales como fuente de biocombustibles entre las que destaca el hecho que las microalgas compiten con dichos cultivos por agua y suelos fértiles, no afectando así a la producción de cultivos destinados a consumo humano. En este sentido, las microalgas han sido propuestas como la única alternativa sostenible para la producción de biocombustibles (Chisti 2007). Sin embargo, para ser competitiva en el mercado energético la producción de microalgas debe aproximarse a la de los cultivos energéticos tanto en capacidad como en coste. Así, la producción de aceite de palma es mayor de 40 millones de toneladas al año a un precio de 0.5 €/kg. En este sentido, el coste de producción de biodiesel a partir de microalgas es aun superior y lo que es mas importante no existen instalaciones a gran escala que permitan conocer con precisión dicho coste; la mayoría de los datos disponibles proceden de extrapolaciones obtenidas de datos de laboratorio o escala piloto. Así, actualmente el costo de producción de microalgas para una producción de 100 toneladas/año se estima en 3000 \$/tonelada, pero este precio se reduce notable cuando la escala se incrementa (Chisti 2007). Para una producción de 200 toneladas/año y utilizando gases de combustión como fuente de dióxido de carbón y agua residual como fuente de nutrientes, el costo de producción se reduce a 1800 \$/tonelada (Acién, *et al.* 2012). De estos datos se concluye que el precio de producción de biomasa de microalgas se debe reducir aún al menos en un orden de magnitud para lo cual es necesario mejorar las tecnologías actualmente utilizadas, incluyendo las cepas utilizadas y los tipos de fotobiorreactores, así como los procedimientos de cosechado y procesado de la biomasa para su trans-

formación en biocombustibles. Los avances recientes en estas áreas permiten ser optimistas en cuanto a la viabilidad comercial de este tipo de procesos en los próximos 10 a 15 años (Wijffels and Barbosa 2010).

En este trabajo se presenta un análisis global de la producción de microalgas para la producción de biocombustibles con microalgas, en el que se analiza la capacidad máxima de producción que cabe esperar en función de la disponibilidad de energía solar y capacidad de las microalgas de transformar dicha energía en biomasa y ácidos grasos. Además se analizan los fenómenos que tiene lugar en los sistemas de producción de microalgas, identificando aquellos que limitan actualmente dicha producción. Finalmente se hace un análisis de costos del proceso, identificando aquellos que en

mayor medida gravan dicha producción como susceptibles de ser reducidos con vistas a una producción industrial.

2. Capacidad máxima de producción de biomasa

La capacidad máxima de producción de biomasa con microalgas está determinada, entre otros factores, por la disponibilidad de radiación solar. La radiación solar disponible a nivel del suelo en una superficie horizontal es función de la localización geográfica considerada. La Figura 1 muestra el mapa de distribución de radiación solar en la superficie terrestre. Los valores más elevados corresponden a zonas templadas y cálidas del planeta con valores de radiación disponible, $H_{\text{año}}$, entre 2000 y 3000 kWh/m²·año.

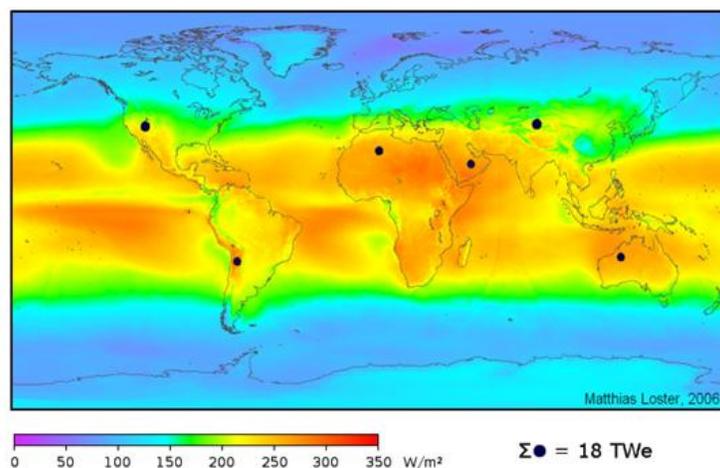


Figura 1.- Mapa de distribución de radiación solar a nivel del suelo.

Como valor medio se puede considerar una radiación solar media diaria, $H_{\text{día}}$, de 250 W/m²·día, que equivale a un valor medio de radiación disponible, $H_{\text{año}}$, de 2160 kWh/m²·año (Ec. 1). Sin embargo, existen

zonas con valores de radiación solar media diaria superiores a 300 W/m²·día, que equivalen a un valor medio de radiación disponible, $H_{\text{año}}$, de 2600 kWh/m²·año.

$$H_{\text{año}} \left[\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} \right] = H_{\text{día}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cdot 365 \left[\frac{\text{día}}{\text{año}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right] \quad \text{Ec. 1}$$

Sin embargo, toda la radiación solar disponible no puede ser totalmente asimilada ya que solo la mitad es radiación fotosintéticamente activa. De ella solo una parte llega a los cloroplastos debido a fenómenos de reflexión y absorción no útiles, por lo que solo un 25% de la energía recibida es netamente asimilable (Figura 2). De esta energía, la fotosíntesis es capaz de asimilar químicamente un 70% convirtiéndola en energía química, por lo

que de forma neta solo un 8% de la radiación solar disponible puede ser eficientemente asimilada. Si además se tiene en cuenta que se trata de organismos fotosintéticos con periodos de respiración durante la noche y consumo de energía para mantenimiento, al final se concluye que la cantidad máxima de energía que puede ser fijada como biomasa neta es de un 5% (Ec. 2) (Schenk, *et al.* 2008).

$$E_{day} \left[\frac{W}{m^2} \right] = H_{day} \left[\frac{W}{m^2} \right] \cdot Ef_1 \cdot Ef_2 \cdot Ef_3 \cdot Ef_4 \cdot Ef_5$$

Ec. 2

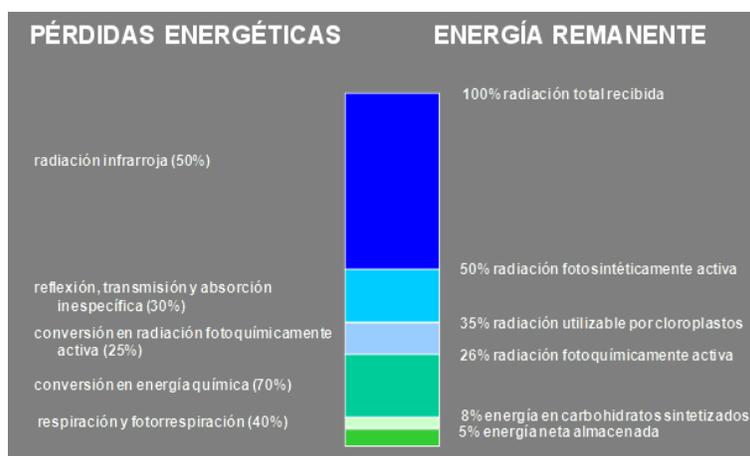


Figura 2. Pérdidas de rendimiento en la utilización de energía solar por microorganismos fotosintéticos.

