

AGITACIÓN Y TRANSFERENCIA DE MASA DE CO₂ EN FOTOBIORREACTORES TIPO AIRLIFT

AGITATION AND MASS TRANSFER OF CO₂ IN TYPE AIRLIFT PHOTOBIOREACTORS

Diego Rubio Fernández*
Heidy Liliana Moreno Saboya**

Recibido: 7 de agosto de 2017

Aceptado: 25 de septiembre de 2017

Resumen

La producción de biomasa a partir de microalgas en sistemas cerrados como los fotobiorreactores es función de diferentes factores: concentración de sustrato, pH, temperatura, aireación y agitación del medio de cultivo; este último es uno de los elementos más importantes porque tiene una influencia directa sobre la transferencia de masa. La incidencia de este factor en el diseño de fotobiorreactores es objeto de estudio en el presente artículo. Con el apoyo de la revisión bibliográfica, se encontró que la agitación que dispersa el CO₂ afecta la cantidad de burbujas, la retención del gas y el diámetro de burbuja. Estas condiciones para la producción en masa desarrollada en fotobiorreactores inciden directamente en el diseño, por lo que se han generado fotobiorreactores tipo *airlift*, que proponen, como primera medida, aumentar la retención del gas en tanto que disminuyen la relación de áreas en el equipo y, como segunda medida, promover la transferencia de masa en cuanto manejan tamaños de burbuja que aumentan el área de contacto entre las fases gas-líquido. Estos patrones para el diseño de los fotobiorreactores *airlift* buscan llevar la transferencia de masa a valores adecuados.

Palabras clave: diseño, fotobiorreactor *airlift*, microalgas, transferencia de masa.

Abstract

The production of biomass from microalgae in closed systems such as photobioreactors is a function of different issues: substrate concentration, pH, temperature, aeration and agitation of the growth medium; the latter is one of the most important elements because it has a direct influence on mass transfer. The impact of this factor on the design of photobioreactors is the object of study in this article. With the support of the bibliographic review, it found that the agitation that disperses the CO₂, affects the number of bubbles, the retention of gas and the diameter of the bubble. These conditions, for mass production developed in photobioreactors directly, have an impact on the design, for which photobioreactors type airlift have been generated, that proposes, as a first step, increasing the retention of gas whilst decrease the relation of areas on the equipment and as a second step, promoting the transfer of mass regarding the handling of bubble sizes that

* Biólogo, magíster en Ciencias, estudiante del Doctorado en Biotecnología (Universidad Nacional de Colombia). Profesor investigador, grupo de investigación BiotecFua, línea de investigación Biotecnología con Algas, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-0760-9567>. diego.rubio@profesores.uamerica.edu.co

** Estudiante de Ingeniería Química, grupo de investigación BiotecFua, línea de investigación Biotecnología con Algas, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. heidy.moreno@estudiantes.uamerica.edu.co

increase the contact area between the gas-liquid phases. These patterns for the design of the airlift photobioreactors seek to carry out the mass transfer to appropriate values.

Keywords: design, airlift photobioreactor, Microalgae, mass transfer.

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son en la actualidad objeto de investigación por su capacidad de producción de lípidos necesarios para la obtención de biodiesel (Chisti, 2007), azúcares para la síntesis de bioetanol y una serie de compuestos de interés farmacéutico, entre los que se encuentran los carotenoides. Las microalgas usan como fuente de carbono y sustrato el dióxido de carbono (CO_2), del que depende, junto con el suministro de luz, el crecimiento de biomasa. Considerando estas características podría afirmarse que la producción de biomasa a partir de microalgas puede vincularse a los procesos de captura de CO_2 proveniente de fuentes industriales.

Para todos los procesos de producción de biomasa microalgal y sus metabolitos asociados (como lípidos y azúcares) a partir de captura de CO_2 , el diseño de fotobiorreactores (FBR) es un paso fundamental. Es aquí donde se debe tener en cuenta el factor agitación para lograr una buena distribución y absorción del CO_2 , que a su vez está relacionado con aspectos como la transferencia de masa de CO_2 al cultivo (Falinski, 2009).

Los FBR tipo *airlift* tienen un buen desempeño con respecto a la transferencia de masa, de tal manera que desde la etapa de diseño del equipo y el difusor se promueve la retención del gas y el contacto entre las fases gas-líquido (burbuja-medio de cultivo); parámetros que se encuentran relacionados con el coeficiente de transferencia de masa $k_L a$, fundamental en el proceso de producción de microalgas.

Esta revisión bibliográfica presenta algunas propiedades que son consideradas en el diseño de FBR tipo *airlift* conforme a la agitación y que son relevantes en la productividad y rendimiento del proceso. En el artículo se demuestra, por un lado, la incidencia que tiene la modificación de áreas en el reactor sobre la retención de gas, y por otro, el efecto de los aspersores en el tamaño de burbuja; parámetros que, en suma, afectan la transferencia de masa característica en este tipo de equipos.

RESULTADOS

Cultivos microalgales y consumo de CO_2

De acuerdo con el tipo de sustrato utilizado y la fuente energética, el metabolismo de las microalgas se puede clasificar en fotoautotrófico, heterotrófico y mixotrófico (Arias, Martínez, y Cañizares, 2013; Hernández, Sol y Franco, 2014); este criterio hace posible la diferenciación y aplicación de cepas para su uso en determinados tipos de proceso. La clasificación de las microalgas según su metabolismo se presenta en la figura 1.

