



CONTRIBUCIÓN DE LAS MICROALGAS AL DESARROLLO DE LA BIOECONOMÍA

Francisco Gabriel Acién Fernández, José María Fernández Sevilla y Emilio Molina Grima
Universidad de Almería

Resumen

Las microalgas fueron la base de la vida en el planeta, y han sido utilizadas durante siglos como fuente de alimento en sistemas artesanales. Sin embargo, solo recientemente se han desarrollado procesos industriales para su producción. Ello se ha debido a una mejora en el conocimiento de estos microorganismos, los factores que determinan su crecimiento, así como de los fotobiorreactores necesarios para su producción. Las principales aplicaciones de las microalgas se relacionan con el consumo humano directo, pero en los últimos años han surgido un amplio abanico de nuevas aplicaciones relacionadas con la mejora de la sostenibilidad de algunos procesos como la producción agrícola y ganadera, el tratamiento de aguas residuales e incluso la producción de biocombustibles. De esta manera la utilización de microalgas a gran escala se considera una contribución a la revolución verde en la sostenibilidad de la humanidad. En este capítulo se analizan las principales aplicaciones de las microalgas y como estos microorganismos pueden contribuir al desarrollo de la bioeconomía, a la mejora de la sostenibilidad de las actividades económicas. Se repasan las últimas mejoras de tecnologías y aplicaciones, además de los obstáculos todavía existentes para la explotación industrial de estos microorganismos.

Abstract

Microalgae were the basis of life on the planet, and for centuries have been used as a food source in artisanal systems. However, only recently have industrial processes been developed to produce them. This is possible thanks to improved knowledge of these microorganisms, the factors that determine their growth, and the photobioreactors necessary for their production. The main applications of microalgae are related to direct human consumption, but recent years have seen the emergence of a wide range of new applications related to improving the sustainability of certain processes, such as agricultural and livestock production, waste water treatment, and even biofuel production. The large-scale use of microalgae is therefore considered to contribute to the green revolution for the sustainability of humankind. This chapter analyses the principal applications of microalgae and how these microorganisms can contribute to developing the bioeconomy, improving the sustainability of economic activities. The latest improvements in technology and applications are reviewed, as are the remaining obstacles in the industrial exploitation of these microorganisms.

1. Introducción

Las microalgas y cianobacterias son aquellos microorganismos capaces de realizar la fotosíntesis oxigénica. Aunque hay más de 30.000 especies catalogadas, a día de hoy solo se han estudiado menos de 100, y no más de 10 se encuentran actualmente en explotación comercial (Spolaore *et al.*, 2006). Estos microorganismos fueron los responsables de las mayores transformaciones en el planeta, como la producción de la mayor parte del oxígeno de la atmósfera, además de la oxidación de Fe^{2+} y $S^{=}$, lo que permitió la posterior explosión de vida en el planeta (Lodeyro *et al.*, 2012). Además, estos microorganismos fueron en el pasado los responsables

de la reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera, transformándolo en rocas calcáreas y diatomeas, además de ser el origen de la mayor parte de los combustibles fósiles que hoy utilizamos. Actualmente, las microalgas y cianobacterias son los mayores responsables de la producción de oxígeno y captura de energía del sol en todo el planeta, siendo la base de la cadena trófica en los sistemas acuáticos. Además, las microalgas y cianobacterias son los principales responsables de la transformación de CO₂ en biomasa en el planeta, contribuyendo de esta forma a reducir el efecto del calentamiento global (Benemann, 2003). Así pues, estos microorganismos son un pilar fundamental en la sostenibilidad de la vida en el planeta.

La contribución de las microalgas a la bioeconomía se relaciona con la potencialidad que poseen estos microorganismos para mejorar la sostenibilidad de diversos procesos, y por ende para hacer un uso más racional de los recursos que permita un aumento de la sostenibilidad de la actividad humana y sus actividades económicas relacionadas. Esta potencialidad se basa en la diversidad de especies y ambientes en que estos microorganismos pueden desarrollarse, así como del amplio abanico de productos y servicios que a partir de ellas se pueden obtener. Las microalgas son capaces de crecer en muy diferentes ambientes, desde zonas cálidas en los trópicos y desiertos, hasta zonas frías en los polos y altas montañas. Algunas de las principales ventajas de estos microorganismos son que no requieren tierras fértiles o agua utilizable en agricultura, creciendo incluso en aguas contaminadas, además de que hacen un uso más eficiente de la energía solar que cualquier otro organismo en el planeta. Es por ello por lo que estos microorganismos se han estado utilizando durante siglos de forma artesanal. Así, la cianobacteria *Spirulina* ha sido utilizada en la zona de lago Texcoco en México, al igual que en los alrededores del lago Chad en África, donde crece de forma natural y ha constituido la base de la alimentación de diversas culturas por siglos (Abdulqader *et al.*, 2000). Otras cianobacterias se han utilizado y continúan hoy en día siendo utilizadas también en la agricultura, para fijar el nitrógeno atmosférico y aumentar así la fertilidad del suelo en la producción de arroz entre otros cultivos. La aplicación más relevante de las microalgas, y que generalmente se olvida, es la producción de alimento primario en los sistemas acuáticos utilizados en acuicultura, donde millones toneladas de peces y moluscos se producen sobre la base del fitoplancton que se genera de forma natural en aguas continentales y océanos (Muller-Feuga, 2013).

La elevada potencialidad de estos microorganismos ha dado lugar al desarrollo de diferentes procesos industriales. Dichos procesos se fundamentan en que las microalgas, además de tener una alta capacidad de producción, producen una biomasa de elevado interés por su composición, con proteínas ricas en aminoácidos esenciales y lípidos de alto valor ricos en ácidos grasos polinsaturados. Los primeros trabajos sobre la producción de microalgas fueron publicados en 1950 empleando fotobiorreactores tubulares para la producción de *Chlorella* en reactores de 50 l. Más tarde se desarrolló la producción de microalgas en reactores abiertos tipo *raceway*, incluso acoplada al tratamiento de aguas residuales. Los reactores *raceway* se han aplicado desde los años 70 y 80 para producir *Spirulina* como alimento a escala comercial, además de *Dunaliella* como fuente de β-caroteno, entre otras. Aún hoy, estas son las especies y reactores más extendidos en todo el mundo, estimándose una producción mundial de biomasa de microalgas de alrededor de 20.000 t/año. Esta capacidad de producción es reducida

en comparación con otras biomásas o cultivos, pero aumenta más del 10 % anualmente (Benemann, 2013). Así, en los últimos veinte años se han incorporado otras cepas de microalgas a la producción comercial como *Haematococcus*, *Euglena*, y *Nannochloropsis* entre otras, para diversas aplicaciones relacionadas con la alimentación, cosmética y farmacia entre otras. Sin embargo, donde las microalgas han despertado mayor interés es en sus aplicaciones para la mejora de la sostenibilidad de la producción de alimentos por la agricultura y acuicultura (Muller-Feuga, 2000; Tilman *et al.*, 2011), así como en sus aplicaciones medioambientales, relacionadas con la captura de CO₂ de gases industriales, la producción de biocombustibles o el tratamiento de aguas contaminadas, ya sean aguas urbanas, ganaderas o industriales (Ación *et al.*, 2012; Ación *et al.*, 2016).

En este capítulo se resumen los principales factores que influyen en la producción de microalgas y las tecnologías que se utilizan a escala comercial en estos procesos. Así mismo, se analizan las tendencias futuras y como las microalgas contribuirán a la mejora de la sostenibilidad de algunos procesos para mostrar la importancia de esta «revolución verde».

2. Factores que influyen en la producción de microalgas

Las microalgas son fotosintéticamente equivalentes a las plantas pero con algunas diferencias: (i) son microscópicas ya que su tamaño varía entre 2 a 20 µm y generalmente se producen suspendidas en agua por lo que no requieren de suelos fértiles; (ii) su crecimiento es mucho más rápido que las plantas superiores con tiempos de duplicación inferior a 1 día; (iii) no tienen raíces o estructuras de gran tamaño y ende su eficiencia fotosintética es mucho mayor que las plantas superiores, aunque por ello también (iv) requieren el suministro de grandes cantidades de nutrientes, principalmente CO₂, N y P para maximizar su productividad. Sobre la base de estas diferencias se han desarrollado distintos sistemas de producción de microalgas que intentan satisfacer las necesidades de estos microorganismos y alcanzar su capacidad máxima de producción a un menor coste.

