

CULTIVOS DE MICROALGAS A GRAN ESCALA: SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La producción de microalgas presenta muchas similitudes con la agricultura intensiva, a cuyo desarrollo tecnológico viene contribuyendo de forma muy importante la actividad de la Estación Experimental de Cajamar "Las Palmerillas" desde su puesta en marcha en 1975.

La puesta en común del conocimiento de la experiencia de los investigadores de la Estación Experimental y los conocimientos científicos y tecnológicos del grupo de Ingeniería Química de la Universidad de Almería, han posibilitado un desarrollo tecnológico muy importante en torno al cultivo de microalgas para diversas aplicaciones.

Desde 2003 se está trabajando en el diseño, estudio y puesta a punto de diferentes sistemas de producción a mediana y gran escala de microalgas para diferentes usos. Nos podemos encontrar en las instalaciones de la Estación Experimental diferentes tipos de fotobioreactores, desde una planta de fotobioreactores tubulares cerrados de capacidad de 30.000 L a diferentes diseños de reactores abiertos con diferentes finalidades. En esta y en sucesivas publicaciones se irán exponiendo las diversas investigaciones, desarrollos experimentales y tecnología que se han ido desarrollado durante estos

Imagen 1. Vista general de las instalaciones en la Estación Experimental de Cajamar



años por el equipo formado por los investigadores de la Estación Experimental y el grupo de Ingeniería Química de la Universidad de Almería.

Producir microalgas a gran escala hoy en día solo se puede realizar de microalgas fotoautótrofas para que resulte económicamente rentable y técnicamente viable en el caso en el que no haya producción de energía (Brenan, 2010).

Los sistemas de cultivo, se suelen clasificar según su configuración y tipo de funcionamiento. Hay una gran variedad de sistemas que se emplea para el cultivo de microalgas, dependiendo principalmente de su aplicación. Conociendo el destino del uso de la biomasa producida se puede elegir la mejor opción para su cultivo a gran escala y optimizarla (Acién *et al.*, 2013). Los sistemas principales de producción de microalgas son: sistemas abiertos y sistemas cerrados. Cada uno de los sistemas presenta una serie de ventajas e inconvenientes que pasamos a describir más detalladamente a continuación.

2. SISTEMAS ABIERTOS

Los sistemas abiertos se llevan utilizando desde los años 50 (Borowitzka, 1999) y son uno de los más comunes en la producción comercial de microalgas.

Dentro de estos sistemas se pueden clasificar en aguas superficiales naturales, como estanques, lagunas y lagos, y en estanques artificiales, ya que para la producción de microalgas es necesario principalmente una fuente de luz, agua y CO₂. Los sistemas abiertos no necesitan grandes inversiones y mantenimiento y de fácil escalado, pero su control es más complicado por lo que determina que estos sistemas tengan bajas productividades y eficiencia, además de ser más susceptibles a contaminaciones por otras algas o bacterias, aunque suponga un menor coste. Los sistemas artificiales presentan diferentes diseños: inclinados (incluidos de capa fina), circulares y los más comunes y extendidos los estanques de carrusel o canales (raceway). Los elementos de control en estos sistemas no son muy sofisticados y los reactores están muy condicionados por el ambiente donde se localizan. El manejo de este tipo de sistemas suele ser más sencillo y son los reactores más utilizados en el mundo debido a la baja inversión necesaria (Molina *et al.*, 2010).

Los rendimientos en estos sistemas son muchos más bajos, si los comparamos con los sistemas cerrados y más susceptibles a las condiciones ambientales, ya que no se puede controlar la temperatura del agua, CO₂, evaporación e iluminación, por lo que el crecimiento del cultivo depende de las condiciones del medio y en general se produce en los meses más cálidos, aunque en estas latitudes es posible la producción a lo largo de todo el año, con rendimientos variables. En este tipo de sistema se produce una gran cantidad de microalgas, pero ocupa grandes áreas. Por otra parte ya que la atmósfera solo contiene 0,03-0,06 % de CO₂ es de esperarse que la transferencia de masa sea limitada lo cual puede disminuir el crecimiento celular.

En general, para el cultivo en sistemas abiertos se buscan cepas de microalgas que puedan crecer bajo condiciones en las que otros organismos les resultaría difícil desarrollarse como pH altos o bajos, temperaturas específicas, requerimientos nutritivos específicos, etc.