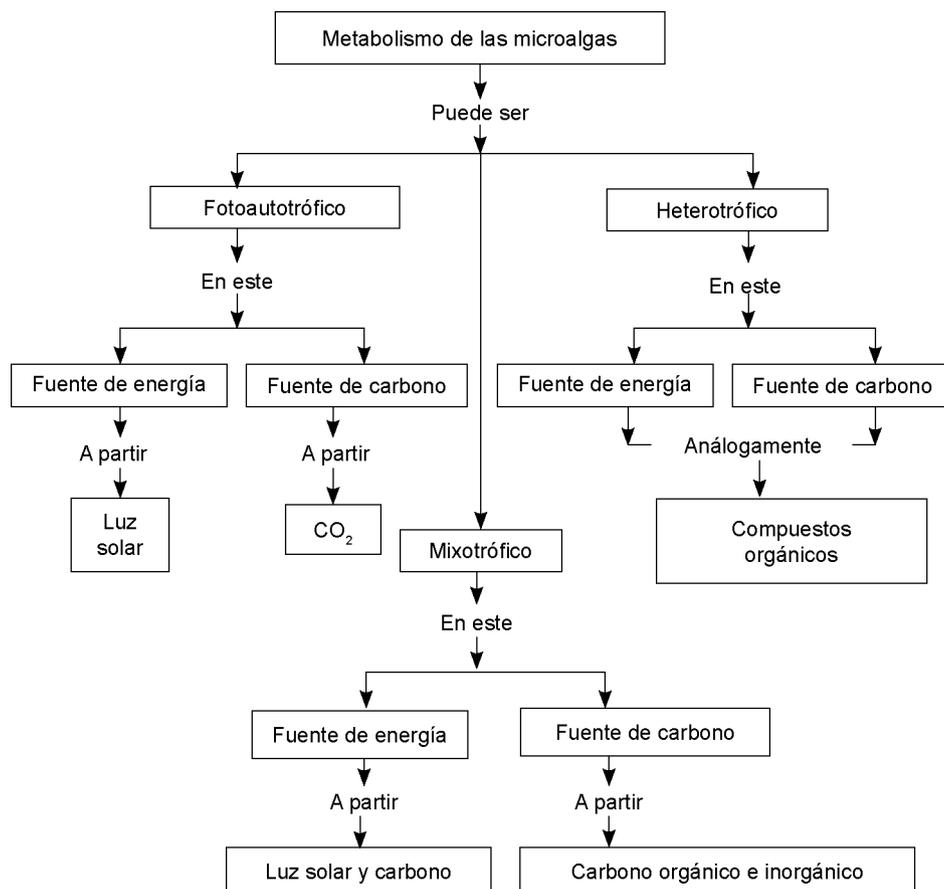


Figura 1. Fuente de carbono según metabolismo de la microalga.

Fuente: basado en Arias et ál. (2013).

Se pueden encontrar dos fuentes de carbono: inorgánica (CO₂) u orgánica (glucosa, glicerol, acetato, fructosa entre otras), de las que se obtiene la energía química mediante la fotosíntesis, además de la necesidad de luz solar o carbono orgánico para desarrollar la actividad fotosintética. Como se explicó, existen tres tipos de metabolismos: a) fotoautotróficos, las microalgas utilizan luz solar como fuente de energía, además de utilizar CO₂ como fuente de carbono (Huang, Chen, Wei, Zhang y Chen, 2010); b) heterotróficos, las microalgas utilizan solo compuestos orgánicos como fuente de carbono y energía (Chojnacka, 2004), y c) mixotróficos, la microalga utiliza carbono orgánico e inorgánico como fuente de carbono y capta la luz solar o utiliza fuente de carbono orgánico como fuente de energía (Chen et ál., 2011; Arias et ál., 2013).

Las microalgas con metabolismo fotoautotrófico tienen ventaja sobre las de metabolismo heterotrófico y mixotrófico porque generan beneficio ambiental por fijación de CO₂, además de que pueden crecer en aguas residuales y reciclar nutrientes presentes en el agua (García, 2010; Kim, 2015; Raeesossadati, Ahmadzadeh, McHenry y Moheimani, 2014; Bajpai, Aleš y Zappi, 2015). Varios análisis químicos verificaron que bajo metabolismo fotoautotrófico se produce 1 kg de biomasa (compuesta entre un 40 % y 50 % de carbono) a partir de 1.5 kg a 2 kg de CO₂, que entra por difusión pasiva a la célula (Mazzuca, García, Camacho, Ación y Molina, 2000).

Sin embargo, la disponibilidad de nutrientes es una restricción en la producción industrial de microalgas (Kim, 2015). La producción a gran escala de microalgas fotoautotróficas comúnmente es

desarrollada en sistemas abiertos (estanques de conductos, estanques circulares, estanques poco profundos y estanques profundos), así como en sistemas cerrados, denominados fotobiorreactores.

Fotobiorreactores

Un proceso que se desarrolla con organismos vivos y donde se obtienen cambios físicos o químicos es un bioproceso (Patil y Bidar, 2007). Este proceso implica el diseño de biorreactores donde se monitorean y controlan las condiciones necesarias para el crecimiento y generación de productos de interés a partir de microorganismos.

El diseño de cada biorreactor busca minimizar costos del producto relacionados con el tiempo de producción y la calidad deseada, esto dentro de las limitaciones biológicas y tecnológicas (Straathof y Adlercreutz, 1994).