2.1. Disponibilidad de luz

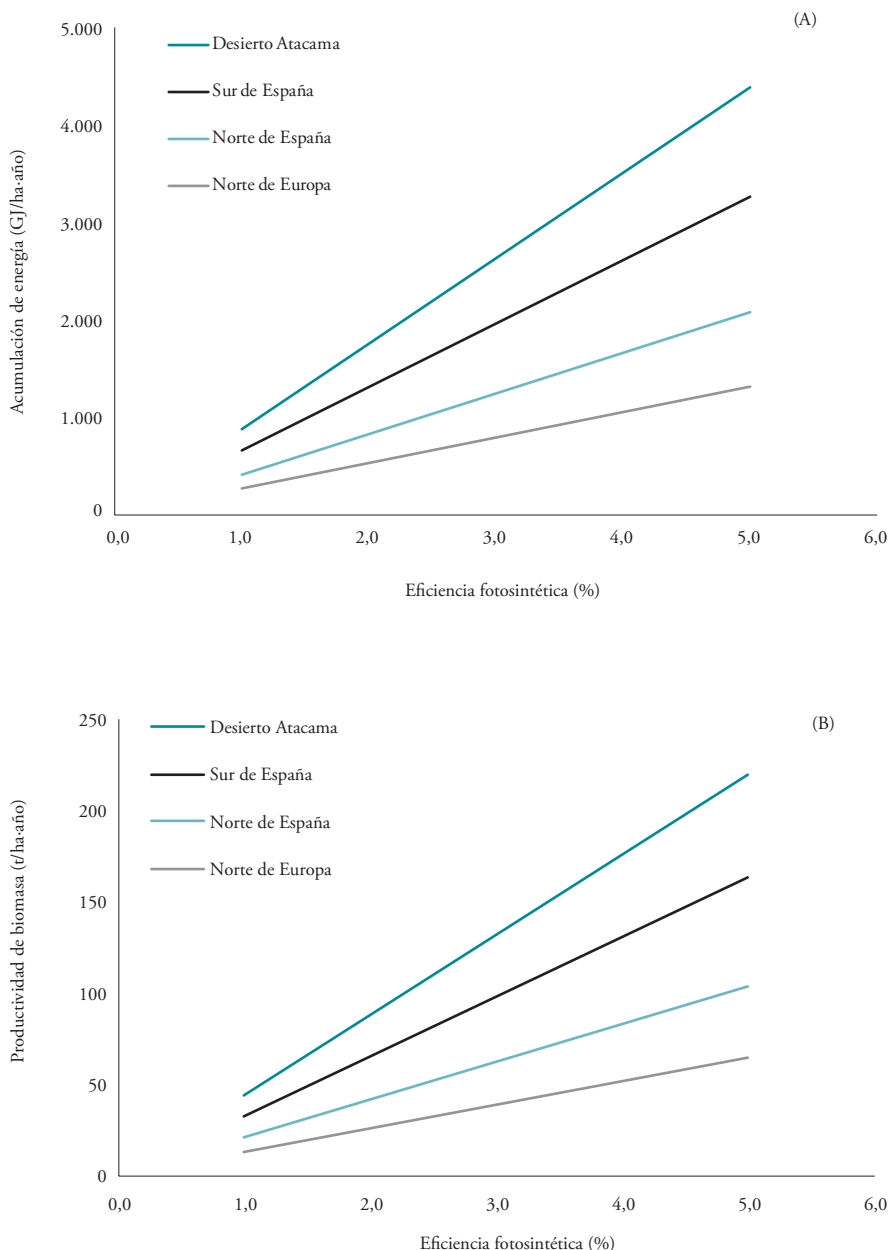
Las microalgas se producen en fotobiorreactores, que no son más que biorreactores expuestos a la luz solar de forma que esta penetra en su interior y constituye la fuente de energía para la producción de biomasa o productos. En este sentido, el principal factor que determina la producción de microalgas es la luz. De todo el espectro solar, el aparato fotosintético utiliza exclusivamente la radiación en longitudes de onda de 400 a 700 nm (radiación fotosintéticamente activa, PAR de sus siglas en inglés), y se satura cuando la radiación es superior a 100-200 µE/m²·s. Debido a que la radiación solar alcanza valores más de diez veces superiores a este valor de saturación, de hasta 3.000 µE/m²·s, el aparato fotosintético de las microalgas

puede estar sobresaturado o incluso llegar a fotoinhibirse cuando se expone a la radiación solar directa. Para solucionar este problema y mejorar el rendimiento de los cultivos de microalgas en condiciones externas, la radiación solar debe ser «distribuida» entre el mayor número de células o de superficie como sea posible. Así, se han propuesto diferentes diseños de fotobiorreactores que intentan aumentar la superficie iluminada por unidad de superficie de terreno o unidad de volumen de cultivo.

Para cualquier diseño de fotobiorreactor, la luz que incide en la superficie del reactor se atenúa a lo largo del cultivo en función de la profundidad del cultivo, la concentración de biomasa y coeficiente de extinción de la misma. Esta atenuación hace que existan gradientes de luz, es decir las células están expuestas a diferentes condiciones de luz según su posición en el reactor la cual viene determinada además por la mezcla en el mismo. Para maximizar la irradiancia a la que las células de microalgas son expuestas en un cultivo sería recomendable utilizar reactores de poca profundidad con bajas concentraciones de biomasa, pero en estas condiciones la capacidad de producción sería muy baja por haber pocas células, mientras que si la profundidad del cultivo es muy elevada y hay una alta concentración de biomasa habría muy poca luz por célula y por ello también una muy baja productividad, por lo que es necesario encontrar una solución óptima. De esta forma el reto es optimizar el diseño del fotobiorreactor maximizando la captación de luz en su superficie, al tiempo que se optimiza la profundidad del cultivo para mantener la concentración de biomasa en valores óptimos.

En términos globales se puede resumir que, de toda la radiación solar que llega a nivel del suelo, el aparato fotosintético solo puede aprovechar una parte, habiéndose demostrado que las microalgas pueden lograr una eficiencia máxima fotosintética (PE) del 5 % de la radiación global. La radiación solar disponible es función de la localización geográfica considerada, y puede variar desde los valores más altos de 7,4 kWh/m² en el desierto de Atacama (Chile) hasta valores mínimos de 2,2 kWh/m² en el Norte de Europa, mientras que en España la radiación solar disponible varía de 3,5 kWh/m² a 5,5 kWh/m² entre el norte y sur. Esto significa que las microalgas son capaces de acumular hasta 5.000 GW/ha·año si se diseñan y operan sistemas eficientes capaces de alcanzar el 5 % PE, mientras que este valor se reduce a 400 GW/ha·año si se considera el 1 % PE, variando dichos valores en función de la disponibilidad de radiación solar en función de la localización seleccionada (Gráfico 1A). Teniendo en cuenta el calor de combustión de la biomasa de microalgas, de 20 MJ/kg, esto significa que la cantidad de biomasa que se puede producir por unidad de área anualmente está limitada por la disponibilidad de radiación solar en la ubicación seleccionada y la eficiencia fotosintética lograda en el sistema de producción utilizado. El Gráfico 1B muestra como los sistemas de microalgas pueden llegar a valores de productividad de hasta 250 t/ha·año si se logra un 5 % PE en zonas con alta disponibilidad de radiación solar, mientras que dicha productividad desciende a 20 t/ha·año en zonas con baja radiación solar si se alcanza solo el 1 % PE. En España los valores de productividad pueden variar entre 20 y 160 t/ha·año.

Gráfico 1. Variación de la acumulación de energía (A) y de la producción de biomasa de los cultivos de microalgas (B) en función de la localización geográfica que determina la disponibilidad de radiación solar y la eficiencia fotosintética alcanzada en el sistema de producción



En todo caso estos valores son muy superiores a los alcanzados en cultivos más tradicionales como maíz (12 t/ha-año), trigo (8 t/ha-año) o soja (6 t/ha-año) mostrando así que biomasa de microalgas es una alternativa realista a este tipo de cultivos. Esta gran capacidad de producción por unidad de superficie es uno de los motivos por los que estos microorganismos han sido considerados una alternativa real a cultivos energéticos convencionales para la producción de

biocombustibles (Chisti, 2007). Estos datos confirman que, si bien la disponibilidad de radiación solar es un factor importante en la producción de biomasa de microalgas, la optimización del sistema de producción utilizado y la eficiencia fotosintética final alcanzada son también muy relevantes en la capacidad de producción final de biomasa.