La ventaja que tienen los sistemas abiertos es que son muy baratos y fáciles de construir ya que básicamente lo que se hace es construir estanques, además del bajo coste de funcionamiento.

2.1 TIPOS DE SISTEMAS ABIERTOS

2.1.1 Balsas

Las balsas abiertas son piscinas artificiales de agua con una profundidad limitada donde las microalgas crecen sin ningún elemento de mezclado (Imagen 2), por lo tanto, no son considerados fotobiorreactores estrictamente al no manipular las condiciones naturales. El control del crecimiento del cultivo es escaso (Posten, 2009).

Imagen 2. Balsas abiertas de cultivo de *Dunaliella salina* en Australia (Cognis Nutrition and Health)



2.1.2 Canales o Raceways

Los denominados canales o Raceways suelen ser canales de hormigón ovalados y pocos profundos (de 15-30 cm) en forma de circuito cerrado, donde el cultivo circula y se mezcla para favorecer la estabilidad del crecimiento y productividad de las microalgas. Se suelen propulsar mediante paletas, hélices, inyectoros de aire, etc. por lo cual, en este caso, existe agitación que mejora el crecimiento de la biomasa. El suelo y paredes suelen estar recubiertos por una capa de plástico inerte. En la Imagen 3 se puede ver un diagrama del un reactor raceway tipo, así como detalles constructivos, dimensiones, el sistema de movimiento mediante paletas, etc.

Las limitaciones de los sistemas abiertos dificultan el mantenimiento en el tiempo de cultivos monoalgales, por lo que su empleo a gran escala se ha limitado a ciertas estirpes de crecimiento vigoroso en medios selectivos y resistentes a condiciones de intemperie.

Debido a la poca profundidad de estos canales, la difusión desde la atmosfera permite a las microalgas obtener el CO_2 necesario para su crecimiento de la atmosfera, pero no obstante para mejorar los rendimientos se pueden controlar determinados parámetros, como el suministro de CO_2 para el control del pH, mediante difusores en el fondo del estanque o colocar reflectantes de luz para poder aumentar la profundidad de los mismos. La agitación es un factor muy importante para evitar la adhesión celular y permitir la homogeneización del cultivo, pero sin dañar las células (Jorquera *et al.*, 2010).

The diagram illustrates a vertical channel mixer. At the top, a horizontal section shows the 'Top of wall' with a height dimension d and a small vertical offset Δd . The main vertical section shows two parallel channels separated by 'Channel dividers'. The 'Channel walls or outside walls' are on the outer sides, and 'Guide vanes' are located near the top of the channels. The 'Channel lining' is shown as a cross-hatched area on the inner wall of one channel. Arrows indicate the flow direction: upwards in the center of each channel, labeled 'Friction', and downwards along the outer walls. The 'Channel width' is denoted by W . At the bottom, a 'Mixing station' is indicated. A detailed view of the 'Paddle wheel' is shown in the bottom right corner, featuring multiple radial paddles.

4

Imagen 4. A, vista aérea de diferentes tipos de raceway. B, raceways de gran capacidad (50.000 L). C y D, detalle del movimiento del cultivo en estos sistemas. Todos estos raceway están localizados en la Estación Experimental de Cajamar.



Aunque la productividad en estos sistemas es mayor que en las balsas, no son capaces de obtener altas concentraciones celulares. Otras desventajas de estos sistemas es el control de la temperatura o la presencia de contaminantes, además hay serias limitaciones en la profundidad y la turbulencia del cultivo (Richmond, 1990).

Actualmente, el 95 % de la producción de microalgas se basa en sistemas abiertos (raceways o estanques abiertos circulares). Estos sistemas presentan una baja tasa de fijación de CO₂, estimándose que entre el 20-50 % del gas inyectado es efectivamente fijado por las microalgas.