Un fotobiorreactor es un biorreactor especial diseñado para la aplicación de procesos relacionados con microorganismos fotoautotróficos, por lo que se encuentra compuesto de una fuente de luz y sistemas para manejo de aire, intercambio de gases y nutrientes. También se compone de subsistemas (como sensores de O_2 , CO_2 , pH y temperatura), válvulas de inyección de CO_2 , válvulas de circulación y sistemas de liberación de O_2 (Lopez y Rojas, 2010).

En la actualidad existen diversas configuraciones de FBR, entre las que se encuentra el FBR tipo *airlift*. Este FBR se caracteriza por tener una alta eficiencia energética (Lobatón, 2010) y una capacidad de mezclado que genera una alta transferencia de masa (Choi, 2001; Ugwu, Aoyagi y Uchiyama, 2008; Moo-Young, 2011). Además, los FBR tipo *airlift* se identifica por lograr una evidente disminución de esfuerzos cortantes; particularidad que evita el daño celular (Molina et ál., 1994).

El FBR tipo *airlift* está conformado por cuatro secciones: cubierta, base, *downcomer* y *riser* (Cruz, 2014; Cortés, Rubio y Gómez, 2013) (ver figura 2).

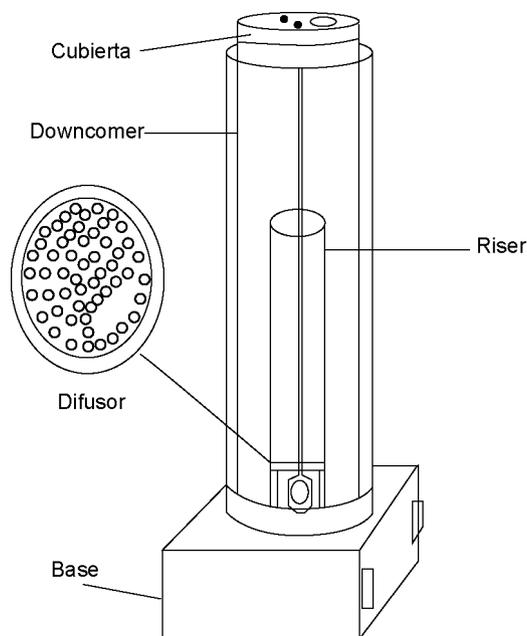


Figura 2. Esquema de un FBR tipo ARL.

Fuente: basado en Cruz y Poveda (2014).

El CO₂ ingresa en cierto porcentaje con aire al difusor ubicado en la parte inferior. Estos gases entran en contacto con el medio de cultivo en forma de burbujas que ascienden a través del *riser* (sección interna), generando turbulencia en el medio (lo que afecta los periodos luz/oscuridad a los que se expone cada célula) y una distribución uniforme de nutrientes (Ying, Al-mashhadani, Hanotu, Gilmour y Zimmerman, 2013; Lozano, 2012). Por lo tanto, el ingreso de CO₂ en forma de burbujas asegura una distribución de gases y luz mediante el proceso denominado agitación neumática (Monkonsit, Powtongsook y Pavasant, 2011; Pandey, Lee, Chisti y Soccol, 2014).

En la sección exterior (conocida como *downcomer*) el medio de cultivo que proviene del *riser* desciende para entrar de nuevo en contacto con las burbujas generadas por el difusor (Pruvost, Leborgne, Cornet y Legrand, 2016). El mecanismo entre el *riser* y el *downcomer* es lo que mejora en primera medida la transferencia de calor y masa en esos fotobiorreactores (Sherif, Goswami, Stefanakos y Steinfeld, 2014; Merchuk y Gluz, 1999).

Transferencia de masa en FBR

La transferencia de masa por difusión de CO₂ en el caldo de cultivo determina la productividad y el rendimiento, debido a que la alta difusividad aumenta el metabolismo de las algas, pues se mejora la distribución de nutrientes (Cicci, Stoller, Moroni y Bravi, 2015; Ramírez, Queiroz, L., y Jacob-Lopes, 2013). Se entiende productividad como la máxima cantidad de biomasa obtenida por día (o por año) por unidad de área (Gutiérrez y Guzmán, 2016); por otro lado, se define el rendimiento como la cantidad de dióxido de carbono que efectivamente se convierte en biomasa (Ying et ál., 2013; Zhang, Kurano y Miyachi, 2002).

La importancia de la transferencia de masa en el bioproceso radica en que de esta depende que el CO₂ ingrese a la célula y pueda ser metabolizado para la producción de biomasa.

Una explicación de la transferencia de masa sobre la difusión del dióxido de carbono en el cultivo, desde la fase gaseosa hasta la microalga, se encuentra en la teoría de la doble película (Carvalho y Malcata, 2001). Según esta teoría, el CO₂ se difunde desde la inyección del gas enriquecido hacia la fase líquida, principalmente H₂O, en donde se puede llevar a cabo la reacción entre el H₂O y el CO₂ para producir un ácido diprótico. Ese CO₂ disuelto en H₂O entrará por difusión pasiva a la célula de la microalga para participar de la fotosíntesis y de la fase oscura del ciclo de Calvin, en el que se le fijarán carbonos a esta molécula para producir azúcares (Thangavel y Sridevi, 2015). Esta teoría se puede apreciar claramente en la figura 3.