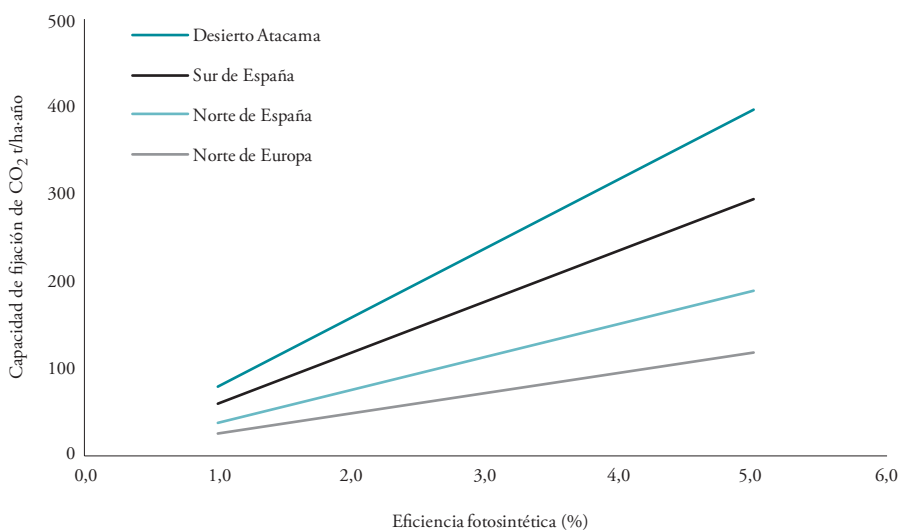
2.2. Requerimiento de nutrientes

La biomasa de microalgas se compone principalmente de carbono (45 %), nitrógeno (7 %) y fósforo (1 %), además de oxígeno e hidrógeno que se obtienen directamente del agua. Tanto carbono, como nitrógeno y fósforo, deben ser aportados externamente, siendo la cantidad necesaria de estos nutrientes directamente proporcional a la capacidad de producción de biomasa necesaria. El carbono puede suministrarse como carbonato o bicarbonato, pero se recomienda la utilización de CO₂ ya ello que permite al mismo tiempo controlar el pH de los cultivos y contribuir a la secuestación de CO₂ atmosférico. Se requieren hasta 1,8 kg de CO₂ para producir 1,0 kg de biomasa de microalgas, aunque este valor puede cambiar según la composición de la biomasa producida. El Gráfico 2 muestra como la capacidad de fijación de CO₂ de los cultivos de microalgas es una función directa de la disponibilidad de radiación solar, determinada por la localización geográfica seleccionada, y la eficiencia fotosintética en el sistema de producción. Se pueden alcanzar capacidades de fijación de CO₂ entre 80 y 400 tCO₂/ha·año, para eficiencias fotosintéticas del 1 al 5 % respectivamente, en zonas con alta irradiancia como el desierto de Atacama, mientras que para zonas con baja disponibilidad de radiación solar como el Norte de Europa estos valores se reducen hasta 20 hasta 120 tCO₂/ha·año en el mismo rango de eficiencia fotosintética. En España los valores de capacidad de fijación de CO₂ pueden variar entre 30 y 300 tCO₂/ha·año según la localización y eficiencia fotosintética alcanzada. Como fuente de carbono puede utilizarse CO₂ puro, pero además se puede usar cualquier gas industrial que contenga CO₂, por lo que se ha propuesto utilizar gases de combustión de centrales eléctricas, biogás procedente de la digestión anaerobia de residuos, o incluso gas de fermentación procedente de la producción de etanol, lo que permitiría producir la biomasa de microalgas al mismo tiempo que reducir las emisiones de CO₂ de estas industrias (Acien *et al.*, 2012). Sea cual sea la fuente de CO₂ utilizada se deben considerar dos aspectos importantes: (i) se deben emplear sistemas eficientes que sean capaces de transferir más del 90 % del CO₂ contenido en el gas utilizado al cultivo de microalgas; y (ii) es necesario asegurarse previamente que el gas no contiene sustancias tóxicas que pueden dañar el crecimiento de las microalgas (SO_x, NO_x) (Duarte-Santos *et al.*, 2016).

Relacionado con el suministro de CO₂ se encuentra la eliminación del oxígeno producido por la fotosíntesis, ya que ambos compuestos se consumen y generan en la misma proporción, pero en el caso del oxígeno si no se elimina se acumula en el sistema provocando efectos adversos. La mayoría de las microalgas se inhiben por oxígeno cuando la concentración de oxígeno disuelto es superior a 20 mg/l, por lo que resulta imprescindible instalar sistemas adecuados de eliminación de oxígeno para evitar estos fenómenos (Mendoza *et al.*, 2013). En general la

optimización de la capacidad de transferencia de materia es un factor clave en cualquier sistema de producción de microalgas (de Godos *et al.*, 2014b).

Gráfico 2. Variación de la capacidad de fijación de CO₂ con la disponibilidad de radiación solar en función de la eficiencia fotosintética alcanzada en el sistema de producción para diferentes ubicaciones geográficas



Después del carbono, el nitrógeno y fósforo son los dos nutrientes más importantes para la producción de microalgas. Se necesitan alrededor de 0,1 kg de N y 0,01 kg de P para producir 1 kg de biomasa de microalgas. En función de la capacidad de producción de biomasa se puede estimar la capacidad de fijación tanto de nitrógeno como de fósforo por las microalgas de forma análoga a la fijación de CO₂. La fijación de N varía de 1,5 a 7,0 tN/ha·año en zonas con baja disponibilidad de radiación solar como el Norte de Europa, y de 4,5 a 25,0 tN/ha·año en zonas con alta disponibilidad de radiación solar como el desierto de Atacama, cuando modifica la eficiencia fotosintética del 1 al 5 %. En España la capacidad de fijación de N varía entre 2,1 y 16,5 tN/ha·año en función de la ubicación geográfica para el mismo rango de eficiencia fotosintética. De igual forma, la fijación de P varía de 0,1 a 0,6 tP/ha·año en zonas con baja radiación solar, y de 0,5 a 2,2 tP/ha·año en zonas con altas disponibilidad de radiación solar, cuando se modifica la eficiencia fotosintética del 1 al 5 %. En España la capacidad de fijación de P varía entre 0,2 y 1,6 tN/ha·año en función de la ubicación geográfica para el mismo rango de eficiencia fotosintética.

Formas solubles tanto de nitrógeno como de fósforo se producen a gran escala en todo el mundo porque resultan imprescindibles para la producción de alimentos por la agricultura. En el caso del nitrógeno, la producción de fertilizantes nitrogenados mediante la síntesis de Haber conlleva el consumo de grandes cantidades de energía, que conllevan importantes emisiones de CO₂ asociadas. En el caso del fósforo, los fertilizantes fosfatados se obtienen por

degradación de la roca fosfórica, también requiriendo para ello enormes cantidades de energía con sus correspondientes emisiones de CO₂ asociadas. Más aún, las reservas de fósforo son limitadas y ya algunos informes alertan de los efectos negativos que puede acarrear su agotamiento para la producción de alimentos (Cordell *et al.*, 2009). Para evitar estos problemas es imprescindible recuperar el nitrógeno y el fósforo de los residuos y aguas residuales actualmente desechados, pudiéndose utilizar las microalgas para estos procesos (Craggs *et al.*, 1996). Así, las microalgas son capaces recuperar el N y P contenidos en las aguas residuales, utilizando solo la energía solar en el proceso, al mismo tiempo que producen grandes cantidades de biomasa. El desarrollo de procesos de tratamiento de aguas residuales empleando microalgas ha despertado el interés de numerosas empresas e investigadores (Acién *et al.*, 2016).

2.3. Condiciones de cultivo

Como cualquier otro microorganismo las microalgas tienen unas condiciones óptimas de cultivo que deben conocerse para maximizar su rendimiento. Cada cepa posee unos valores óptimos de salinidad, temperatura o pH, y los sistemas de producción deben diseñarse/operarse para mantener estos valores óptimos. En cuanto a salinidad, aunque algunas microalgas pueden tolerar grandes variaciones de salinidad, generalmente se utilizan cepas de agua dulce, como *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Spirulina*, o cepas de agua de agua salada o de mar como *Nannochloropsis*, *T-ISO*, *Tetraselmis*. Además, algunas cepas son tolerantes a medios hipersalinos, como *Dunaliella*, reduciéndose en estas condiciones la probabilidad de contaminación por otras cepas. Con respecto a la temperatura, la mayoría de microalgas muestra su crecimiento óptimo en el rango de 20 a 30 °C. Algunas cepas pueden alcanzar elevados crecimientos por encima de los 30 °C como *Scenedesmus* y la cianobacteria *Anabaena* (Clares *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2008). El crecimiento se reduce por debajo de la temperatura óptima, pero por encima se puede llegar a la muerte del cultivo, por lo que en cualquier sistema de producción de microalgas es necesario disponer de sistemas de refrigeración que eviten el sobrecalentamiento de los cultivos y con ello su colapso.

En relación al pH, este se puede controlar añadiendo soluciones ácidas al medio de cultivo, pero generalmente se utiliza la inyección de CO₂ para al mismo tiempo reducir el pH y evitar la limitación por carbono. El pH óptimo para la mayoría de las microalgas se encuentra entre 7 a 8, aunque algunas cianobacterias muestra un rendimiento óptimo a valores de pH hasta 10 (Clares *et al.*, 2014). Controlar el pH mediante la inyección de CO₂ es un problema de ingeniería que debe ser adecuadamente optimizado para minimizar la cantidad de CO₂ consumido al mismo tiempo que aumenta la productividad de biomasa en el sistema, siempre teniendo en cuenta el coste de la infraestructura y el consumo de energía involucrado (Duarte-Santos *et al.*, 2016). Para asegurar que los cultivos de microalgas están solo limitados por luz es necesario suministrar CO₂ obligatoriamente, y por esto la mayoría de los sistemas de producción en todo el mundo disponen de sistemas de aporte de CO₂ aunque carezcan de otros sistemas de control para otras variables.

Proporcionar las condiciones de cultivo óptimas en el laboratorio o a pequeña escala es sencillo, aunque resulta gravoso si se analiza su coste. Sin embargo, en cultivos externos a gran escala controlar con precisión las condiciones de cultivo puede resultar muy difícil y en ocasiones hasta imposible. Como ejemplo, para controlar la temperatura en grandes reactores se requiere de grandes inversiones en sistemas de intercambio de calor, además que el consumo de energía resulta demasiado elevado, por lo que se descarta poder llevar a cabo este control y se obliga a producir cepas de microalgas seleccionadas por tener su crecimiento óptimo a los valores de temperatura media diaria que prevalecen en la ubicación seleccionada. En el caso del pH la inyección de CO₂ puro puede hacerse a gran escala pero ello puede suponer hasta un 30 % de los costes totales de producción, siendo recomendable la utilización de gases de combustión o corrientes residuales que contengan CO₂ para reducir dicho coste (Acién *et al.*, 2012).