2.1.3 Piscinas inclinadas

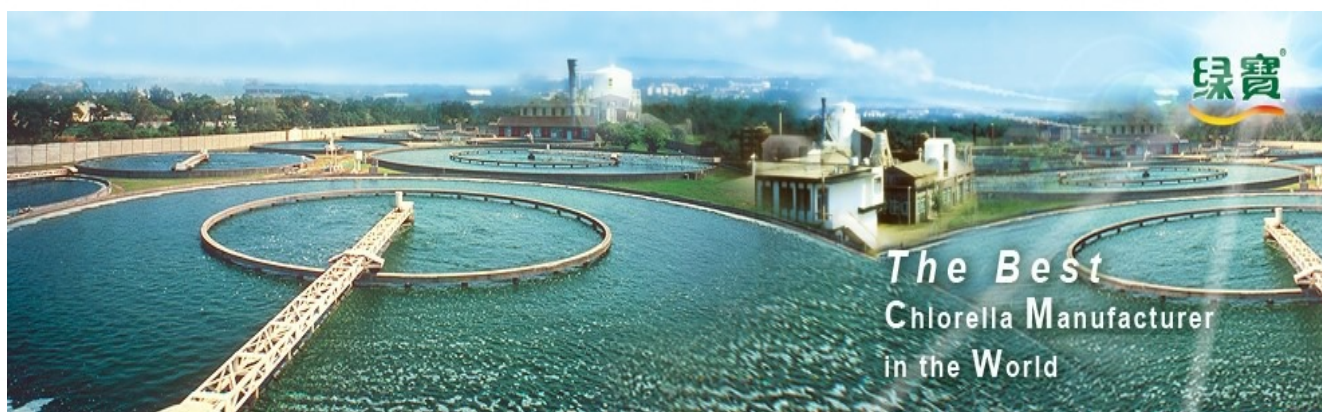
La turbulencia en estos sistemas se genera por la propia gravedad, pero presentan una serie de inconvenientes como una elevada evaporación, superficie que ocupa elevada, la sedimentación de las células en las partes donde la velocidad de flujo es menor, así como el coste energético de bombear el cultivo de nuevo a la parte superior.

2.1.4 Tanques Circulares

Estos sistemas presentan varios inconvenientes, como la superficie que ocupan, el elevado coste de construcción suelen ser de hormigón y el alto consumo de energía, en estos estanques la agitación se realiza mediante una pala que gira recorriendo toda la superficie. A pesar de su elevado costo de construcción y operación son unos de los más usados en Japón, Taiwan e Indonesia para la producción de *Chlorella* (Lee, 2001) (Imagen 5).

Estos dos sistemas están ya casi no se usan a nivel comercial.

Imagen 5. tanques circulares de la empresa Taiwan *Chlorella* manufacturing co.LTD.
(www.taiwanchlorella.com).



3. SISTEMAS CERRADOS

Conociendo los problemas relacionados con los sistemas abiertos, especialmente la imposibilidad de obtener cultivos puros (un solo tipo de microorganismo), se desarrollan los sistemas cerrados. Gracias

a ellos es posible producir una sola cepa de microalga y aportar un ambiente controlado al cultivo, ya que estos sistemas se encuentran aislados del ambiente exterior, por lo tanto sin contacto directo con la atmósfera, esto supone una reducción de la contaminación, un mayor control de las condiciones de cultivo y en general una mayor rentabilidad. El principal inconveniente es su coste.

Estos sistemas presentan una mayor productividad frente a los sistemas abiertos (raceways) consiguiendo una mayor eficiencia en la utilización y fijación del CO₂ inyectado. Permiten mantener condiciones idóneas para el crecimiento de una microalga concreta, a la vez que dificultan la invasión por organismos contaminantes, posibilitando así el mantenimiento de cultivos monoalgales. En los fotobiorreactores cerrados pueden mantenerse valores de densidad celular más elevados que en los abiertos, alcanzando mayor productividad que estos, aunque el coste de construcción, mantenimiento y operación de los sistemas cerrados son considerablemente mayores. Si bien, su utilización a escala industrial se justifica por la obtención de productos de alto valor añadido, como son los complementos nutricionales y alimenticios para el sector acuícola. Estos fotobiorreactores son sistemas flexibles que pueden ser optimizados de acuerdo con las características biológicas y fisiológicas de las algas cultivadas. Dependiendo de su forma o diseño este tipo de reactores ofrecen mejor control sobre las condiciones del cultivo y los parámetros de crecimiento (pH, temperatura, mezclado, CO₂ y O₂), prevenir la evaporación, reduce las pérdidas de CO₂, permite obtener una alta densidad de microalgas, y una mayor productividad volumétrica.

Todos los fotobiorreactores suelen tener el equipamiento necesario para el crecimiento de las microalgas: aireación, agitación e intercambio de gases, medio proporcionado a la velocidad adecuada, estabilización de pH, iluminación e intercambio de calor (Posten, 2009).