Esta teoría es importante y es el fundamento de los procesos biotecnológicos microalgales que buscan, por ejemplo, capturar CO₂ de forma más eficiente, como el proyecto propuesto por Sebestyén et ál. (2013). Este proyecto, basado en una tecnología de biopelícula, usa un sistema de reactor de disco rotatorio, en el que las microalgas pueden ser cultivadas en superficies biocompatibles y, por lo tanto, el CO₂ será capturado desde la fase gaseosa directamente o desde la fase líquida después del burbujeo. Este método aumenta notablemente el rendimiento y disminuye la cantidad de agua necesaria para el proceso.

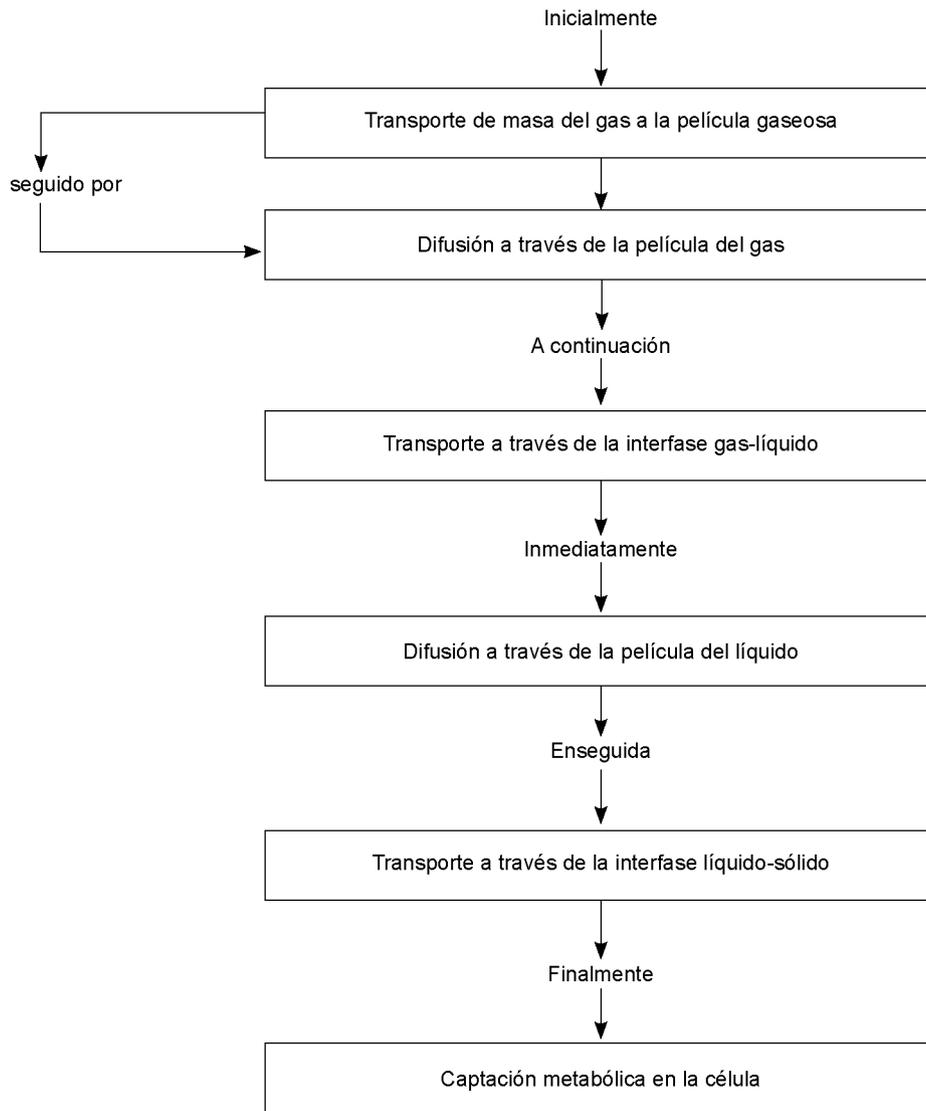


Figura 3. Esquema de etapas secuenciales en la teoría de la doble película.

Fuente: basado en Carvalho y Malcata (2001).

La transferencia de masa y el $k_L a$

La disponibilidad de CO_2 se pueda analizar desde la escala microscópica hasta la escala macroscópica, así como se observa en la figura 4.