Estos valores de radiación disponible y eficiencia de la fotosíntesis determinan la capacidad máxima de almacenamiento de energía, y por ende, de producción de biomasa que se pueden alcanzar. Así, 250 W/m² de radiación solar disponible equivalen a una disponibilidad de energía de 21.6 MJ/m²·día, que con una eficiencia fotosintética del 5% se traducen en una fijación neta de energía química de 1.1 MJ/m²/día. (Tabla 1).

Tabla 1. Estimación de la productividad de biomasa en función de la radiación solar disponible considerada.

Parámetros	Valor	Unidades
Radiación solar media	250	W/m ²
	2160	kWh/m ² ·año
Eficiencia fotosintética	5.00	%
Radiación solar diaria	21.60	MJ/m ² ·día
Fijación de energía	1.08	MJ/m ² ·día
Calor de combustión de la biomasa	20.00	MJ/kg
Productividad de biomasa	54.00	g/m ² ·día
	194.4	Tm/ha·año
Fijación de CO ₂	1.08	TmCO ₂ /ha·día
	388.8	TmCO ₂ /ha·año

Considerando un calor de combustión de la biomasa de 20 MJ/kg (20 kJ/g) esto supone una productividad máxima de 54 g/m²•día, o extrapolando a una hectárea, un valor de 200 Tm/ha•año. Teniendo en cuenta que cada tonelada de biomasa implica la fijación real de 2 toneladas de CO₂, esta productividad de biomasa se traduce en demandas o tasas de fijación de CO₂ de 1.1 Tm/ha•día o 390 Tm/ha•año. Así pues, la primera limitación en la capacidad de producción de microalgas es la disponibilidad de radiación solar. La selección de una ubicación con altas tasas de radiación solar disponible resulta determinante en la capacidad de producción. A esto se debe añadir el efecto de la temperatura. Cada microorganismo posee una temperatura óptima y la ubicación seleccionada debe poseer una temperatura media anual lo más parecida posible a la temperatura óptima del microorganismo, y con las mínimas variaciones tanto diarias como estacionales.

3. Tecnología de producción de biomasa

Una vez definidos los valores máximos alcanzables es necesario tener en cuenta que el lograrlos o no, así como a que coste, depende de la tecnología que se utilice. En este sentido actualmente existen varias líneas de investigación relacionadas con el diseño y operación de reactores pero en todas ellas

hay que tener en cuenta las mismas variables como son el consumo de energía, la productividad y la concentración de biomasa. La primera variable a la hora de seleccionar el reactor más adecuado es el consumo de energía. Hasta ahora los estudios realizados han reflejado el elevado consumo de energía en los sistemas de cultivo desarrollados planteándose casi en exclusiva el uso de reactores raceway como opción energéticamente positiva (Huesemann and Benemann 2009 ; Rodolfi, *et al.* 2009). En este sentido, es evidente que dicho consumo no puede ser superior a la cantidad máxima de energía que es posible fijar y que se ha cuantificado en 1.1 MJ/m²•día. Por tanto, si se establece un autoconsumo de energía como máximo igual al 20% de dicha fijación neta de energía se observa que en función del tipo de reactor, y en concreto de su relación volumen por unidad de superficie, es posible operar con varios diseños de reactores.

La Figura 3 muestra como en función del diseño de reactor considerado, es decir la relación volumen por unidad de superficie, al aumentar el consumo de energía por unidad de volumen (W/m³) el consumo de energía por unidad de superficie (W/m²) se incrementa de forma lineal, aumentando de forma más pronunciada en aquellos diseños de mayor volumen de cultivo por unidad de superficie (Ec. 3).

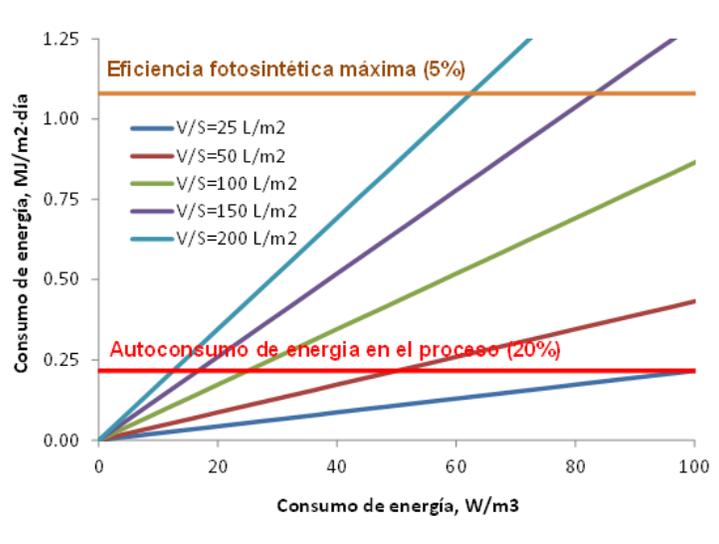


Figura 3. Variación del consumo de energía por unidad de superficie en el reactor en función de su consumo por unidad de volumen y relación V/S del mismo.

