

USO POTENCIAL DE MICROALGAS PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO

POTENTIAL USE OF MICROALGAE TO MITIGATE THE EFFECTS OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS

Juan Sandoval Herrera*
Diego Rubio Fernández**

Recibido: 14 de agosto de 2017

Aceptado: 11 de septiembre de 2017

Resumen

Una de las alternativas para controlar o reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera es emplear el cultivo de microalgas. Este trabajo presenta una revisión de resultados del uso de microalgas; además, describe las características de las especies y otros factores que pueden influir en el proceso. Finalmente, se realiza una comparación con los resultados obtenidos con especies mayores y con otras técnicas como la adsorción. El objetivo de esta revisión es resaltar el uso potencial de las microalgas para reducir las emisiones de CO₂. Se encontró que si se controlan adecuadamente factores como la concentración inicial del gas, la iluminación y la temperatura, el uso de las microalgas es altamente efectivo para capturar y remover el CO₂.

Palabras clave: emisiones de CO₂, energías alternativas, microalgas, producción de biomasa, contaminación atmosférica.

Abstract

One of the alternatives to control or reduce CO₂ emissions in the atmosphere is to implement microalgae culture. This paper presents a review of the results of the use of microalgae; also, describes the characteristics of the species and other factors that may influence the process. Finally, a comparison with the results obtained with larger species and with different techniques such as adsorption is made. The objective of this review is to highlight the potential use of microalgae to reduce CO₂ emissions. It was found that if factors such as initial gas concentration, illumination, and temperature are appropriately controlled, the use of microalgae is highly effective in capturing and removing CO₂.

Keywords: CO₂ emissions, alternative energies, microalgae, biomass production, atmospheric pollution.

* Ingeniero químico, magíster en Formulación y Tecnología del Producto. Docente investigador, Programa de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-8957-1421>. juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

** 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

INTRODUCCIÓN

Los métodos para reducir o controlar las emisiones de CO₂ son muy variados. González-López, Ación, Fernández-Sevilla y Molina (2011) dividen estos métodos según los procesos de captura, almacenamiento, reutilización y técnicas energéticas.

La *captura* se puede realizar por medios físicos, químicos y biológicos (Zhou et ál., 2017). La decarbonización del combustible previa a su uso (Fiaschi, Gamberi, Bartlett y Griffin, 2005) es una técnica de captura precombustión. El empleo de membranas para separar el CO₂ de los gases de salida de un horno es una técnica de captura poscombustión (Ghezel-Ayagh, Jolly, Patel y Steen, 2017). El *almacenamiento* puede ser geológico, oceánico o en pozos de petróleo vacíos. Dentro de esta categoría se incluye el uso de carbón vegetal para enmienda del suelo (Mulabagal, Baaha, Egieborb y Chenb, 2015). La *reutilización* incluye el uso del CO₂ para ayudar a la extracción mejorada del petróleo o la conversión bioquímica en la producción de biomasa. Rahman et ál. (2017) llaman a esta categoría simplemente “utilización”, y recalcan el poco énfasis que se les ha dado a estas técnicas. Una forma de reutilización es el uso biológico como fuente para producir biomasa a partir de algas marinas macroscópicas (Sondak et ál., 2016) o de microalgas para obtener biodiesel. Una de las ventajas de la tecnología de microalgas para reutilizar el CO₂ es que se puede acoplar simultáneamente con infraestructuras existentes de generación de energía y tratamiento de aguas (Kumar et ál., 2010). Las *técnicas energéticas* incluyen la mejora de la eficiencia en las centrales térmicas, el empleo de energías alternativas, el reciclado de gases de chimenea que normalmente se queman (Khanipour, Mirvakili, Bakhtyari, Farniaey Reza, 2017) o la reforestación (IPCC, 2015).

En este artículo se definen los objetivos del proceso de fijación de CO₂ por medio de microalgas, mostrando algunos resultados encontrados a nivel laboratorio, planta piloto y escala industrial. Se analizan algunos factores que influyen en el proceso y se comparan los resultados destacados de diferentes especies de microalgas, con los obtenidos por otras especies de orden mayor y por otras técnicas.

DESARROLLO DEL TEMA

A nivel industrial se busca que la capacidad de fijación de CO₂ (así como la productividad del cultivo) sea alta. Igualmente, se busca lograr dos objetivos: la protección del medio ambiente por la reducción de la concentración atmosférica de este gas de efecto invernadero y la posible producción de sustancias valiosas (biodiesel, principalmente) a partir de la biomasa cultivada.

Biofijación

Se define como la capacidad de almacenamiento de CO₂ que tiene un cultivo de microalgas. Según González-López et ál. (2011), una hectárea de plantas puede fijar 17 toneladas de dióxido de carbono por año; igualmente, la misma hectárea de microalgas puede fijar hasta 75 toneladas en el mismo año. De acuerdo con Zhou et ál. (2017), se fijan 183 toneladas de CO₂ por cada 100 toneladas de biomasa producida. Para estudiar esta capacidad de las microalgas, se realizan ensayos a nivel laboratorio en los que se evalúa la masa de CO₂ fijada por volumen y tiempo de cultivo. No todas las especies de microalgas tienen la misma capacidad de fijación de CO₂; por otra parte, en una misma especie se observan resultados diferentes (ver anexo 1) dependiendo de las condiciones del proceso (esto se analizará más adelante).