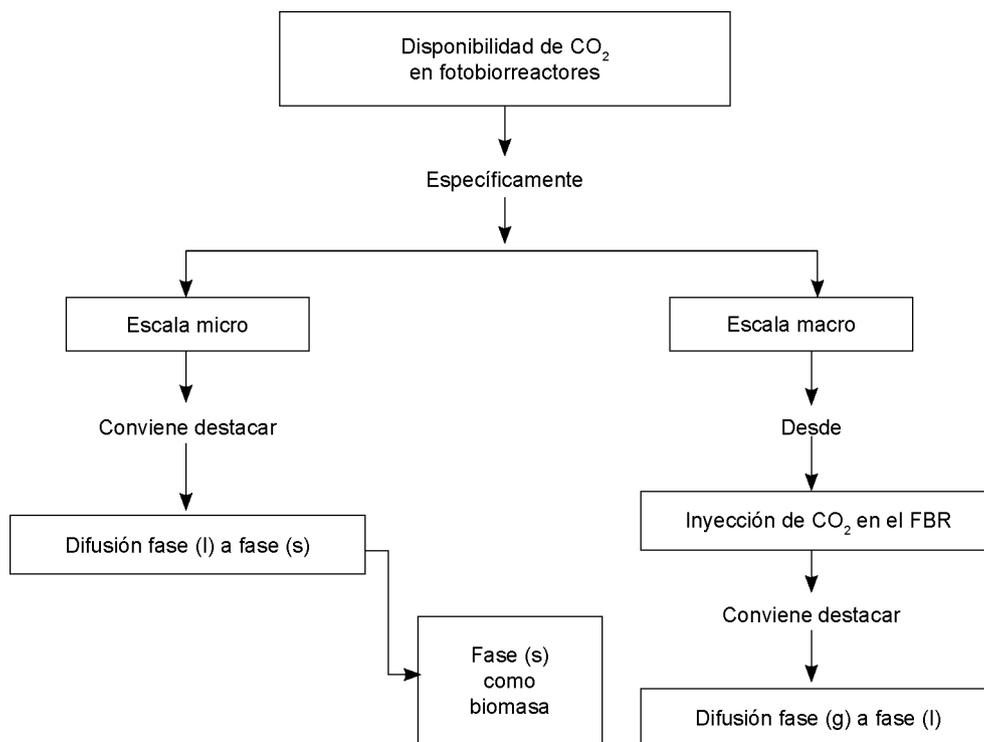


Figura 4. Esquema de disponibilidad de CO₂ en FBR.

Fuente: basado en Ying (2013).

A escala microscópica, la célula mediante transporte pasivo consume el CO₂ disuelto en fase líquida, que es metabolizado para incrementar la biomasa. Por otro lado, a escala macroscópica, se tiene en cuenta la inyección del CO₂ a través del difusor, lo que genera burbujas que entran en contacto con el medio de cultivo en fase líquida. Debido a la baja solubilidad del CO₂ en H₂O, esta etapa es considerada como la de mayor resistencia a la transferencia de masa de CO₂ para el aprovechamiento por parte de la microalga, por lo que es necesario determinar la transferencia de masa entre las fases gaseosa y líquida a partir del $k_L a$. Este coeficiente indica la concentración de dióxido de carbono disponible para el cultivo, factor que es fundamental en el proceso de producción de microalgas (Burns, 1993).

Dentro de los factores que definen el $k_L a$ se encuentran el tiempo de retención y el tamaño de la burbuja. El primero se califica como el tiempo en el que permanece la burbuja dentro del fotobiorreactor; este factor es necesario para que la difusión a través de la interfase gas-líquido se lleve a cabo (Pirouzi, Nosrati, Shojaosadati y Shakhesi, 2014; Acosta-Ramírez et ál., 2010). El segundo factor se relaciona con la dimensión de la burbuja; factor que incide en el área de contacto entre el gas y el líquido, lo cual afecta directamente la difusión de CO₂ al medio de cultivo (Molina, Acien, García y Chisti, 1999; Ying et ál., 2013; Barrut, Blancheton, Champagne y Grasmick, 2012). Este último elemento depende del tamaño de los aspersores en el difusor (Ezzi y Najmuldeen, 2014).

De esto se obtiene que la transferencia de masa del CO₂ afecta el diseño del FBR, tanto del difusor que genera un tamaño de burbuja específico, así como la relación del *downcomer* y *riser* que afecta el tiempo de ascenso de la burbuja (Molina et ál., 1994) (ver figura 5).

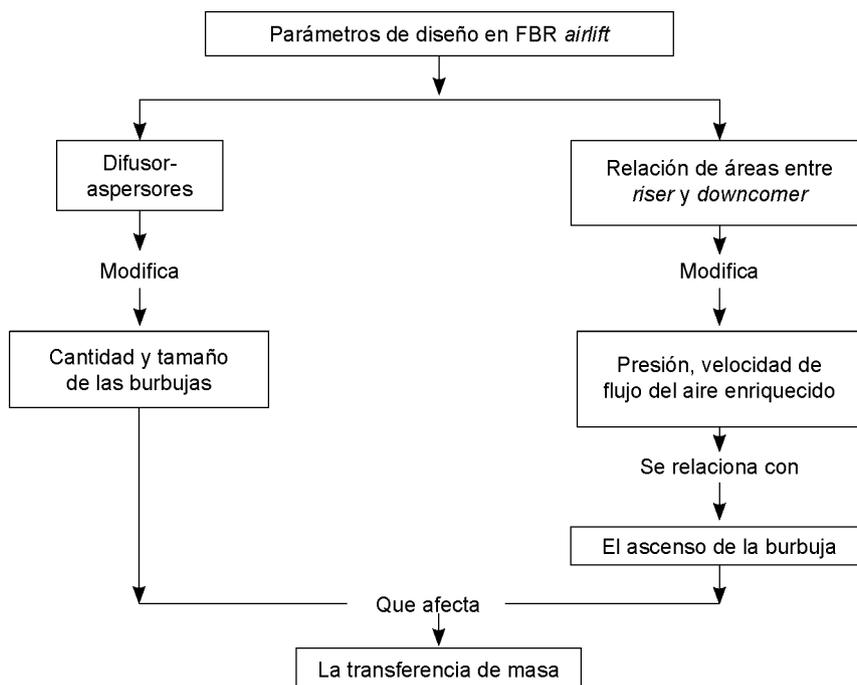


Figura 5. Esquema relación transferencia de masa con el diseño de FBR.

Fuente: basado en Molina et ál. (1994).