En cuanto al control de los sistemas de producción de microalgas se debe considerar la variación de los parámetros de cultivo en tres escalas de tiempo bien diferenciadas: (i) las variaciones que tienen lugar a lo largo del año en la ubicación seleccionada; (ii) las variaciones que tienen lugar cada día debido al cambio de las condiciones de cultivo con el ciclo solar debido principalmente a la variación de la radiación solar; y (iii) el tiempo requerido para mezclar completamente el sistema de producción en cual influye en la existencia de gradientes de luz y nutrientes dentro del reactor. En los últimos años se están desarrollando y aplicando métodos de control avanzados a la producción industrial de microalgas para reducir los costes y mejorar el rendimiento de los procesos basados en microalgas (Pawlowski *et al.*, 2014). Solo un profundo análisis de las principales variables de cultivo principal y su optimización a lo largo de las diferentes escalas de tiempo existentes pueden permitir maximizar el rendimiento de cualquier proceso de producción de microalgas.

3. Fotobiorreactores para la producción de microalgas

La producción de microalgas es un proceso que debe ser adecuadamente planeado y realizado. Las principales etapas en cualquier proceso de producción de microalgas son: (i) la preparación del medio de cultivo, (ii) la producción de biomasa en fotobiorreactores, (iii) el cosechado de la biomasa, (iv) el tratamiento de aguas para recirculación o vertido, y (v) la estabilización de la biomasa o su transformación en productos finales. El corazón del proceso es el fotobiorreactor en el que se produce la biomasa de microalgas. Existe una amplia bibliografía sobre el diseño de fotobiorreactores y su operación (Cuaresma *et al.*, 2011; Posten, 2009), por lo que aquí solo se incluye una comparación de las tecnologías más usadas.

3.1. Fotobiorreactores abiertos

Los fotobiorreactores abiertos son los más extendidos para la producción de microalgas en todo el mundo, más del 90 % de la producción mundial se lleva a cabo en este tipo de reactores. Son básicamente grandes estanques de poca profundidad para facilitar la penetración de la luz y aumentar la productividad de biomasa, en los que se mantiene y hace circular el cultivo de microalgas mediante impulsores de paletas (Figura 1). Las principales ventajas de los reactores *raceway* son su bajo costo, por debajo de 10 euros/m², y fácil escalado ya que este se realiza a escala comercial por multiplicidad de unidades de un tamaño unitario de 5.000 m². Otra ventaja de esta tecnología es su bajo consumo de energía, inferior a 1 W/m³, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones de bajo valor, incluyendo el tratamiento de aguas residuales y la producción de biocombustibles. Los principales inconvenientes de los reactores *raceway* están relacionados con el escaso control de las condiciones de operación y la fácil contaminación de los cultivos en estos sistemas. Por estas razones los reactores *raceway* se utilizan principalmente para producir microalgas que crecen bajo condiciones extremas de elevado pH (*Spirulina*) o salinidad (*Dunaliella*), que evitan o minimizan la contaminación de los cultivos por otros microorganismos. Para el resto de especies de microalgas resultan inviables a escala comercial por su facilidad de contaminación, por lo que estas otras especies deben ser producidas en reactores cerrados.

Figura 1. Imagen de reactor *raceway* de 20 m³ como ejemplo de reactor abierto.
Reactor instalado y operado en la Estación Experimental Cajamar



Existen numerosos ejemplos en todo el mundo de instalaciones de producción de microalgas utilizando reactores *raceway*. Así, empresas como Cyanotech (EEUU), Earthrise Nutritional (EEUU), Parry Nutraceuticals (India) y Spirulina Factory (Myanmar), son algunos de los mayores productores de *Spirulina* en todo el mundo que llevan a cabo la producción utilizando reactores *raceway* en instalaciones de 10 a 100 ha. Estos reactores se también utilizan para producir *Dunaliella* a gran escala por diferentes empresas como Nikken Sohonsa Corp (Japón), Betatene (Australia), Nature Beta Technologies (Israel), ABC Biotech Ltd. (India), Tianjin Lantai Biotechnology (China), Western Biotechnology Ltd. (Australia) y Aqua Carotene Ltd. (Australia). El diseño de este tipo de reactores *raceway* está siendo revisado en los últimos años para mejorar su rendimiento. Así, la hidrodinámica, la transferencia de materia y el consumo de energía son aspectos importantes aún por mejorar en este tipo de sistemas (de Godos *et al.*, 2014a; Sompech *et al.*, 2012). A pesar de estas posibles mejoras, estos sistemas son los más extendidos en todo el mundo y la actual tecnología funciona lo suficientemente bien como para que la mayoría de nuevas instalaciones industriales que se implantan en el mundo se basan en el uso de este tipo de reactores. Sobre todo, en procesos relacionados con el tratamiento de aguas residuales, o la producción de biofertilizantes y piensos para alimentación animal, que son actualmente los que más interés están despertando (Chisti, 2013; Park *et al.*, 2011).

3.2. Fotobiorreactores cerrados

Los fotobiorreactores cerrados se utilizan para producir cepas de microalgas que no pueden ser producidas en condiciones extremas, por lo que no se pueden producir en reactores abiertos, pero que contienen compuestos valiosos y por tanto su valor es lo suficientemente elevado para poder asumir los mayores costes derivados del uso de este tipo de fotobiorreactores cerrados. Se han propuesto diversos diseños de fotobiorreactores cerrados como columnas de burbujeo, sistemas helicoidales o paneles planos, pero los más extendidos a escala comercial son los fotobiorreactores tubulares (Figura 2). El elemento diferenciador de un fotobiorreactor cerrado es que permite aislar el cultivo de la atmósfera que lo rodea, minimizando así los riesgos de contaminación y permitiendo controlar de mejor forma los parámetros de operación. En los reactores tubulares el cultivo se recircula de forma continua a lo largo el receptor solar, el cual está diseñado para maximizar la interceptación y utilización de la radiación solar. Estos reactores permiten producir casi cualquier microalga, incluyendo cepas sensibles como *Haematococcus* o *Porphyridium*, permitiendo además alcanzar altas productividades, superiores a 1 g/L-día, por un mejor control de los parámetros de cultivo. Sin embargo, también tienen inconvenientes relacionados con su mayor coste, superior a 100 euros/m², así como mayor consumo de energía, superior a 100 W/m³, la dificultad de su escalado, o problemas derivados de ensuciamiento de las paredes que pueden reducir su rendimiento de forma notable (Acien Fernández *et al.*, 2013; Posten, 2009).

Figura 2. Imagen de fotobiorreactor tubular de 3 m³ como ejemplo de reactor cerrado.
Reactores instalados y operados en la Estación Experimental Cajamar



Los fotobiorreactores tubulares se utilizan principalmente para producir biomasa de alto valor para consumo humano, ya sea en alimentación, cosmética o farmacia. Así, empresas como «L'Age Vert» (www.agevert.com, Francia), SECIL (Portugal) y Roquette Klötzed (Alemania) producen *Chlorella* para alimentos en instalaciones de 1 a 2 hectáreas de tamaño total. Otras empresas como Mera Pharmaceuticals, (Hawai, EEUU) y Algatech Algaltechnologies (www.algotech.com, Israel) producen *Haematococcus pluvialis* también en fotobiorreactores tubulares para la obtención de astaxantina, un potente antioxidante de consumo humano. La instalación más grande basada en esta tecnología, con hasta 20 hectáreas, se ha ubicado recientemente en China también para producir *Haematococcus pluvialis* como fuente de astaxantina. En los últimos años se están poniendo en marcha en todo el mundo numerosas instalaciones basadas en el empleo de fotobiorreactores tubulares, por lo que su tamaño y capacidad aumentan año tras año. Esto es debido a la mejora en el diseño y materiales utilizados en este tipo de fotobiorreactores, así como a la necesidad de producir la biomasa de microalgas bajo condiciones controladas según las normas de «buenas prácticas de fabricación» para que sea apta para el consumo humano. La utilización de nuevos materiales, la reducción del ensuciamiento de las paredes y el aumento de la estabilidad de los sistemas de producción son aun desafíos por acometer para esta tecnología (Harris *et al.*, 2013).