Estos resultados muestran como reactores de gran volumen por unidad de superficie, tipo raceway, deben operar con consumos de potencia inferiores a 15 W/m^3 para mantenerse por debajo del autoconsumo permitido del 20% de la fijación máxima de

energía alcanzable, mientras que en reactores de pequeño volumen por unidad de superficie este consumo de energía puede aumentar hasta más de 100 W/m^3 , manteniéndose a pesar de ello por debajo del autoconsumo permitido.

$$P/S \left[\frac{W}{m^2} \right] = P/V \left[\frac{W}{m^3} \right] \cdot V/S \left[\frac{m^3}{m^2} \right]$$

Ec. 3

La relación volumen por unidad de superficie del reactor, determina además la productividad y concentración de biomasa máxima alcanzables en el cultivo. Así, si se tiene en cuenta que la productividad máxima por unidad de superficie está fijada por la radiación solar disponible y la eficiencia de la fotosíntesis considerada, en un valor de $54 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$, la relación volumen por unidad de superficie determina la productividad volumétrica que es necesario obtener para

alcanzar dicha productividad máxima por unidad de superficie. La Figura 4 refleja como en los reactores de mayor volumen por unidad de superficie (200 L/m^2) la productividad volumétrica debe ser igual o superior a $0.27 \text{ g/L} \cdot \text{día}$ mientras que en los reactores de menor relación volumen por unidad de superficie (25 L/m^2) la productividad volumétrica debe ser igual o superior a $1.7 \text{ g/L} \cdot \text{día}$ (Ec. 4).

$$Pb_{vol} \left[\frac{g}{m^3 \cdot \text{day}} \right] = \frac{Pb_{area} \left[\frac{g}{m^2 \cdot \text{day}} \right]}{V/S \left[\frac{m^3}{m^2} \right]}$$

Ec. 4

Entre estos dos valores extremos se observa una variación hiperbólica de la productividad volumétrica de biomasa con la disminución de la relación volumen por unidad de superficie del reactor. En los reactores raceway la productividad máxima considerada como alcanzable media anual se estima en 20 g/m²·día (Borowitzka 1999),

mientras que en reactores cerrados se han referenciado productividades de hasta 47 g/m²·día (Chisti 2007), aunque se han referenciado productividades de hasta 100 g/m²·día, por encima de las teóricamente alcanzables (Pulz 2007).

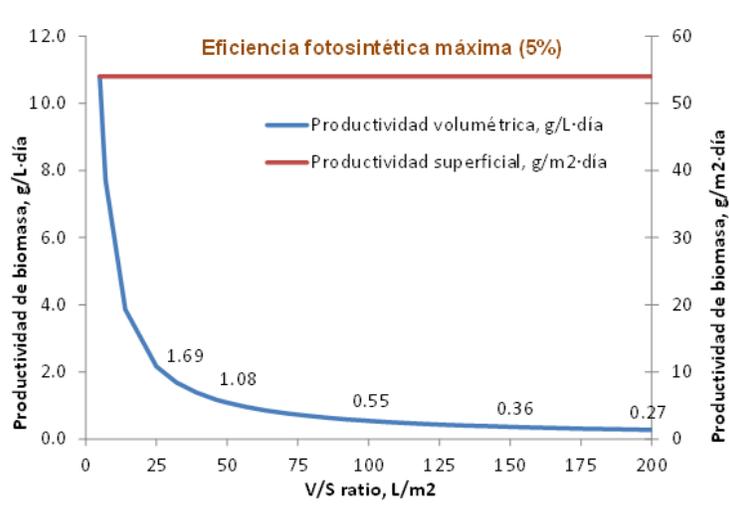


Figura 4. Variación de la productividad de biomasa por unidad de volumen alcanzable en el reactor, para obtener la productividad máxima por unidad de superficie, en función de la relación V/S del reactor.

La productividad de biomasa máxima se obtiene operando en continuo de forma estable durante todo el año, a la velocidad de dilución óptima. Aunque la velocidad de dilución óptima puede variar en función del microorganismo, condiciones de cultivo y época del año, resulta evidente que para maximizar la producción de biomasa se deben seleccionar cepas de rápido crecimiento, con velocidades específicas máximas no inferiores a 0.8 día⁻¹. Teniendo en cuenta que la velocidad de dilución óptima recomendada para la producción en continuo de cualquier microorganismo está entre el 50-70% de dicha velocidad de dilución, y considerando el valor más

conservativo del 50%, se obtiene que dicha velocidad de dilución óptima debe ser de aproximadamente 0.4 día⁻¹. A partir de este valor se puede estimar tanto la concentración de biomasa en estado estacionario (Ec. 5) como otros parámetros relevantes como son el volumen total de cultivo (Ec. 6) y el volumen de cosechado diario (Ec. 7), ambos determinantes tanto del coste de la instalación como de su consumo energético. La Figura 5 muestra como al disminuir la relación volumen por unidad de superficie la concentración de biomasa de estado estacionario aumenta, desde 0.7 g/L hasta 4.2 g/L para 200 L/m² y 25 L/m² respectivamente.

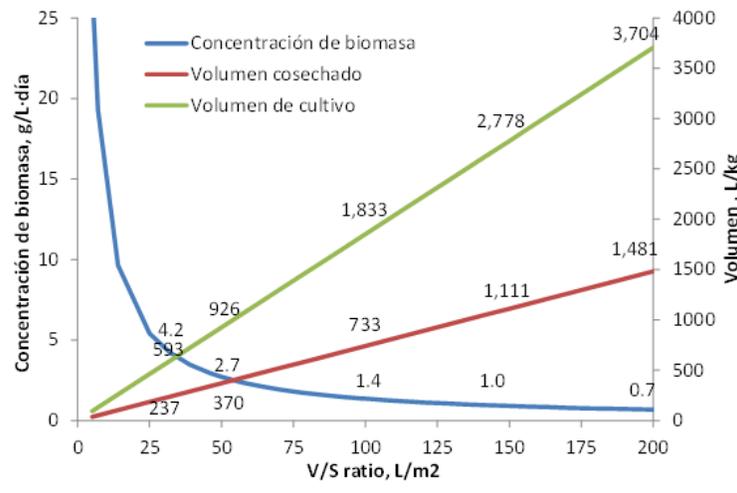


Figura 5. Variación de la concentración de biomasa, volumen de cultivo y volumen de cosechado, para alcanzar la productividad máxima establecida por unidad de superficie, en función de la relación V/S del reactor.

Por el contrario, el volumen de cultivo y de cosechado a procesar por cada kilo de biomasa producida aumentan con la relación volumen por unidad de superficie. Para el menor valor analizado, de 25 L/m², el volumen de cultivo requerido para producir 1 kg/día es de 590 L siendo necesario procesar un total de 240 L de cosechado. Para el mayor valor analizado, de 200 L/m², el volumen de cultivo requerido para producir 1 kg/día es de 3700 L siendo

necesario procesar hasta 1500 L de cosechado para producir un kilo de biomasa al día. Este mayor volumen de cultivo incide de forma directa en los costes del reactor así como de su operación, mientras que el volumen de cosechado repercute en el tamaño y coste de operación de los equipos tanto de preparación de medio de cultivo como de cosechado y concentración de la biomasa. Por tanto, ambos inciden en el coste de producción de la biomasa.