En el caso del difusor, una cantidad de aspersores y diámetros inadecuados afecta el consumo que pueda realizar la microalga de la burbuja (Lee, 2011). De hecho, si una burbuja es muy pequeña, solo se genera la flotación de las algas con poco aprovechamiento del CO_2 ; por el contrario, si el tamaño de la burbuja es muy grande, causa la muerte de estas (Gaitero, 2012). Igualmente, el caudal con el que se inyecta el aire al difusor afecta la velocidad de ascenso y, a su vez, influye en los requerimientos energéticos del FBR (Barbosa, 2003). Según las fuentes bibliográficas consultadas, los tamaños de burbuja entre 2-10 mm son adecuados para fotobiorreactores tipo *airlift* (Deng, Wang, Zhang y Wang, 2014). Por otro lado, para alcanzar una mayor transferencia de masa se recomienda reducir el tamaño de la burbuja, porque esto es más prometedor que aumentar el caudal con el que ingresa el aire enriquecido al FBR, lo que representa un menor gasto económico y energético al momento de su operación (Ying et ál., 2013).

Respecto a la relación de las áreas del *riser* y el *downcomer* que afecta el desplazamiento y ascenso que debe llevar la burbuja, se ha comprobado que la transferencia de CO_2 es casi despreciable en el *downcomer*, debido a la baja velocidad del medio de cultivo en esta zona respecto a la zona interna (Moo-Young, Chisti y Kasper, 1990; Asenjo y Merchuk, 1995; Contreras, Chisti y Molina Grima, 1998; Sánchez, García, Contreras, Molina y Chisti 2000; Jones y Heindel, 2010). En esta medida, es posible suponer que la transferencia de masa dependerá mayoritariamente del flujo de gas en el *riser*.

Según esta suposición, el área del *riser* debe ser superior a la del *downcomer* para que se realice una muy buena transferencia que promueva un mayor tiempo de retención, puesto que al aumentar el diámetro del *riser* el líquido que desciende por el *downcomer* también se ve incrementado y, por lo tanto, más burbujas son atrapadas en el flujo líquido (Calvache, 2002), lo que permite, a su vez, mantener el FBR muy bien agitado.

Se encuentra en literatura que en la relación de áreas entre *riser* y *downcomer* [A_d/A_r] ($[A_d]$ es el área del *downcomer* y $[A_r]$ es el área del *riser* (Sierra, Ruiz, Rubio y Sandoval, 2014), la mayor parte del tiempo es menor a 1 y rara vez mayor a 1 (Ghosh, Bhattacharyya y Kim, 2010), por lo que se trata de mantener una alta transferencia de masa, como se explicó anteriormente. La figura 6 presenta el efecto de la relación de áreas (en función del volumen de dispersión) en la retención del gas [ϵ_R] para el *riser*, evidenciando que la retención del gas incrementa con el descenso en la relación de áreas.

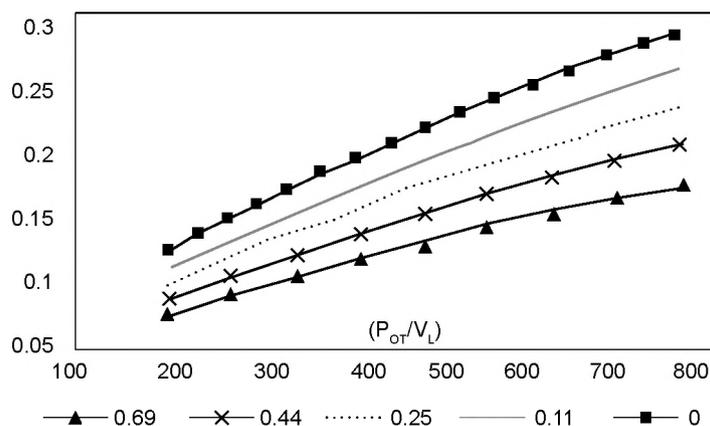


Figura 6. Variación en la retención del gas por efecto de la relación de áreas en un FBR *airlift*.

Fuente: adaptado de Calvache (2002).

Es así como el desarrollo de la transferencia de masa en los reactores tipos *airlift* tiene un efecto significativo sobre el rendimiento, puesto que mejora el tiempo de permanencia del gas para que se lleve la transferencia de masa de la película de gas al líquido.

CONCLUSIONES

Según la revisión bibliográfica, la agitación relacionada con las burbujas influye sobre el $k_L a$; factor del que depende la transferencia de masa de CO₂ desde la fase gaseosa a la fase líquida, que es la que ofrece la mayor resistencia al paso del gas a la célula y afecta el metabolismo y crecimiento de la microalga.

Se determinó que con un buen sistema de agitación se incrementa el tiempo de retención del gas de las burbujas de CO₂ y, por lo tanto, se modifica el coeficiente de transferencia de masa. En los fotobiorreactores tipo *airlift*, que se caracterizan por dar prelación a la transferencia de masa, se aumenta la retención del gas con la modificación del *riser* y *downcomer* respecto a la relación de áreas; de esto se advierte que es necesario controlar la proporción [A_d/A_r] y de esta forma aumentar el coeficiente de transferencia de masa y la concentración del cultivo. A su vez, se estableció la importancia de dar prelación a la cantidad y tamaño de los aspersores en el difusor, para evitar tamaños inadecuados que desde la generación de la burbuja perjudiquen el aprovechamiento que pueda obtener la microalga del CO₂.