En Europa, en 1.999 se puso en marcha la primera planta de cultivo de microalgas (*Chlorella* sp.) a escala industrial en Klötze (Alemania). Dicha planta, con una superficie de 1,2 hectáreas, ha sido construida bajo invernadero y con reactores tubulares de vidrio. La biomasa producida es utilizada en el sector nutricional, puesto que *Chlorella* es un complemento alimenticio de gran consumo en los países asiáticos.

3.1 Tipos de fotobiorreactores cerrados

3.1.1 Cámara de microalgas

Son sistemas cerrados a pequeña escala, que lo que se hace es escalar una microalga para aumentar su volumen. Existen recipientes de tamaños y formas muy diversas, en los cuales se mantiene el cultivo en condiciones muy controladas de temperatura, luz, etc. La luz aplicada es artificial mediante tubos fluorescentes que permiten una distribución homogénea de luz y de la radiación ultravioleta, así como control de la temperatura ya que emiten poca cantidad de calor.

En función de las necesidades de cada tipo de cultivo se puede elegir diferentes tipos de materiales con distintas características de espectro lumínico, en la Imagen 6 se puede observar diferentes tipos de recipientes para escalar y mantener las diferentes tipos de microalgas.

Imagen 6. Diferentes fotografías de recipientes para producir microalgas en cámara. A. Conservación de cepas de microalgas. B y C matraces esféricos. D. tubos verticales con aireación. E y F, matraces de 5 L



3.1.2 Fotobioreactores

Un fotobioreactor es un sistema cerrado forzado al máximo para la obtención de un mayor crecimiento de la microalga que se quiere cultivar. Estos sistemas de fotobioreactores se caracterizan por el control y regulación de la mayoría de los parámetros de crecimiento de la microalgas (temperatura, CO₂, pH, etc.), así que a su vez se reducen el riesgo de contaminaciones y las pérdidas de CO₂. La luz no incide directamente en las células sino que atraviesa unas paredes transparentes para llegar a ellas. En estos fotobioreactores cerrados el intercambio de gases entre el cultivo y la atmósfera está muy limitado, y suele producirse acumulación de oxígeno en su interior que con un sencillo burbujeo de aire en el interior se libera.

Los fotobioreactores cerrados se pueden clasificar según su diseño y su modo de operación.

Desde el punto de vista del diseño se clasifican en:

- Planos o tubulares
- Horizontales, verticales, inclinados o espirales
- Serpentes (tubos acodados con circulación en serie)
- Múltiples (circulación en paralelo desde un colector repartidor a uno recogedor).

Desde el punto de vista del modo de operación se clasifican:

- Impulsado o agitados por aire o bombas
- Reactores de una fase (el intercambio de gases se realiza en una cámara separada).
- Reactores en dos fases, el intercambio de gases se realiza a lo largo de todo el reactor.

La elección del tipo de fotobioreactor debe realizarse haciendo un estudio previo de la especie a cultivar, donde se debe saber la resistencia de esa alga a las condiciones ambientales o hidrodinámicas, costes de operación, la necesidad de esterilidad, el valor del producto final y de la disponibilidad de recursos como el agua y suelo.

Los fotobioreactores cerrados que más se investigan y desarrollan para la producción comercial de microalgas son:

Columnas de burbujeo

Se trata de fotobioreactores tubulares consistentes en una columna vertical con un radio que puede oscilar entre 5 y 50 cm y una altura generalmente entre 1 a 4 m (Ugwu *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2012) en la cual la agitación y el intercambio de gases se realizan por la inyección de aire enriquecido en CO₂ por el fondo de la columna, lo cual implica una restricción de altura relacionada con la limitación en la transferencia de gases, así como con la resistencia de los materiales usados para la construcción de la columna (Imagen 7).

La ventaja que ofrece estos sistemas es que el oxígeno no se acumula en el medio debido a la aireación, disminuyendo, así como la fotooxidación (Molina *et al.*, 2010). Una de las desventajas de este sistema es que la posición vertical produce que la luz solar incida con un ángulo mayor y el ratio superficie/volumen es menor, aumentando la presencia de zonas oscuras (Acién *et al.*, 2013).

Imagen 7. Detalle de una columna de burbujeo para la producción de microalgas.