$$Cb_{vol} \left[\frac{g}{m^3} \right] = \frac{Pb_{vol} \left[\frac{g}{m^3 \cdot day} \right]}{D \left[\frac{1}{day} \right]} \quad \text{Ec. 5}$$

$$V_{culture} \left[m^3 \right] = \frac{M_{day} \left[\frac{g}{day} \right]}{Pb_{vol} \left[\frac{g}{m^3 \cdot day} \right]} \quad \text{Ec. 6}$$

$$V_{harvest} \left[\frac{m^3}{day} \right] = V_{culture} \left[m^3 \right] \cdot D \left[\frac{1}{day} \right] \quad \text{Ec. 7}$$

4. Características del microorganismo

Para poder aprovechar al máximo la radiación solar disponible es preciso utilizar microorganismos capaces de crecer adecuadamente en las condiciones de cultivo predominantes, y que muestren elevadas productividades así como composiciones bioquímicas adecuadas. El crecimiento y productividad de cualquier microorganismo se puede ajustar a un modelo hiperbólico (Molina Grima, *et al.* 1996). En dicho modelo la velocidad de crecimiento, μ , es función de la velocidad específica máxima de crecimiento, μ_{max} , la disponibilidad de luz, I_{av} , la constante de irradiancia, I_k , y el parámetro de forma, n (Ec. 8). Es evidente que cuanto mayor sea la μ_{max} del microorganismo mayor será su velocidad de crecimiento así como que la disponibilidad

de luz favorece también el crecimiento. Ya que el parámetro n es una constante de forma la única variable que se puede modificar en el microorganismo es la constante de irradiancia I_k . Para determinar la influencia de esta variable se ha simulado la productividad la productividad de biomasa del microorganismo para distintos valores de I_k , manteniendo constantes el resto de parámetros. Los resultados muestran como la reducción de I_k permite alcanzar mayores productividades de biomasa y hacerlo a mayores velocidades de dilución (Fig. 6). Esto se debe a que microorganismos con menor valor de I_k son mas eficientes en el uso de la radiación solar disponible, alcanzando mayores concentraciones de biomasa para la misma velocidad de dilución e irradiancia promedio disponible, aumentando de esta forma la productividad de biomasa.

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot I_{av}^n}{I_k^n + I_{av}^n}$$

Ec. 8

$$Pb = \mu \cdot Cb$$

Ec. 9

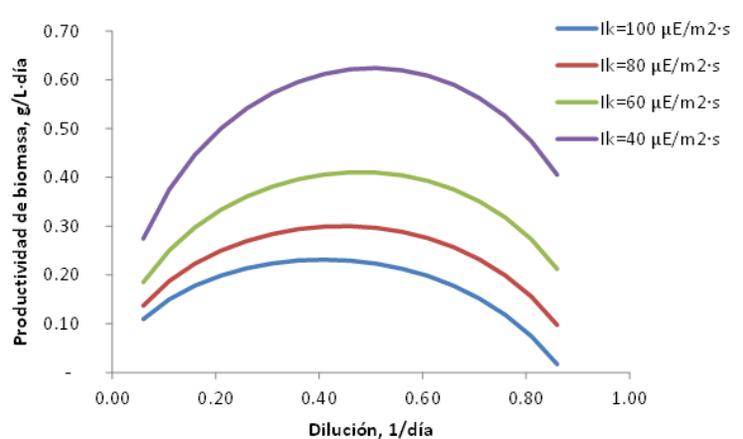


Figura 6. Influencia de la constante de irradiancia en la productividad de biomasa de microorganismos fotosintéticos.

En cuanto a la generación de producto, por ejemplo ácidos grasos, ésta viene determinada por la producción de biomasa y el contenido en ácidos grasos de la misma. Dicha productividad se puede determinar

también como el producto de la velocidad específica de acumulación de ácidos grasos, q_p , por la concentración de biomasa (Ec. 10). La velocidad específica de acumulación de ácidos grasos se expresa como la suma de dos

términos, uno correspondiente al metabolismo primario y que es proporcional a la velocidad de crecimiento, y el segundo correspondiente al metabolismo secundario y que es independiente de la velocidad de crecimiento aunque se induce solo en ausencia o limitación del crecimiento (Ec. 11) (Del Río, *et al.* 2008).

Para determinar la influencia de cada término se ha simulado la productividad de ácidos

grasos que se podrían obtener en función del valor de $Y_{p/x}$ y β . Los resultados muestran como al aumentar el valor de $Y_{p/x}$ se produce un aumento en la productividad de ácidos grasos, la cual en todos los casos aumenta con la velocidad de dilución hasta el valor óptima de la misma, por encima del cual dicha productividad disminuye (Figura 7).

$$P_{ag} = P_b \cdot X_{ag} = q_p \cdot C_b \tag{Ec. 10}$$

$$q_p = Y_{p/x} \cdot \mu + \beta \tag{Ec. 11}$$

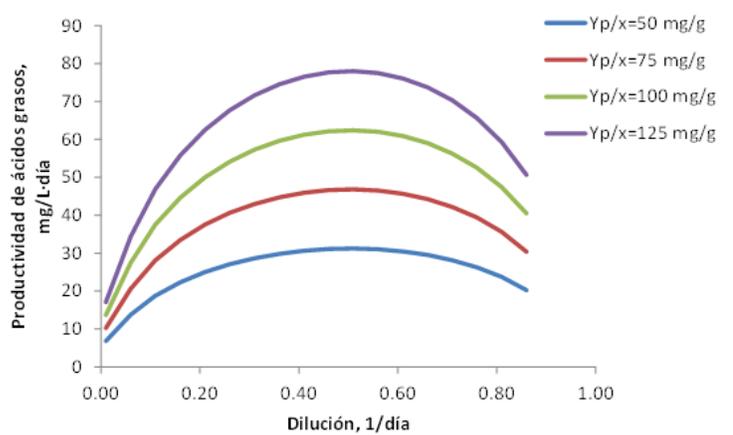


Figura 7. Influencia del coeficiente de rendimiento en producto ligado al crecimiento, $Y_{p/x}$, en la productividad de ácidos grasos de microorganismos fotosintéticos.