4. Aplicaciones de las microalgas

4.1. Análisis de mercado de las microalgas

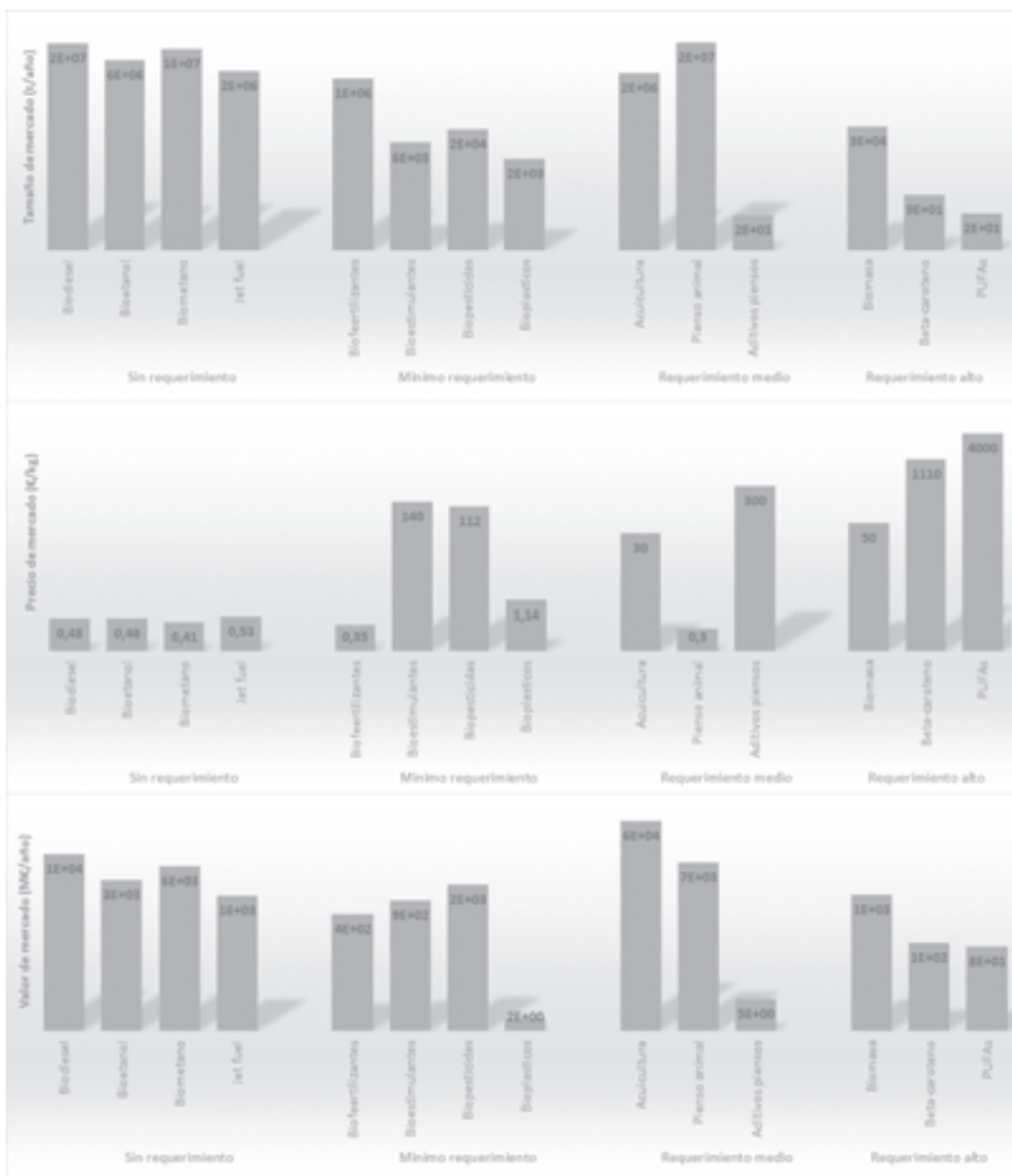
Las microalgas se pueden utilizar en un amplio abanico de aplicaciones, aunque solo unas pocas están siendo realmente explotadas a nivel comercial actualmente, el resto siendo aún potencialidades por desarrollar para este tipo de microorganismos. Las aplicaciones de las microalgas se pueden dividir en cuatro grupos principales en función de los requerimientos de seguridad de los diferentes mercados: (i) producción de energía, principalmente biocombustibles; (ii) obtención de bioplásticos y productos para la agricultura, como bioestimulantes y bioplaguicidas; (iii) producción de piensos para acuicultura y animales; y (iv) obtención de productos de consumo humano, principalmente alimentos y nutracéuticos (Voort *et al.*, 2015). Al comparar el tamaño de los diferentes mercados se observa como el mercado de biocombustibles requiere enormes producciones, superiores a 10^7 t/año, que están lejos de la actual capacidad de producción mundial de biomasa de microalgas, de 10^4 t/año (Gráfico 3). La mayor parte de la producción mundial de microalgas se destina actualmente al consumo humano, que requieren alrededor de 10^4 t/año, mientras que la agricultura requiere cantidades aún mayores, de hasta 10^5 t/año, y la producción de piensos tanto para granjas como para acuicultura requiere aún mayores cantidades, de hasta 10^6 t/año. En cuanto al precio de mercado, el coste mínimo de producción de biomasa de microalgas varía de 5 euros/kg en reactores *raceway*, a 12 euros/kg utilizando fotobiorreactores tubulares (Enzing *et al.*, 2014); por lo que solo mercados que permitan un precio de la biomasa por encima del coste de producción pueden ser a día de hoy factibles.

Este estudio de mercado muestra como actualmente, solo las aplicaciones directamente relacionadas con el consumo humano, así como la producción de aditivos para piensos, y algunas aplicaciones relacionadas con los usos agrícolas, como la producción de bioestimulantes y bioplaguicidas, tienen precios de mercado superiores a los actuales costes de producción (Gráfico 3). De este análisis se concluye que solo estas aplicaciones son realistas a día de hoy. Así, el valor de mercado de los productos relacionados con consumo humano supera los 10^3 millones de euros al año, mientras que el de los productos relacionados con uso agrícola puede llegar a 10^4 millones de euros al año, y el relacionado con la acuicultura hasta 10^5 millones de euros al año, poniendo de manifiesto la importancia de estos sectores en el desarrollo a corto plazo de la biotecnología de microalgas (Gráfico 3).

Para poder ampliar el campo de aplicación de las microalgas a otros sectores es necesario disminuir los costes de producción en un orden de magnitud a la vez que se aumenta la capacidad de producción en al menos tres órdenes de magnitud, lo cual no es un reto fácil de solventar. El coste de producción de la biomasa de microalgas puede reducirse enormemente si (i) se mejora la productividad de los actuales sistemas de producción, (ii) se amplía el tamaño de las instalaciones actualmente utilizadas, y (iii) se acopla la producción de microalgas con

otros procesos como el tratamiento de residuos, siendo estos los retos para el futuro próximo (Acíen *et al.*, 2012; Norsker *et al.*, 2011).

Gráfico 3. Análisis de mercado de productos derivados de microalgas



Fuente: Enzing *et al.* (2014); Viganí *et al.* (2015) y Voort *et al.* (2015).

4.2. Aplicaciones de alto valor de las microalgas

Las aplicaciones de alto valor de las microalgas se relacionan principalmente con el consumo humano directo como alimentos, nutracéuticos, cosméticos o incluso productos farmacéuticos (Borowitzka, 2013). La biomasa de microalgas contiene proteínas, lípidos y carbohidratos de alta calidad para el consumo humano. Además, la biomasa de microalgas contiene aminoácidos esenciales y ácidos grasos poliinsaturados, además de esteroides y carotenoides con actividad antioxidante, por lo que esta biomasa ha sido considerada como un súper alimento (Vigani *et al.*, 2015). En este sentido, la UE adoptó en 2012 una estrategia enfocada a innovar mediante el impulso del sector de la bioeconomía, siendo la «bioeconomía azul» uno de los pilares de esta estrategia, y dentro de ella la producción de microalgas como fuente de moléculas de alto valor para uso humano (Anon, 2012). Las microalgas han sido una fuente sostenible de nutracéuticos y alimentos para uso humano, por sus elevadas propiedades nutricionales y funcionales frente a los cultivos convencionales como cereales y verduras, así como por sus menores requerimientos de terreno, además de reducir los riesgos relacionados con la inseguridad alimentaria en un mundo global (Draaisma *et al.*, 2013).

La biomasa de microalgas puede utilizarse directamente como alimento, en diferentes mezclas con otros alimentos preparados, o bien consumirse extractos de compuestos valiosos obtenidos de la misma. Así, se comercializa biomasa seca de *Chlorella* y *Spirulina* como polvo o en cápsulas, aunque también se están incorporando a zumos, pasteles, pastas y otros alimentos para mejorar su valor nutricional y/o añadir propiedades saludables como mayor capacidad antioxidante entre otros. En cuanto a extractos, los carotenoides como la astaxantina y el β -caroteno se extraen de la biomasa de *Haematococcus* y *Dunaliella*, y se incorporan en suspensiones como mejorador de la salud. Otros compuestos como los ácidos grasos poliinsaturados (ácido eicosapentaenoico (EPA), ácido araquidónico (AA) y ácido docosahexaenoico (DHA)), también se extraen de la biomasa de cepas marinas, como *Nannochloropsis* y T-ISO, utilizando también principalmente CO₂ supercrítico, y se incorporan a aceites y cápsulas para el consumo humano. Merece especial mención la producción de ácido docosahexaenoico (DHA) a partir de *Schizochytrium* por la empresa Martek, el cual se incorpora a las leches infantiles en una aplicación de alto valor que es actualmente la norma a nivel mundial.

Actualmente las mayores barreras a la incorporación de las microalgas a los alimentos están relacionadas con aspectos regulatorios, especialmente en la UE. A pesar de las ventajas ampliamente demostradas de la biomasa de microalgas para el consumo humano, actualmente solo se pueden comercializar las microalgas reconocidas como seguras (GRAS) por su tradición de consumo demostrada. Estas solo incluyen *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella* y *Haematococcus*. Cualquier otra microalga debe ser registrada como nuevo alimento, como la recientemente aprobada *Tetraselmis* por la empresa Phytoplacton Marino, lo cual es un proceso largo y costoso. De todos modos, independientemente de la cepa a producir, todo el sistema de producción debe estar desarrollado conforme a los estándares de la «industria alimentaria», con su correspondiente certificación que abarca tanto los materiales, como los sistemas y protocolos

utilizados en todo el proceso de producción. De esta forma es imprescindible la participación de empresas de alimentos en el futuro desarrollo de la biotecnología de microalgas.