Fotobioreactores planos, inclinados o verticales

En estos reactores el cultivo está retenido entre dos láminas de un material transparente (bolsa de plástico en un marco metálico o láminas de cristal) (Acién *et al.*, 2013) verticales o inclinados. Por lo general tienen mezcla por aireación, aunque en algunos casos puede ser con una bomba e incluso pueden incluir sistema de refrigeración.

La relación superficie/volumen de estos fotobioreactores es muy grande, por lo que proporcionan una gran captación de luz. Así mismo, se puede mejorar la exposición a la energía solar variando la orientación del fotobiorreactor hacia el sol. Se ha comprobado que una orientación este-oeste es más favorable que norte-sur (Sierra, *et al.*, 2008). El espacio entre las láminas de acero suele ser entre 1 y 20 cm, y con una altura máxima de 2 m. Debido a que se busca el menor grosor del fotobioreactor, estos tienen la dificultad de la limpieza del reactor y los costes de construcción.

En la Imagen 8 se puede observar diferentes tipos de fotobioreactores planos en disposición vertical e inclinada para favorecer la exposición a la luz. También se puede observar en estos fotobioreactores problemas de ensuciamiento de la lámina de plástico por el cultivo.

Gracias a la aireación se produce la eliminación del O_2 producido por el cultivo y el aporte de CO_2 para la realización de la fotosíntesis.

Imagen 8. Varios tipos de fotobiorreactores planos de lámina de plástico con marco metálico. A, fotobiorreactor plano vertical. B y C, fotobiorreactor plano en disposición inclinado con orientación sur un solo módulo o varios acoplados



La principal desventaja de estos reactores es la adhesión de las células a la superficie del reactor, reduciendo la disponibilidad de luz, así como problemas en el escalado.

Existen otro tipo de fotobiorreactores planos desarrollados con el fin de aumentar la productividad: reactores "thin-layer", en los que las capas son muy finas y están muy cercanas para evitar fotoinhibición, reactores de bolsa sumergidos en piscinas, reactores con sistemas airlift, etc. (Acién *et al.*, 2013).

Fotobiorreactores tubulares

Este tipo de fotobiorreactores consisten en un tubo transparente adoptando distintas configuraciones (serpentín, espiral, horizontales, disposición vertical, etc.), en el cual el cultivo es propulsado por una bomba a lo largo de el y está unido a una columna de burbujeo que hará las funciones de degasificador para eliminar el exceso de O_2 producido por el cultivo (Camacho Rubio *et al.*, 1999).

Estos sistemas proporcionan un mayor ratio superficie/volumen que las columnas de burbujeo debido al pequeño diámetro y la gran longitud de los tubos.

En los fotobiorreactores tubulares horizontales, el ángulo de incidencia de la luz es el más adecuado para el crecimiento de la biomasa, pero provoca aumentos de temperatura, por lo que se debe contar con un buen sistema de refrigeración para mantener el cultivo en las condiciones óptimas (Molina *et al.*, 2011).

La principal limitación de este tipo de fotobiorreactores es la longitud y el radio del tubo. Longitudes demasiado grandes provocan una acumulación de O_2 que puede ser perjudicial para las células, generando fenómenos de fotooxidación, además, debido al consumo de CO_2 , la concentración de este en los extremos finales del tubo es menor, disminuyendo la actividad fotosintética del cultivo y por lo tanto, la productividad (Camacho Rubio *et al.*, 1999). En cuanto al radio, es necesario mantener el mínimo posible para disminuir al máximo la zona oscura central del tubo. Estos reactores presentan una desventaja y es que la bomba debe aplicar mucha potencia para mantener la turbulencia suficiente en el interior de tubo (Acién *et al.*, 2013).

El control de estos sistemas es mucho más sofisticado que en otros fotobiorreactores debido a la existencia de más variables de control, por lo general, la biomasa producida requiere unas condiciones más estrictas. Los principales elementos de control son el pH (relacionado con la disponibilidad de carbón), temperatura, oxígeno disuelto o disponibilidad de nutrientes, por lo que son necesarias sondas que registren todas estas variables para establecer el sistema de control. Ya que la longitud del tubo afecta de manera importante a la disponibilidad de carbono, los sensores de pH son fundamentales a lo largo del mismo, ya que las medidas tomadas determinaran si es necesaria o no la inyección de CO_2 para mantener unos niveles adecuados en el fotobiorreactor (Berenguel *et al.*, 2004).