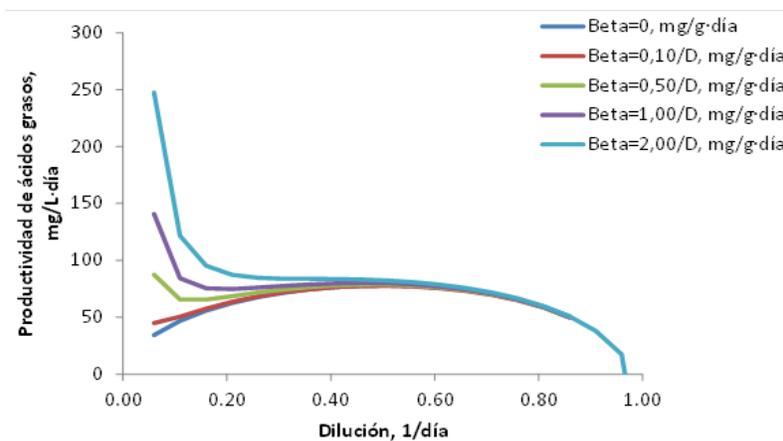


Figura 8. Influencia del coeficiente de rendimiento en producto no ligado al crecimiento, β , en la productividad de ácidos grasos de microorganismos fotosintéticos.

En cuanto al valor de Beta, aunque éste será función de muchos factores, se puede representar como debe variar para afectar significativamente a la producción de ácidos grasos. En todos los casos se ha considerado una variación inversamente proporcional a la velocidad de crecimiento. Los resultados obtenidos muestran como cuando no existe metabolismo secundario la productividad de ácidos grasos es máxima a la velocidad de dilución que optimiza la productividad de biomasa (Figura 8). Cuando existe metabolismo secundario la productividad de ácidos grasos se incrementa con respecto a la situación en ausencia del mismo, sólo a bajas velocidades de dilución, inferiores a 0,2 1/día. En estos casos el aumento observado es proporcional a la relación

existente entre Beta y 1/D, por lo que sólo en el caso de microorganismos que muestren un muy marcado efecto de acumulación de ácidos grasos en limitación o ausencia de crecimiento éste fenómeno puede contribuir significativamente a incrementar la productividad de ácidos grasos.

5. Coste de producción de biomasa

Para evaluar el coste de producción de la biomasa, utilizando las diferentes tecnologías de cultivo consideradas, se ha partido del caso de una planta de producción de microalgas en fotobiorreactores tubulares, ubicada en Almería y perteneciente a la Fundación CAJAMAR (Figura 9).



Figura 9. Imagen del sistema de cultivo utilizado para la estimación económica de costes. Planta semi-industrial de producción de microalgas en fotobiorreactores tubulares ubicada en la Estación Experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar.

En esta planta se produce biomasa de *Scenedesmus almeriensis*, una microalga dulceacuícola de elevado crecimiento y tolerancia a factores ambientales (pH y temperatura). Los parámetros de la instalación existente se muestran en la Tabla 2 donde se observa una elevada productividad pero también alto consumo energético debido al uso de bombas

centrífugas para la impulsión del cultivo, y al diseño modular de la instalación.

Para estimar el coste de producción en dicha instalación se ha utilizado la metodología de los factores de Lang partiendo del coste de los equipos principales para establecer el capital inmovilizado, así como el coste de los reactivos, servicios y mano de obra necesarios para la operación de la planta.

Tabla 2. Condiciones de operación en la instalación de producción de microalgas considerada.

Parámetro	Valor	Unidades
Relación V/S	0.08	m ³ /m ²
Dilución	0.40	l/día
Productividad de biomasa	0.66	g/l·día
Concentración de biomasa	1.65	g/l
Tiempo de operación	280	Días/años
	10	h/día
Capacidad de producción	5.50	Tn/año
Razón de aireación	0.10	v/v/min
Consumo de energía	500	W/m ³
Volumen de cultivo	30	m ³
Superficie de cultivo	397	m ²

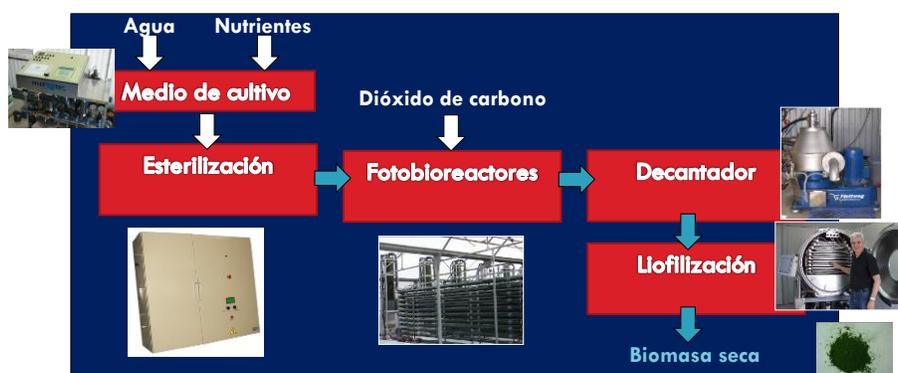


Figura 10. Diagrama de bloques del proceso de producción de biomasa considerado.

El diagrama de bloques del proceso instalado se muestra en la Figura 10. Los equipos principales considerados suponen un total de 327 k€ (Tabla 3), pero a ello hay que sumar todos los costes de instalación de los mismos, así como tuberías, electricidad,

terrenos, ingeniería, contratistas e imprevistos. Haciendo uso de los factores referenciados para procesos basados en microalgas (Molina Grima, *et al.* 2003) se obtiene un total de capital inmovilizado de 962 k€ (Tabla 4).

Tabla 3. Listado de equipos principales y su coste para la instalación de producción considerada.

Equipo	Capacidad		Coste, €/Unidad	Unidades	Coste total, €
Preparación de medio	4.0	m ³ /h	6.000	1	6.000
Esterilización de medio	2.0	m ³ /h	15.000	1	15.000
Soplante de aire	200.0	m ³ /h	2.500	1	2.500
Fotobiorreactores	3.0	m ³	15.000	10	150.000
Sedimentador	2.5	m ³ /h	4.500	0	-
Tanque cosechado	1.0	m ³	127	1	127.31
Decantador	4.0	m ³ /h	45.000	1	45.000
Bomba cosechado	2.0	m ³ /h	1.000	1	1.000
Suministro de CO2	4.0	kg/h	459	1	458.93
Liofilización	70.0	kg/día	107.124	1	107.124
Total					327.210

Tabla 4.- Estimación del coste de producción de biomasa en la instalación de producción considerada.