Recientemente se ha publicado un amplio análisis de los productos a base de microalgas que se comercializan como alimentos y piensos en Europa (Enzing *et al.*, 2014). Según este informe, el mercado de la biotecnología marina global en 2011 se estimó en 2,4 billones de euros, siendo las microalgas uno de sus componentes principales, con un crecimiento anual del 10 %. La mayor parte de este mercado está relacionado con el sector de alimentos saludables y suplementos dietéticos, por lo que grandes empresas del mercado de ingredientes alimentarios como BASF, Unilever, Roquette y Dow Chemical ya participan en proyectos relacionados con la producción de microalgas.

4.3. Aplicaciones de bajo valor de las microalgas

Las aplicaciones de bajo valor de las microalgas incluyen la captura de CO₂, así como la producción de biocombustibles y biofertilizantes entre otras, pero todas ellas solo son sostenibles si se acoplan con el tratamiento de aguas residuales (Lundquist *et al.*, 2010). Las microalgas pueden utilizarse para tratar no solo aguas residuales urbanas, sino también otras aguas residuales de granjas, acuicultura, e industria en general incluyendo la digestión anaerobia de residuos (Morales-Amaral *et al.*, 2015a; Muñoz *et al.*, 2006; Posadas *et al.*, 2013 y Sepúlveda *et al.*, 2015). La utilización de microalgas como sistema de captura de CO₂ ha sido ampliamente estudiada, ya que estos microorganismos permiten fijar como biomasa el CO₂ presente en los gases de combustión, entre otros, a velocidades mayores que cualquier otro cultivo o las masas forestales. Sin embargo, al tratarse de una biomasa fácilmente degradable que no puede ser almacenada por largos periodos no se pueden considerar a las microalgas como sistema de almacenamiento de CO₂, solo de captura. La ventaja de las microalgas frente a otros sistemas de captura es que no requieren energía para la captura del CO₂ ya que utilizan la energía solar, mientras que otros procesos químicos de captura de CO₂ de gases de combustión, como los basados en absorción con aminas requieren, hasta 4 MJ/kgCO₂, lo que los hace difícilmente viables (Herzog, Drake y Adams, 1997). En todo caso la producción de microalgas con gases de combustión resulta más costosa, alrededor de 1.000 euros/tCO₂, que los impuestos o tasas actuales impuestos a las empresas por sus emisiones de CO₂, alrededor de 30 euros/tCO₂. Solo la valorización de la biomasa producida a precios superiores a 2.000 euros/t biomasa puede hacer viable este tipo de procesos (Acien *et al.*, 2012).

En cuanto a la producción de biocombustibles, se ha estudiado mucho la producción de biodiésel a partir de microalgas ya que estos microorganismos pueden llegar a acumular hasta el 70 % de su peso en lípidos, susceptibles de ser transformados en biodiésel mediante transesterificación directa, en un proceso análogo al utilizado actualmente en la industria de producción de biodiésel a partir de aceites usados o vegetales. La mayor ventaja de las microalgas en este ámbito es su elevada capacidad de producción, que puede llegar a ser hasta cien veces superior

a los cultivos energéticos actuales como colza o palma (Chisti, 2007). Sin embargo, la realidad es que la capacidad de producción actual de aceites de microalgas es aún muy limitada y los costes de producción demasiado elevados para poder competir en este mercado. Sería necesario aumentar en varios órdenes de magnitud la actual capacidad de producción y reducir en al menos un orden de magnitud los actuales costes de producción para poder competir en este mercado, lo cual no se excluye como una posible solución al abastecimiento de combustibles líquidos a largo plazo. Hoy en día la mejor alternativa es la producción de biometano como biocombustible mediante digestión anaerobia de la biomasa de microalgas producida en el tratamiento de aguas residuales (Cabanelas *et al.*, 2013).

Una aplicación más realista para las microalgas es la producción de biofertilizantes y bioestimulantes de uso agrícola. El mercado global de la producción de alimentos está reclamando cada vez sistemas más sostenibles y ecológicos que reduzcan el uso de compuestos químicos de síntesis y el impacto ambiental derivado de la producción y uso de los mismos. En este sentido las microalgas son ricas en nitrógeno y fósforo como biofertilizantes, pero más aún contienen aminoácidos y fitohormonas que permiten aumentar la producción de cultivos agrícolas, reduciendo incluso la necesidad del aporte de fertilizantes químicos en los mismos (Lu and Xu, 2015). Para esto la biomasa de microalgas debe ser adecuadamente producida y procesada, para obtener biofertilizantes con contrastada actividad biológica, recomendándose el uso de métodos enzimáticos (Romero García *et al.*, 2012). En todo caso, la propia producción de la biomasa puede hacerse de forma más sostenible si se acopla con el tratamiento de aguas residuales, aprovechando la capacidad de estos microorganismos de fijar el nitrógeno y fósforo contenidos en dichas aguas, que si se emplean fertilizantes químicos para su producción.

4.4. Tratamiento de aguas residuales con microalgas

El tratamiento de aguas residuales es un gran desafío para la sostenibilidad de actividad humana. Así, la generación de aguas residuales está continuamente aumentando por el aumento de la población y su nivel de vida. Dichas aguas deben ser tratadas para evitar problemas de salud y medioambientales, pero ello conlleva un coste y la necesidad de tecnologías cada vez más eficientes. Sin embargo, las aguas residuales no siempre se tratan adecuadamente, así se ha señalado que en todo el mundo mueren más personas por enfermedades relacionadas con la contaminación del agua que debido a todas las formas de violencia incluyendo guerras. Por otra parte, el vertido de aguas residuales sin tratamiento al medioambiente causa problemas de eutrofización dañando seriamente los ecosistemas y al final las reservas de agua dulce para consumo humano.

Para evitar estos problemas, las aguas residuales deben ser adecuadamente tratadas para eliminar de ellas los contaminantes y poder así verter el agua de manera segura. Los sistemas convencionales basados en lodos activados consisten en una serie de operaciones unitarias enfocadas a transformar la materia orgánica presente en el agua residual en CO₂ que se emite

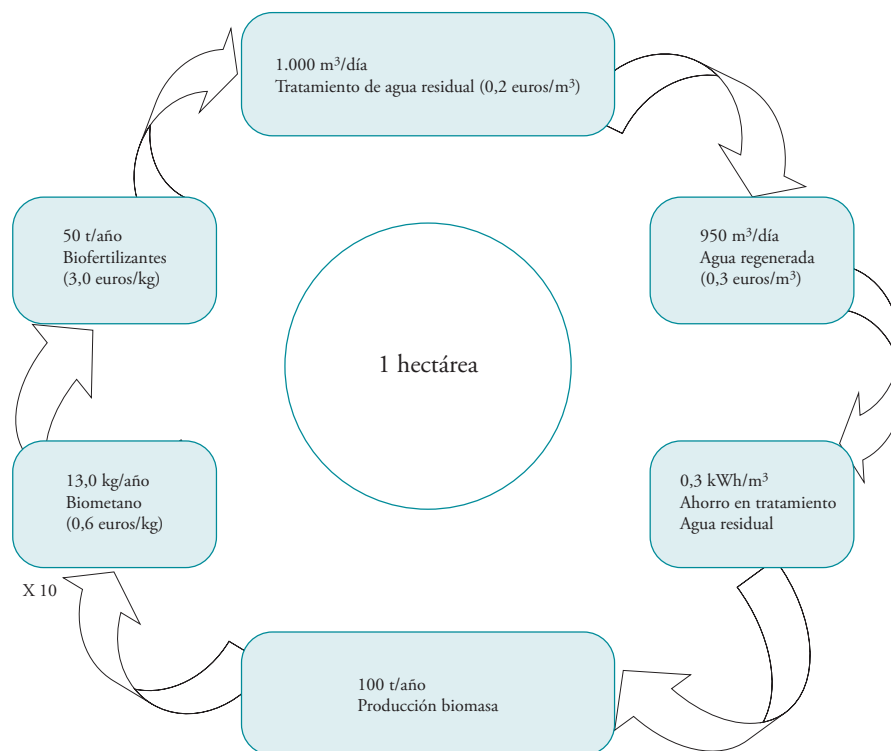
a la atmósfera, mientras que el nitrógeno contenido en el agua residual también se libera a la atmósfera en forma N_2 o de lo contrario se acumula en el lodo que es finalmente sometido a digestión anaerobia para producir biogás quedando el nitrógeno en el fango digerido. El fósforo no se suele depurar biológicamente, sino que se acumula en los fangos que finalmente se llevan a vertedero, normalmente sin recuperación de N o P. Realizar este proceso requiere una gran cantidad de energía, de hasta 0,5 kWh/m³, y un coste de tratamiento, de hasta 0,2 euros/m³. La preocupación por la protección del medioambiente obliga a los gobiernos a reducir los límites de vertido de N y P en las aguas residuales depuradas para su liberación segura al medioambiente, por lo que será necesario implementar procesos de tratamiento adicionales que incrementaran estos consumos de energía y costes de tratamiento.