REFERENCIAS

Acosta-Ramírez, D., Ac-Novelo, F., García-Ake, J., Pech-Rojas, J., Ordaz-cortés, A., Lizardi-Jiménez, M., Zárate-Segura, P., y Reina-Valverde, R. (2010). Mixing time and gas hold-up

- of a double-riser rectangular airlift photobioreactor with off-centered diffuser. Poster presentado en *XVII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, Cancún, México.
- Arias, M., Martínez, A., y Cañizares, R. (2013). Producción de biodiesel a partir de microalgas. *Acta Biológica Colombiana*, 18(1), 43-68.
- Asenjo, J., y Merchuk, J. (1995). *Biorreactor system design*. EE. UU.: Marcel Dekker.
- Bajpai, Aleš, y Zappi, M. (Eds.). (2015). *Algal biorefineries (Springer)*. EE. UU.: Springer.
- Barbosa, M. (2003). *Microalgal photobioreactors: scale-up and optimisation* (tesis de doctorado). Universidad de Wagenigen, Wagenigen, Países Bajos.
- Barrut, B., Blancheton, J., Champagne, J., y Grasmick, A. (2012). Water delivery capacity of a vacuum airlift application to water recycling in aquaculture systems. *Aquacultural engineering*, 48, 31-39.
- Burns, A. (1993). *Photobioreactor design for improved energy efficiency of microalgae production*. (tesis de maestría). California Polytechnic State University, California, EE. UU.
- Calvache, J. A. (2002). *Simulación de biorreactores*. (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Carvalho, A., y Malcata, F. (2001). Transfer on carbon dioxide within cultures of micro algae: Plain bubbling versus hollow-fibre modules. *Biotechnology Progress*, 17(2), 265-272.
- Chen, M., Tang, H., Ma, H., Holland, T., Simon, K. y Salley, S. (2011). Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresour Technolgy*, 102(2) 1649-1655.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294-306. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Choi, K. (2001). Hydrodynamic and mass transfer characteristics of external-loop airlift reactors without an extension tube above the downcomer. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 18(2), 240-246.
- Chojnacka, K., y Márquez-Rocha, F. (2004). Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae. *Biotechnology*, 3(1), 21-34.
- Cicci, A., Stoller, M., Moroni, M., y Bravi, M. (2015). Mass transfer, light pulsing and hydrodynamic stress effects in photobioreactor development. *Chemical Engineering Science*, 43, 235-240. <http://doi.org/10.3303/CET1543040>
- Contreras, A., Chisti, Y., y Molina, E. (1998). A reassessment of relationship between riser and downcomer gas holdups in airlift reactors. *Chemical Engineering Science*, 53(24), 4151-4154. [http://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00230-9](http://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00230-9)
- Cortés, F., Rubio, D., y Gómez, E. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrodinámicos y cinéticos para fotobiorreactores airlift. *Itecné*, 10(1), 57-66.
- Cruz, A., y Poveda, J. (2014). *Implementación de la mejora operacional del fotobiorreactor Airlift para la producción de biomasa microalgal* (tesis de pregrado). Fundación Universidad América, Bogotá, Colombia.

- Deng, Z., Wang, T., Zhang, N., y Wang, Z. (2014). Gas holdup, bubble behavior and mass transfer in a 5 m high internal-loop airlift reactor with non-Newtonian fluid reactor with non-Newtonian fluid. *Chemical Engineering Journal*, 160(2), 729–737. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.078>
- Ezzi, A., y Najmuldeen, G. (2014). Gas hold-up, mixing time and circulation time in internal loop airlift bubble column. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(1), 286–294.
- Falinski, K. (2009). *Effects of Different Aeration Conditions on Isochrysis* (tesis de maestría). Universidad de Cornell, Nueva York, EE. UU.
- Gaitero, A. (2012). Diseño de un prototipo de fotobiorreactor para el cultivo de *Spirulina Platensis*. Oviedo, España: Conama.
- García, M. (2010). *Captura de CO₂ mediante algas* (tesis de pregrado). Escuela Superior de Ingenieros Agronomos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Ghosh, T., Bhattacharyya, D., y Kim, T. (2010). Effect of fractional gas hold-up (ϵ_G) on volumetric mass Transfer coefficient ($k_L a$) in modified airlift contactor. *International Journal of Advanced Science and Thecnology*, 16, 21–30.
- Gutiérrez, C., y Guzmán, D. (2016). *Propuesta de diseño de un sistema continuo para un fotobiorreactor air-lift a escala laboratorio* (tesis de pregrado). Fundación Universidad America, Bogotá, Colombia.
- Hernández, C., Sol, M., y Franco, M. (2014). Estimación de iluminación en un fotobiorreactor productor de biomasa a partir de microalgas. *Conciencia Tecnológica*, 47, 29–35.
- Huang, G., Chen, F., Wei, D., Zhang, X, y Chen, G. (2010). Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied energy*, 87(1), 38–46.
- Jones, S., y Heindel, T. (2010). Hydrodynamic considerations in an external loop airlift reactor with a modified downcomer. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(4), 1931–1936. <http://doi.org/10.1021/ie901311r>
- Kim, S.-K. (Ed.). (2015). *Handbook of marine microalgae. Biotechnology advances*. Korea del Sur: Elsevier.
- Lee, C.-H. (2011). *Dynamics of bubble size distribution and wall pressure fluctuations in airlift fermentors* (tesis de maestría). Universidad de Kansas, EE. UU.
- López, F., y Rojas, R. (2010). *Diseño y montaje de un fotobiorreactor a escal laboratorio para la producción de microalgas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Lobatón, H. (2010). *Simulación de los ciclos de luz y oscuridad en un fotobiorreactor tipo columna de burbujeo usando CFD* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Lozano, V. (2012). *Novedoso fotobiorreactor para el cultivo masivo de microalgas*. Recueprado de <https://sgitt-otri.ua.es/es/empresa/documentos/ot-1302-fotobiorreactor.pdf>
- Mazucca, T., García, F., Camacho, F., Ación, F., y Molina, E. (2000). Carbon dioxide uptake efficiency by outdoor microalgal cultures in tubular airlift photobio-reactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 67(4), 465–475. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(20000220\)67:4<465::AID-BIT10>3.0.CO;2-9](http://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(20000220)67:4<465::AID-BIT10>3.0.CO;2-9).