Concepto	Coste, €
Equipos principales	327.210
Costes instalación	65.442
Instrumentación y control	49.081
Tuberías	65.442
Electricidad	32.721
Edificios	73.622
Acondicionamiento terreno	39.265
Servicios	65.442
Terreno	19.632
Ingeniería y supervisión	98.163
Gastos construcción	36.892
Contratista	18.446
Imprevistos	71.309
Total	962.671

A partir de este valor, y considerando un periodo de amortización de 10 años se estima de forma lineal una amortización de 109 k€ al año, a los que hay que sumar los costes de consumibles, servicios y mano de obra. Estos costes suman un total de 147 k€, por lo que en total los costes de producción ascienden a 256 k€ al año (Tabla 5). Dividiendo estos costes entre la capacidad

de producción se obtiene el coste unitario por kilogramo de biomasa, siendo este de aproximadamente 47€/kg (Tabla 5). Estos valores estimados corresponden con los valores reales determinados durante la operación de dicha planta, lo que verifica la bondad de la metodología de estimación de costes utilizada.

Tabla 5.- Estimación del coste de producción de biomasa en la instalación de producción considerada.

Amortización	Unidades	Coste, €/unidad	Coste, €
Tiempo de vida	10		
Amortización			92,340
Impuestos propiedad			923
Seguros			554
Impuesto compras			15,402
Total			109,220
Costes de producción	Unidades	Coste, €/unidad	Coste, €
Medio de cultivo	3,333	0.40	1,333
Dióxido de carbono	13,750	0.40	5,500
Agua	333	0.10	33
Energía eléctrica	100,667	0.08	8,053
Mano de obra	3	30,000	90,000
Supervisión		18,000	3.600
Impuestos de trabajo		23,400	5,850
Mantenimiento		13,088	523
Suministros		2,159	8

Gastos generales	51,767	28,472
Impuestos	85	13
Imprevistos	26,994	1,349
Marketing	48,133	2,407
Total materias primas		6,833
Total servicios		8,086
Total mano de obra		132,224
Coste unitario, €/kg		46.61

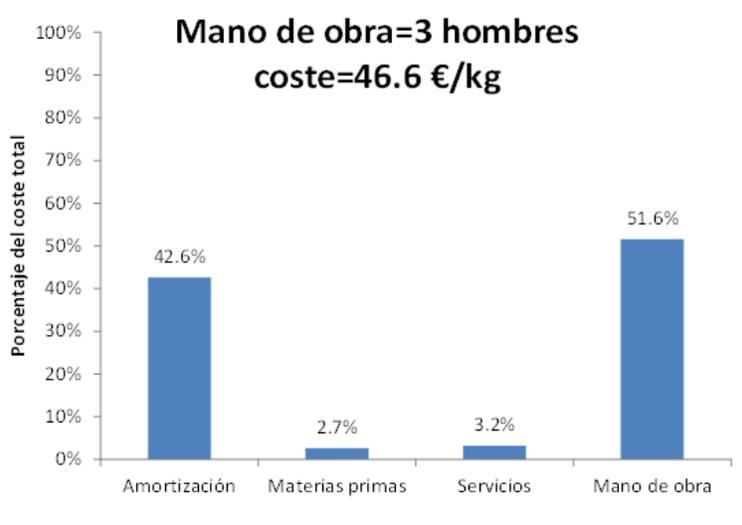


Figura 11. Distribución de costes estimada considerando 3 hombres-mes de personal.

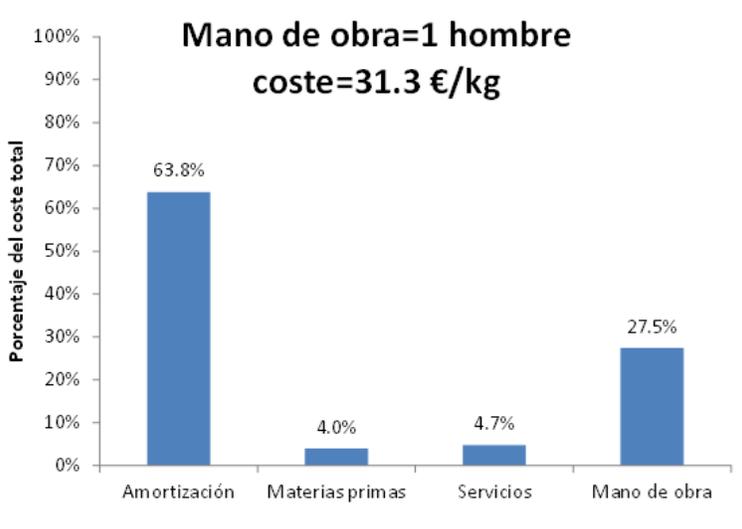


Figura 12.- Distribución de costes estimada considerando 1 hombre-mes de personal.

Sin embargo, lo más interesante de este cálculo no es el valor final obtenido en sí, sino la propia metodología de determinación usada, que permite identificar cuáles son los factores que más contribuyen al coste y por tanto los que primero deben ser reducidos, así como que se trata de una metodología aplicable a cualquier otro escenario por lo que puede ser utilizada para estimar el coste de producción en diferentes sistemas de cultivo o condiciones. En cuanto a la identificación de los factores de coste más importantes la Figura 11 muestra como la mano de obra y la amortización del capital inmovilizado son las partidas de gasto más importantes, y por tanto las primeras que deben ser reducidas.

La reducción de la mano de obra no puede hacerse si no es a través de una automatización y simplificación de la instalación. En condiciones de producción la mano de obra suficiente para operar dicha planta es de 1 persona, por lo que el coste de producción se reduce a 31.3 €/kg pasando a ser la partida mayoritaria la correspondiente a la amortización del capital inmovilizado (Figura 12).

Para reducir la partida de capital inmovilizado se analiza el coste de los diferentes equipos observándose como los fotobiorreactores, el liofilizador y la centrifugación son los que mayoritariamente afectan a este coste (Figura 13).

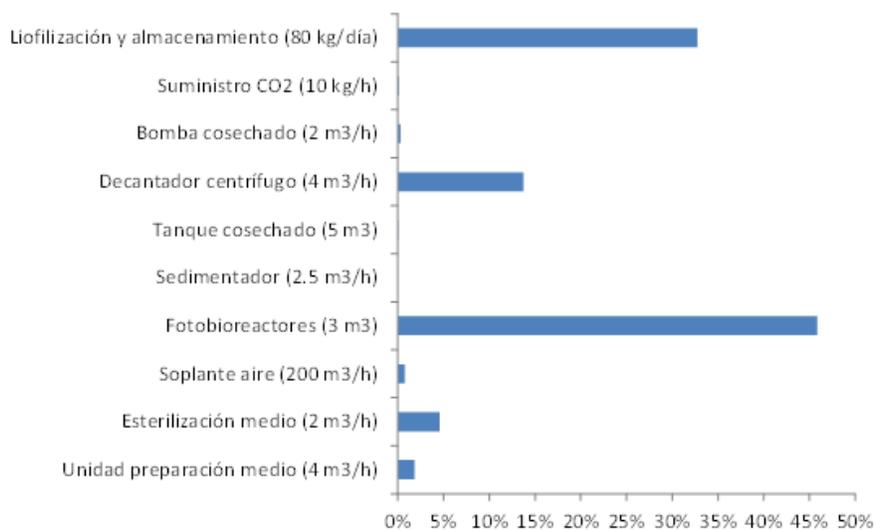


Figura 13. Contribución de los diferentes equipos al coste de capital inmovilizado.