En 2003 en la Estación Experimental de Cajamar se empezó a diseñar, construir y evaluar un primer prototipo de fotobioreactor para la producción de microalgas de alto valor, en un primer diseño este fue de tubo de metacrilato en disposición horizontal (Imagen 9 A). Posteriormente se mejoró ese diseño, sobretodo se mejoró el rendimiento por unidad de superficie, para ello se evaluó y construyó en 2006 un fotobioreactor vertical, para posteriormente construir una planta de 30 m³. Se trata de 10 fotobiorreactores tubulares con una capacidad de 3 m³ cada uno, situados dentro de un invernadero (Imagen 9 B, C y E). La productividad alcanzada por esta planta va de 7 a 10 toneladas de biomasa seca por año.

En todos los sistemas de producción ya sea abiertos o cerrados es necesario maximizar las producciones de microalgas, en los últimos años en la Estación Experimental se han desarrollado nuevos proyectos donde lo que se pretende es un análisis, estudio y aplicación de estrategias de modelado, control y optimización basadas en técnicas de control predictivo y estrategias de control basadas en eventos, con el objetivo de alcanzar una producción eficiente de biomasa de microalgas en fotobiorreactores de gran tamaño. En estos últimos años se han puesto en marcha varios proyectos junto con varios grupos de investigación la Universidad de Almería para estudiar y modelar reactores raceway y tubulares verticales cerrados, el objetivo que se persigue es el desarrollo de modelos matemáticos fiables sobre el comportamiento de fotobiorreactores destinados al cultivo de microalgas, con el fin de poder aplicarlos posteriormente en tareas de control avanzado. Estos modelos se basan tanto en los principios físico-químicos y biológicos de las microalgas, como el tipo de reactor, que nos permita predecir las variables más importantes que influyen sobre el crecimiento y comportamiento del cultivo en cualquier sistema de producción microalgal (pH, temperatura y oxígeno disuelto).

Imagen 9. Fotobiorreactores tubulares: horizontal (A) configuración vertical, (B y C) y detalle de la estructura del fotobiorreactor (C), localizado en la Estación Experimental de Cajamar.



Alicia M^a González Céspedes
FUNDACIÓN CAJAMAR - GRUPO COOPERATIVO CAJAMAR
aliciagonzalez@fundacioncajamar.com

4. BIBLIOGRAFÍA

- Acien, F. G., Fernández, J. M., & Molina, E. (2013). Photobioreactors for the production of microalgae. *Environmental Science Biotechnology*.
- Berenguel, M., Rodríguez, F., Acien, F. G., & García, J. L. (2004). Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control*, 14, 377-387.
- Borowitzka, M., 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology* 70, 313-321.
- Brenan, M.; Owende, P., 2010. Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing and extraction of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 557-577.
- Camacho Rubio, F., Acien Fernández, F. G., Sánchez Perez, J. A., García Camacho, F., & Molina Grima, E. (1999). Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnology and Bioengineering*, 62, 71-86.
- Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embiruçu, M., & Ghirardi, M. L. (2010). Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresour Technology*, 101, 1406-13.
- Lee, Y.K., 2001. Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential. *Journal of Applied Phycology*, 13 pp.307-15.
- Molina, E., Fernandez, J. M., & Acien, F. G. (2010). Microalgae, mass culture methods. In M. C. Flickinger (Ed.), *Encyclopedia of Industrial Biotechnology: Bioprocess, Bioseparation and Cell Technology*. John Wiley and Sons.
- Molina Grima, E., Fernández, J., Acien Fernández, F. G., & Chisti, Y. (2011). Tubular photobioreactor design for algae cultures. *Journal of Biotechnology*, 92, 113-131.
- Posten, C. (2009). Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering Life Science*, 9(3), 165-177.
- Richmond, A. (1990). Large scale microalgal culture and applications. En F. E. Round, & D. J. Chapman, *Progress in psychological research* (Vol. 7, págs. 269-330). Bristol: Briopress.
- Sierra, E., Acien, F. G., Fernández, J. M., García, J. L., González, C., & Molina, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, 138, 136-147.
- Ugwu, C.U., Aoyagi, H., (2008) Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology* 99, 4021-4028.
- Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*.