- Merchuk, J., y Gluz, M. (1999). Bioreactors, air-lift reactors. *Encyclopedia of Bioprocess Technology*. <http://doi.org/10.1002/0471250589.ebt029>
- Molina, E., Acien, F., García, F., y Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Journal of Biotechnology*, 70(1-3), 231-247. [http://doi.org/10.1016/S0079-6352\(99\)80118-0](http://doi.org/10.1016/S0079-6352(99)80118-0)
- Molina, E., García, F., Sánchez, J., Fernández, J., Acien, F., y Contreras, A. (1994). A mathematical model of microalgal growth in light-limited chemostat culture. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 61(2), 167-173.
- Monkonsit, S., Powtongsook, S., y Pavasant, P. (2011). Comparison between airlift photobioreactor and bubble column for *Skeletonema costatum* cultivation. *Engineering Journal*, 15(4), 53-64. <http://doi.org/10.4186/ej.2011.15.4.53>
- Moo-Young, M. (Ed.). (2011). *Comprehensive Biotechnology* (2ª edición). Canadá: Pergamon.
- Moo-Young, M., Chisti, Y., y Kasper, M. (1990). Mass transfer in external-loop airlift bioreactors using static mixers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68(1), 45-50. <http://doi.org/10.1002/cjce.5450680106>
- Pandey, A., Lee, D-J, Chisti, Y., y Soccol, C. (Eds.). (2014). *Biofuels from algae*. EE. UU.: Elsevier.
- Patil, C., y Biradar, P. (2007). *Biotechnology*. New Delhi: A P H Publishing corporation.
- Pirouzi, A., Nosrati, M., Shojaosadati, S., y Shakhshi, S. (2014). Improvement of mixing time, mass transfer, and power consumption in an external loop airlift photobioreactor for microalgae cultures. *Biochemical Engineering Journal*, 87, 25-32. <http://doi.org/10.1016/j.bej.2014.03.012>
- Pruvost, J., Le borgne, F., Cornet, J., y Legrand, J. (2016). Photobioreaction Engineering. *Advances in Chemical Engineering-Elsevier*, 48, 296.
- Raesossadati, M., Ahmadzadeh, H., McHenry, M., y Moheimani, N. (2014). CO₂ bioremediation by microalgae in photobioreactors: impacts of biomass and CO₂ concentrations, light, and temperature. *Algal Research*, 6(A), 78-85.
- Ramírez, L., Queiroz, L., y Jacob-Lopes, E. (2013). Fotobiorreactor: herramienta para cultivo de cianobacterias. *Ciencia y Tecnología*, 6(2), 9-19.
- Sánchez, A., García, F., Contreras, A., Molina Grima, E., y Chisti, Y. (2000). Bubble-column and airlift photobioreactors for algal culture. *AIChE Journal*, 46(9), 1872-1887. <http://doi.org/10.1002/aic.690460915>
- Sherif, S., Goswami, D., Stefanakos, E., y Steinfeld, D. (2014). *Handbook of hydrogen energy*. EE. UU.: CRC Press.
- Sierra, J., Ruiz, S., Rubio, D., y Sandoval, J. (2014). Diseño de un fotobiorreactor airlift a escala de banco. *Elementos*, 4(4), 123-143.
- Straathof, A., y Adlercreutz, P. (Ed.). (1994). *Applied Biocatalysis*. Gran Bretaña: Harwood Academic Publishers.
- Thangavel, P., y Sridevi, G. (Eds.). (2015). *Environmental sustainability: role of green technologies*. India: Springer.
- Ugwu, C., Aoyagi, H., y Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresour Technology*, 99(10), 4021-4028.

- Ying, K., Al-mashhadani, M., Hanotu, J., Gilmour, D., y Zimmerman, W. (2013). Enhanced Mass Transfer in Microbubble Driven Airlift Bioreactor for Microalgal Culture. *Engineering*, 5(9), 735-743.
- Zhang, K., Kurano, N., y Miyahci, S. (2002). Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor. *Bioprocess and biosystems engineering*, 25(2), 97-101.

GLOSARIO

Aspersor. Orificios dentro del difusor que forman el tamaño de la burbuja.

Difusor. Dispositivo perforado que genera burbujas dentro del fotobiorreactor como mecanismo de agitación.

Downcomer. Sección externa de los fotobiorreactores tipo *airlift* que contiene una muy baja cantidad de gas respecto al *riser*.

FBR tipo airlift. Tipo de configuración sobre un fotobiorreactor que se caracteriza por dar prelación a la transferencia de masa en su diseño. Se encuentra conformado por cuatro secciones específicas.

Gas enriquecido. Mezcla de CO₂ con aire. La concentración de CO₂ con la que se mezcla depende del tipo de metabolismo del microorganismo.

Raceways. Estanque artificial que se encuentra expuesto al aire libre y es usado para cultivo de microalgas.

Riser. Sección interna de los fotobiorreactores tipo *airlift* por donde es inyectado el gas.