La etapa de liofilización se puede eliminar considerando como producto final obtener un lodo con un 20% en peso de biomasa, que es el valor máximo alcanzable con centrifugas continuas comerciales. La etapa de centrifugación se debe minimizar incorporando una etapa previa de floculación decantación que permita pasar de la concentración de cultivo a un valor de alrededor del 1% en peso de biomasa, que es el valor de referencia para los sedimentadores comerciales. De esta forma,

el diagrama de bloques representativo del sistema se muestra en la Figura 14. Para reducir el coste de los fotobiorreactores y resto de equipos se puede considerar el aumento de escala que repercute en una reducción general. Para determinar el coste de los equipos principales al aumentar de escala se ha considerado un factor exponente de 0.85, considerándose un aumento máximo de escala igual a 10 veces el considerado inicialmente, aumentándose a partir de aquí el número de unidades necesarias (Ec. 12).

Considerando una producción de 200 Tn/año y aplicando estas modificaciones se obtiene un coste de producción de 10.1 €/kg, el 75% del cual corresponde a la amortización necesaria por el elevado coste de los fotobiorreactores que representan el 80% del coste de los equipos principales (Figura 15). Evidentemente la mejor forma de reducir el coste de producción es por tanto minimizar el coste de reactor, pero para hacerlo es preciso conocer en primer lugar que variable afecta más al coste total de producción: (i) la

productividad volumétrica o (ii) la cantidad de cultivo por unidad de volumen. Así, la Figura 16 muestra como el aumento de la productividad volumétrica disminuye notablemente el coste unitario de producción así como la superficie necesaria. El aumento de la productividad en un 50%, de 0.6 a 0.9 g/L•día reduce la superficie necesaria en un 33% y el coste de producción en un 30%.

$$Cost_{large} = Cost_{small} \left(\frac{Capacity_{large}}{Capacity_{small}} \right)^{0.85}$$

Ec. 12

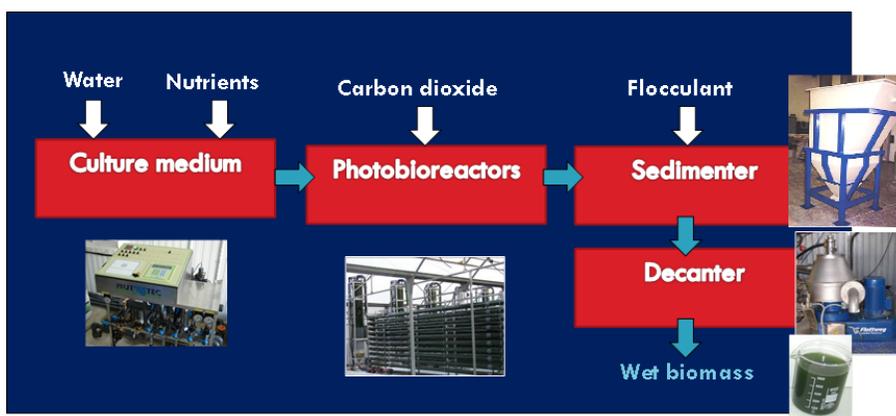


Figura 14. Diagrama de bloques del proceso propuesto de obtención de biomasa húmeda.

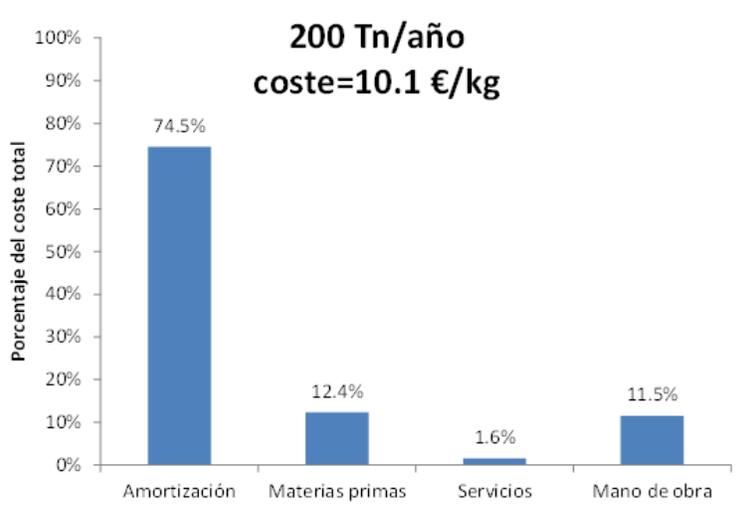


Figura 15. Distribución de costes estimada para un aumento de escala a 200 Tn/año.

Por el contrario, el aumento de la razón V/S influye muy poco en el coste unitario de producción a pesar de que también reduce la superficie de cultivo necesaria y que para este cálculo se ha mantenido constante el coste total de los fotobiorreactores para que el cálculo no se viera afectado por el mayor volumen de cultivo necesario (Figura 17).

Así, un aumento del 70% en la relación V/S si reduce la superficie de cultivo necesaria en un 42% pero el coste de producción en sólo el 4%. Por tanto el rediseño de reactor debe hacerse principalmente incrementando su productividad volumétrica más que el volumen de cultivo por unidad de superficie, y por supuesto reduciendo su coste.

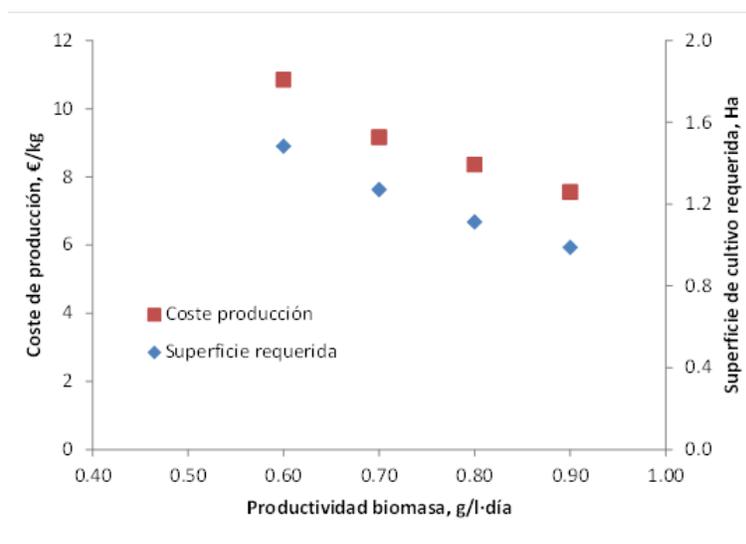


Figura 16.- Influencia de la productividad de biomasa en el coste de producción de la misma y superficie requerida.