Como ejemplo, una empresa como FCC Aqualia, que opera más de 250 plantas de tratamiento de aguas residuales en Europa, trata anualmente más de 500 Mm³/año de aguas residuales. El coste de tratamiento de este volumen de agua residual supone más de 100 M€/año y en él se consumen hasta 250 GWh/año, equivalente al consumo de electricidad total de España en un día. Además, esta energía y las emisiones de CO₂ asociadas con la misma se utilizan principalmente para disipar al ambiente más de 250.000 tCO₂/año, 25.000 tN/año y 5.000 tP/año. Esta gran cantidad de nutrientes es suficiente para producir más de 0,5 Mt/año de biomasa de microalgas, veinte veces más que la producción mundial de microalgas actual. Por otro lado, el acoplamiento de la producción de microalgas con el tratamiento de aguas residuales permite para reducir el consumo de energía y el coste del tratamiento de las aguas residuales, al mismo tiempo que permite la recuperación de los nutrientes contenidos en las aguas residuales y reducir con ello el coste de producción de la biomasa de microalgas. El desafío en los próximos años será demostrar y escalar a nivel comercial esta tecnología, así como aumentar su rendimiento, para que pueda contribuir significativamente a la mejora de la sostenibilidad de los actuales sistemas de tratamiento de aguas residuales (Ación *et al.*, 2016; Dalrymple *et al.*, 2013; Gouveia *et al.*, 2016).

El acoplamiento de la producción de microalgas con el tratamiento de aguas residuales no es una idea nueva y ya fue propuesta por Oswald en los años 60 (Oswald y Golueke, 1968). Sin embargo, a día de hoy existen muy pocos casos de aplicación real de este tipo de procesos a escala comercial (Craggs *et al.*, 2012). Son varios los motivos para ello, pero el más relevante es la baja eficiencia de las actuales tecnologías, especialmente debido al hecho de que requieren tiempos de retención hidráulicos muy elevados, de hasta 10 días, por lo que requieren grandes superficies. Para aumentar esta eficiencia es necesario mejorar las condiciones de operación así como la utilización de nuevos diseños de fotobiorreactores como los reactores de capa fina (Morales-Amaral *et al.*, 2015b). Avances recientes en el diseño y operación de reactores *raceway*, junto con la reducción del consumo de energía y tiempo de retención hidráulico requerido para lograr la completa eliminación de contaminantes de las aguas residuales han permitido a FCC Aqualia desarrollar la primera planta comercial basada en microalgas para el tratamiento de aguas residuales, de 10 hectáreas y que es capaz de tratar las aguas residuales de 80,000 habitantes en Chiclana de la Frontera (España) dentro del proyecto ALLGAS. Como ejemplo, los datos proporcionados por FCC Aqualia considerando una unidad de superficie de 1 ha, equivalente

a un campo de fútbol, señalan que empleando consorcios de microalgas y bacterias es posible tratar hasta 1.000 m³/día por hectárea de, generando 950 m³/día de agua regenerada apta para ser utilizada en riego, y hasta 100 t/año de biomasa de microalgas (Figura 3). Empleando este proceso se pueden ahorrar más de 0,3 kWh/m³ de agua residual tratada, lo que representa un importante ahorro económico y en cuanto a emisiones de CO₂ asociadas, pudiéndose utilizar la biomasa obtenida para producir biogás con lo que se produce biometano para abastecer a 10 vehículos ligeros durante todo un año, así como biomasa susceptible de ser utilizada en la producción de biofertilizantes de uso agrícola. Esto es un perfecto ejemplo de bioeconomía sostenible, donde el desarrollo de procesos basados en microalgas puede transformar los actuales procesos convencionales, que son altamente consumidores de energía y recursos, en procesos de tratamiento positivos en generación de energía y producción de compuestos de valor, lo que sería una transformación revolucionaria del sector de tratamiento de residuos. Por otra parte, la biomasa producida es interesante para ser utilizada en la producción de biofertilizantes y alimento para animales, aumentando así en gran medida la sostenibilidad de la producción de alimentos ahora relacionada con el consumo de grandes cantidades de abonos, tierra, deforestación y consumo de agua (Jorquera *et al.*, 2010; Romero García *et al.*, 2012).

Figura 3. Resumen las ventajas del tratamiento de aguas residuales empleando consorcios de microalgas y bacterias



Fuente: Comunicación de FCC Aqualia (2017).

5. Conclusiones

Las microalgas pueden contribuir significativamente a la bioeconomía por cuanto pueden mejorar la sostenibilidad múltiples procesos relacionados con la actividad humana, desde la producción de alimentos al tratamiento de aguas residuales. Así, la tolerancia de estos microorganismos a diferentes condiciones ambientales y su alta productividad los hacen idóneos para múltiples aplicaciones. El conocimiento de los principales factores que gobiernan la producción de microalgas está permitiendo el desarrollo de procesos de producción industrial que cada vez contribuyen en más sectores. Sin embargo, debido a que aún la capacidad de producción es baja y los costes de producción son elevados, las actuales aplicaciones comerciales de las microalgas están relacionadas principalmente con el consumo humano. A corto plazo se espera que la mejora de los sistemas de producción, especialmente el desarrollo de nuevas tecnologías, y la «domesticación» de cepas altamente productivas, aumentará en gran medida la capacidad de producción y el abanico de aplicaciones en las que las microalgas podrán contribuir en el futuro próximo. Así, la producción de alimentos a partir de microalgas puede permitir mitigar la cada vez mayor escasez de alimentos para un mundo en continuo crecimiento por cuanto permite alcanzar producciones por hectárea más de diez veces superiores a los cultivos tradicionales pudiendo realizarse incluso sin la necesidad de suelos fértiles. Incluso las microalgas pueden producirse empleando aguas de baja calidad, no aptas para riego o uso humano, lo que las hace idóneas para afrontar una producción de alimentos en zonas con escasez de agua. Además, las microalgas pueden mejorar la sostenibilidad de los actuales sistemas de producción agrícolas y ganaderos por cuanto pueden producir biofertilizantes y alimento animal a partir de residuos como aguas residuales y gases de combustión, recuperando los nutrientes contenidos en estos efluentes además de reducir el impacto de los actuales sistemas de tratamiento. Por tanto, el aumento de la contribución de las microalgas a la sostenibilidad de la sociedad es un hecho ya indiscutible y lo único que queda por conocer es cuál será el ritmo de incorporación de este tipo de tecnologías a los actuales sistemas de producción, el cual vendrá determinado por la velocidad con la que las actuales barreras técnicas y regulatorias puedan ir resolviéndose.

Referencias bibliográficas

- ABDULQADER, G.; BARSANTI, L. y TREDICI, M. R. (2000): «Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu»; en *J. Appl. Phycol.* (12); pp. 493-498.
- ACIÉN, F. G.; FERNÁNDEZ, J. M.; MAGÁN, J. J. y MOLINA E. (2012): «Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it»; en *Biotechnol. Adv.* (30); pp. 1344-1353.

- ACIÉN, F. G.; GÓMEZ-SERRANO, C.; MORALES-AMARAL, M. M. M.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2016): «Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment?»; en *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (100).
- ACIÉN, F. G.; GONZÁLEZ-LÓPEZ, C. V.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2012): «Conversion of CO₂ into biomass by microalgae: How realistic a contribution may it be to significant CO₂ removal?»; en *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (96); pp. 577-586.
- ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G.; FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M. y MOLINA GRIMA, E. (2013): «Photobioreactors for the production of microalgae»; en *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* (12); pp. 131-151.
- OFFICIAL-STRATEGY_EN. (2012).
- BENEMANN, J. (2013): «Microalgae for biofuels and animal feeds»; en *Energies* (6); pp. 5869-5886.
- BENEMANN, J. R. (2003): *Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae-Technology roadmap* 7010000926; pp. 1-29.
- BOROWITZKA, M. A. (2013): «High-value products from microalgae-their development and commercialisation»; en *J. Appl. Phycol.* (25); pp. 743-756.
- BURLEW, J. S. (1953): «Algal culture from laboratory to pilot plant»; en *Carnegie Institution. Carnegie Institution of Washington Publication* (600). EEUU, Washington; pp. 235-281.
- CABANELAS, I. T. D.; ARBIB, Z.; CHINALIA, F. A.; SOUZA, C. O.; PERALES, J. A.; ALMEIDA, P. F.; DRUZIAN, J. I. y NASCIMENTO, I. A. (2013): «From waste to energy: Microalgae production in wastewater and glycerol»; en *Appl. Energy* (109); pp. 283-290.
- CHISTI, Y. (2007): «Biodiésel from microalgae»; en *Biotechnol. Adv.* (25); pp. 294-306.
- CHISTI, Y. (2013): «Raceways-based Production of Algal Crude Oil»; *Green* (3); pp. 195-216. Disponible en: <http://www.degruyter.com/view/j/green.2013.3.issue-3-4/green-2013-0018/green-2013-0018.xml>.
- CLARES, M. E.; MORENO, J.; GUERRERO, M. G. y GARCÍA-GONZÁLEZ, M. (2014): «Assessment of the CO₂ fixation capacity of *Anabaena* sp. ATCC 33047 outdoor cultures in vertical flat-panel reactors»; en *J. Biotechnol.* (187); pp. 51-55.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O. y WHITE, S. (2009): «The story of phosphorus: Global food security and food for thought»; en *Glob. Environ. Chang.* (19); pp. 292-305.
- CRAGGS, R.; SUTHERLAND, D. y CAMPBELL H. (2012): «Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production»; en *J. Appl. Phycol.* (24); pp. 329-337.