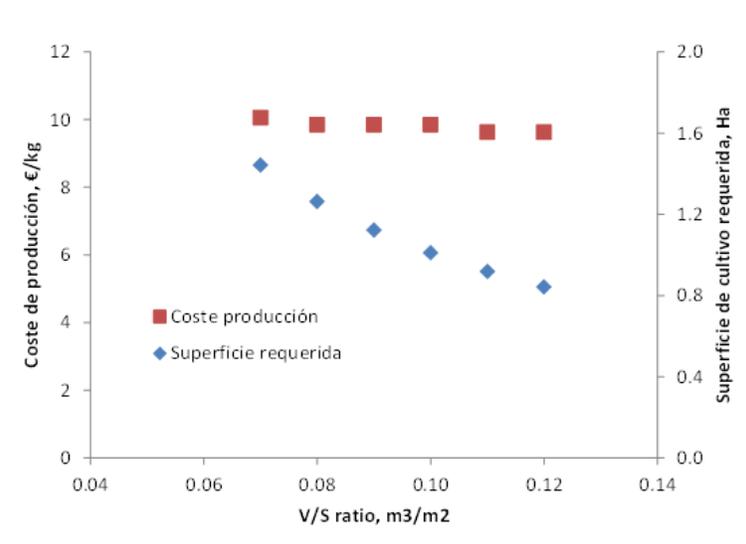


Figura 17.- Influencia de la relación V/S en el coste de producción de la biomasa y superficie requerida.

6. Conclusiones

Del balance de energía a la producción de microalgas y radiación solar disponible se puede concluir que la productividad máxima alcanzable por este tipo de cultivos es de 194 Ton/ha·año en climas templados aunque los valores más altos referenciados han sido de 130 Ton/ha·año y sólo han sido demostrados a pequeña escala. Por tanto existe margen de mejora en la tecnología de producción para poder aproximarse a los valores máximos alcanzables. Sin embargo, el mayor problema para conseguir una producción rentable de biocombustibles a partir de microalgas es el elevado coste de producción de la biomasa. El análisis económico realizado permite determinar los costes de producción pero sobre todo los factores que mas afectan al mismo y por tanto los que deben ser optimizados en primer lugar. De este análisis se concluye que los costos son función de la productividad volumétrica y por tanto ésta debe ser maximizada en cualquier mejora del proceso. Para ello, el uso de reactores con relación V/S puede ser una alternativa válida al empleo de reactores raceway de elevada relación V/S que son actualmente los más empleados para el objetivo de producir biocombustibles a partir de microalgas.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo del proyecto EnerBioAlgae (SOE2/P2/E374) SUDOE INTERREG IVB, así como la financiación del PlanE financiado por el CDTI en colaboración con ACCIONA S.A., y Junta de Andalucía (Plan Andaluz de Investigación, BIO 173). Especial agradecimiento a la Fundación Cajamar.

8. Referencias

- Acién FG, Fernández JM, Magán JJ, Molina E. 2012. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnol Adv*, In press. doi:10.1016/j.biotechadv.2012.02.005
- Benemann JR. 1997. CO₂ mitigation with microalgae systems. *Energy Convers Manage* 38:S475-S479.
- Borowitzka MA. 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *J Biotechnol* 70:313-321.
- Chisti Y. 2008. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol* 26:126-131.
- Chisti Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv* 25:294-306.
- Del Río E, Acién FG, García-Malea MC, Rivas J, Molina-Grima E, Guerrero MG. 2008. Efficiency assessment of the one-step production of astaxanthin by the microalga *Haematococcus pluvialis*. *Biotechnol Bioeng* 100:397-402.
- Huesemann M, Benemann JR. 2009. Biofuels from microalgae: Review of products, process and potential, with special focus on *Dunaliella* sp. In: Ben-Amotz A, et al., editors. *The alga Dunaliella: Biodiversity, Physiology, Genomics and Biotechnology*. New Hampshire: Science Publishers.
- Hughes E, Benemann JR. 1997. Biological fossil CO₂ mitigation. *Energ Convers Manage* 38:S467-S473.
- Molina Grima E, Belarbi E-, Acién Fernández FG, Robles Medina A, Chisti Y. 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. *Biotechnol Adv* 20:491-515.
- Molina Grima E, Fernández Sevilla JM, Sánchez Pérez JA, García Camacho F. 1996. A study on simultaneous photolimitation and photoinhibition in dense microalgal cultures taking into account incident and averaged irradiances. *J Biotechnol* 45:59-69.

- Muñoz R, Jacinto M, Guieysse B, Mattiasson B. 2005. Combined carbon and nitrogen removal from acetonitrile using algal-bacterial bioreactors. *Appl Microbiol Biotechnol* 67:699-707.
- Olguín EJ. 2003. Phycoremediation: Key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnol Adv* 22:81-91.
- Olguín E.J. 2012. Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. *Biotechnol Adv*. In press. doi:10.1016/j.biotechadv.2012.05.001
- Oswald WJ, Golueke CG. 1960. Biological transformation of solar energy. *Adv Appl Microbiol* 2:223-262.
- Pulz O. 2007. Performance Summary Report: Evaluation of GreenFuel's 3D Matrix Algae Growth Engineering Scale Unit.
- Pulz O, Gross W. 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol* 65:635-648.
- Rodolfi L, Zittelli GC, Bassi N, Padovani G, Biondi N, Bonini G, Tredici MR. 2009. Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnol Bioeng* 102:100-112.
- Romero García JM, Acién Fernández FG, Fernández Sevilla JM. 2012. Development of a process for the production of l-amino-acids concentrates from microalgae by enzymatic hydrolysis. *Bioresour Technol* 112:164-170.
- Schenk PM, Thomas-hall SR, Stephens E, Marx UC, Mussgnug JH, Posten C, Kruse O, Hankamer B. 2008. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Res* 1:20-43.
- Wijffels RH, Barbosa MJ. 2010. An outlook on microalgal biofuels. *Science* 329:796-799.