- Craggs, R. J.; Adey, W. H.; Jenson, K. R.; John, M. S.; St. Green, F. B. y Oswald, W. J. (1996): «Phosphorus removal from wastewater using an algal turf scrubber»; en Mara, D. D.; Pearson, H. W. y Silva, S. A., ed.: *Water Sci. Technol. Joao Pessoa*. 33. Water Science and Technology; pp. 191-198.
- Cuaresma, M.; Janssen, M.; Vílchez, C. y Wijffels, R. H. H. (2011): «Horizontal or vertical photobioreactors? How to improve microalgae photosynthetic efficiency»; en *Bioresour. Technol.* (102); pp. 5129-5137.
- Dalrymple, O. K.; Halfhide, T.; Udom, I.; Gilles, B.; Wolan, J.; Zhang, Q. y Ergas, S. (2013): «Wastewater use in algae production for generation of renewable resources: a review and preliminary results»; *Aquat. Biosyst.* (9); Disponible en: <http://aquaticbiosystems.biomedcentral.com/articles/10.1186/2046-9063-9-2>; p. 2.
- Draaisma, R. B.; Wijffels, R. H.; Slegers, P. M.; Brentner, L. B.; Roy, A. y Barbosa, M. J. (2013): «Food commodities from microalgae»; *Curr. Opin. Biotechnol.* (24); pp. 169-177.
- Duarte-Santos, T.; Mendoza-Martín, J. L.; Acién Fernández, F. G.; Molina, E.; Vieira-Costa, J. A. y Heaven, S. (2016): «Optimization of carbon dioxide supply in raceway reactors: Influence of carbon dioxide molar fraction and gas flow rate»; *Bioresour. Technol.* (212); pp. 72-81.
- Enzing, C.; Ploeg, M.; Barbosa, M. y Sijtsma, L. (2014): «Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe»; *JRC Sci. Policy Reports. Eur. Com.* 82, Report p. Disponible en <http://www.technopolis-group.com/wp-content/uploads/2014/04/1793-final-report.pdf>.
- Godos (de), I.; Mendoza, J. L.; Acién, F. G.; Molina, E.; Banks, C. J.; Heaven, S. y Rogalla, F. (2014a): «Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgae culture using flue gases»; *Bioresour. Technol.* (153); pp. 307-314.
- Godos (de), I.; Mendoza, J. L.; Acién, F. G.; Molina, E.; Banks, C. J.; Heaven, S. y Rogalla, F. (2014b): Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgae culture using flue gases. *Bioresour. Technol.* 153:307-314.
- Gouveia, L.; Graça, S.; Sousa, C.; Ambrosano, L.; Ribeiro, B.; Botrel, E. P.; Neto, P. C.; Ferreira, A. F. y Silva, C. M. (2016): «Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs»; *Algal Res.* (16); pp. 167-176.
- Harris, L.; Tozzi, S.; Wiley, P.; Young, C.; Richardson, T. M. J.; Clark, K. y Trent, J. D. (2013): «Potential impact of biofouling on the photobioreactors of the Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA) system»; *Bioresour. Technol.* (144); pp. 420-428.
- Herzog, H.; Drake, E. y Adams, E. (1997): «CO₂ Capture, reuse, and storage technologies for mitigating global climate change»; *EM Featrure*.

- JORQUERA, O.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. A.; EMBIRUÇU, M. y GHIRARDI, M. L. (2010): «Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors»; *Bioresour. Technol.* (101); pp. 1406-1413.
- LODEYRO, A. F.; CECCOLI, R. D.; PIERELLA KARLUSICH, J. J. y CARRILLO, N. (2012): «The importance of flavodoxin for environmental stress tolerance in photosynthetic microorganisms and transgenic plants. Mechanism, evolution and biotechnological potential»; *FEBS Lett.* (586); pp. 2917-24.
- LU, Y. y XU, J. (2015): «Phytohormones in microalgae: A new opportunity for microalgal biotechnology?»; en *Trends Plant Sci.* (20); pp. 273-282. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138515000072>.
- LUNDQUIST, T. J.; WOERTZ, I. y BENEMANN, J. R. (2010): «Microalgae for wastewater treatment and biofuels production»; en: *ACS Natl. Meet. B. Abstr.*
- MENDOZA, J. L.; GRANADOS, M. R.; DE GODOS, I.; ACIÉN, F. G.; MOLINA, E.; HEAVEN, S. y BANKS, C. J. (2013): «Oxygen transfer and evolution in microalgal culture in open raceways»; en *Bioresour. Technol.* (137); pp. 188-195.
- MORALES-AMARAL, M. M.; GÓMEZ-SERRANO, C.; ACIÉN, F. G.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2015a): «Production of microalgae using centrate from anaerobic digestion as the nutrient source»; en *Algal Res.* (9); pp. 297-305.
- MORALES-AMARAL, M. M.; GÓMEZ-SERRANO, C.; ACIÉN, F. G.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2015b): «Outdoor production of *Scenedesmus* sp. in thin-layer and raceway reactors using centrate from anaerobic digestion as the sole nutrient source»; en *Algal Res.* (12); pp. 99-108.
- MULLER-FEUGA, A. (2000): «The role of microalgae in aquaculture: situation and trends»; *J. Appl. Phycol.* (12); pp. 527-534. Disponible en <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1008106304417>.
- MULLER-FEUGA, A. (2013): «Microalgae for Aquaculture: The Current Global Situation and Future Trends»; en *Handb. Microalgal Cult. Appl. Phycol. Biotechnol.* Reino Unido, Oxford. John Wiley & Sons, Ltd; pp. 613-627.
- MUÑOZ, R.; GUIEYSSE, B.; MUÑOZ, R. y GUIEYSSE, B. (2006): «Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review»; *Water Res.* (40); pp. 2799-2815. Disponible en <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33746605638&partnerID=tZOtx3y1>.
- NORSKER, N. H.; BARBOSA, M. J.; VERMUË, M. H. y WIJFFELS, R. H. (2011): «Microalgal production - A close look at the economics»; en *Biotechnol. Adv.* (29); pp. 24-27.
- OSWALD, W. J. y GOLUEKE, C. G. (1968): «Large scale production of microalgae»; en MATELESS, R. I. y TANNENBAUM, S.R., eds.: *MA: MIT Press Cambridge. Single cell protein*; pp. 271-305.

- PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J. y SHILTON, A. N. (2011): «Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production»; en *Bioresour. Technol.* (102); pp. 35-42.
- PAWLOWSKI, A.; MENDOZA, J. L.; GUZMÁN, J. L.; BERENGUEL, M.; ACIÉN, F. G. y DORMIDO, S. (2014): «Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture»; en *Bioresour. Technol.* (170); pp. 1-9.
- POSADAS, E.; GARCÍA-ENCINA, P. A.; SOLTAU, A.; DOMÍNGUEZ, A.; DÍAZ, I. y MUÑOZ, R. (2013): «Carbon and nutrient removal from centrates and domestic wastewater using algal-bacterial biofilm bioreactors»; en *Bioresour. Technol.* (139); pp. 50-58.
- POSTEN, C. (2009): «Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae»; en *Eng. Life Sci.* (9); pp. 165-177.
- ROMERO GARCÍA, J. M.; ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G. y FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M. (2012): «Development of a process for the production of l-amino-acids concentrates from microalgae by enzymatic hydrolysis»; en *Bioresour. Technol.* (112); pp. 164-170.
- SÁNCHEZ, J. F. F.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. M.; ACIÉN, F. G. G.; CERÓN, M. C. C.; PÉREZ-PARRA, J. y MOLINA-GRIMA E. (2008): «Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: Influence of irradiance, dilution rate and temperature»; en *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (79); pp. 719-729.
- SEPÚLVEDA, C.; ACIÉN, F. G.; GÓMEZ, C.; JIMÉNEZ-RUIZ, N.; RIQUELME, C. y MOLINA-GRIMA, E. (2015): «Utilization of centrate for the production of the marine microalgae *Nannochloropsis gaditana*»; en *Algal Res.* (9); pp. 107-116.
- SOMPECH, K.; CHISTI, Y. y SRINOPHAKUN T. (2012): «Design of raceway ponds for producing microalgae»; en *Biofuels* (3); pp. 387-397.
- SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E. e ISAMBERT A. (2006): «Commercial applications of microalgae»; en *J. Biosci. Bioeng.* (101); pp. 87-96.
- Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J. y Befort, B. L. (2011): «Global food demand and the sustainable intensification of agriculture»; en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (108); pp. 20260-4.
- VIGANI, M.; PARISI, C.; RODRÍGUEZ-CEREZO, E.; BARBOSA, M. J.; SIJTSMA, L.; PLOEG, M. y ENZING C. (2015): «Food and feed products from micro-algae: Market opportunities and challenges for the EU»; *Trends Food Sci. Technol.* (42); pp. 81-92. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224414002787>.
- VOORT (VAN DER), M. P. J.; VULSTEKE, E. y VISSER (DE), C. L. M. (2015): «Macro-economics of algae products»; *Marco-economics Algae Prod. Public Output Rep. WP2A7.02 EnAlgae Proj.* Swanse; pp. 47.