Productividad

Relaciona la cantidad de biomasa que se obtiene en un tiempo determinado por volumen de cultivo. Se calcula por medio de la relación entre la diferencia de la concentración celular (g L^{-1}) en un tiempo dado menos la concentración inicial y el tiempo. Sankar et ál. (2011) midieron la productividad para tres especies (*Spirulina platensis*, *Calothrix* sp. y *Chlorella minutissima*) en matraces agitados, en los que optimizaron las condiciones de pH, fotoperiodo, intensidad lumínica y tipo de agitador, con una concentración inicial de 15 % en volumen de CO_2 en la mezcla con aire del cultivo. Después de 138 horas de cultivo, la investigación reportó 0.88 g de biomasa seca por litro de medio. Chiu et ál. (2009) determinaron la productividad total de biomasa de *Nannochloropsis oculata* a concentraciones volumétricas iniciales de 2, 5, 10 y 15 % de CO_2 , hallando que disminuía desde 0.480 hasta 0.372 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$. Según Yun et ál (2016), *Acutodesmus obliquus* presentó una productividad de 0.153 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ al cabo de 3 días, bajo una concentración volumétrica inicial de 14 % de CO_2 . En el estudio de Ramaraj, Tsai y Chen (2014) se reportó una productividad de 0.074 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ con un sistema de cultivo de mezcla de algas en un fotobiorreactor de 4 L. Kaštánek et ál. (2010) reportaron 0.4 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ de productividad máxima para *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de placa plana de 1.5 L alimentado con aire enriquecido con 2 % en volumen de CO_2 y bajo luz natural. Para la misma especie, Kin-Chung, Chi-Chung, On-Kit y Ho-Man (2013) registraron 0.343 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ después de 10 días de cultivo en reactores cónicos de 1 L a temperatura de 26 °C, intensidad lumínica de 2000 lux (2,93 W/m^2 o 13,4 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y fotoperiodo 12:12.

Factores que afectan la productividad y la capacidad de fijación

Como se ha mostrado en la sección anterior, los resultados del proceso de biofijación microalgal de CO_2 dependen de múltiples factores, como concentración inicial de CO_2 , luz y diseño del reactor, entre otros. En esta sección se describirán algunos de estos factores y se esbozará la relación de estos con los resultados de productividad y biofijación.

Tolerancia de la especie y concentración inicial de CO_2

La tolerancia de la especie es la concentración volumétrica máxima de CO_2 que puede soportar una microalga para crecer. Un primer paso en un proyecto de biofijación de CO_2 es la selección de la especie; aquí se busca la microalga que mayor tolerancia tenga a nivel de laboratorio. En muchos casos se va aumentando la concentración inicial de CO_2 en el aire enriquecido con este gas, y se evalúa la productividad de biomasa al cabo de cierto tiempo. Yun, Lee, Park, Lee y Yang (1997) probaron la productividad variando la concentración de CO_2 en el aire desde 5 % hasta 15 % en volumen para un cultivo de *Chlorella vulgaris*; según los autores, si la microalga se adapta previamente a un 5%, puede resistir el incremento posterior a 15 % (y posiblemente valores mayores), lo que aumenta la capacidad de fijación de CO_2 . Gaikwad et ál. (2016) encontraron que *Scenedesmus* sp. tolera 80 % en volumen de este gas; *Chlorella* sp., 40 %, y la *Nannochloris* sp., apenas un 15 %. Este mismo porcentaje fue encontrado para la *Chlorella vulgaris* (Kin-Chung et ál., 2013), con una productividad de 0.203 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ después de 10 días. La selección de la especie es tan compleja que incluso Han, Li, Miao y Yu (2012) idearon un sistema giratorio automatizado para realizar esta etapa. Los valores de tolerancia al CO_2 para una misma especie pueden variar según el investigador, debido al diseño del reactor o la intensidad y calidad de la luz suministrada. Así, por ejemplo, Vijendren, Uemura, Yusup y Osman (2014), en la revisión de resultados para la *Nannochloropsis* sp., reportaron que 1.5 % de CO_2 produce 0.24 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$; 2 % de CO_2 , 0.497 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$, y 3 % de CO_2 , 0,3 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$. En cada caso se emplearon diferente tipo de reactor (panel plano, cilíndrico y anular, respectivamente) con diferente intensidad lumínica (luz natural 300 y 175 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$;

respectivamente). Por otra parte, la tolerancia al CO₂ varía cuando el proceso se escala a nivel industrial (García, 2014).

Los mecanismos biológicos por los cuales cada especie se adapta a diferentes niveles de concentración de CO₂ en condiciones ambientales diversas, como las que se pueden presentar a escala industrial, han sido estudiados por Giordano, Beardall y Raven (2005), Young y Beardall (2005), Moroney y Ynalvez (2007) y Collins, Sueltemeyer y Bell (2006), entre otros.

Diseño del reactor

Puede ser de tipo abierto (lagunas o estanques) o de tipo cerrado: panel plano vertical, tubular horizontal, tubular vertical, columna vertical, entre otros. Fan et ál. (2007) diseñaron un sistema en continuo de fotobiorreactor de membrana a nivel laboratorio, en el que optimizaron las condiciones del cultivo de *Chlorella vulgaris*. Alcanzaron una mayor fijación de CO₂ en este reactor (0.275 g L⁻¹ h⁻¹ o 0.011 g L⁻¹ d⁻¹) comparado con otros diseños (columna de burbujeo, *Air lift* y contactor de membrana). Lutz (2012) evaluó primero el uso potencial de *Chlorella vulgaris* en reactores por lotes; luego escaló la producción a fotobiorreactores tubulares continuos con miras a la producción de bioaceites. García (2014) realizó el cultivo de dos especies (*Scenedesmus vacuolatus* y *Chlorella vulgaris*) a nivel laboratorio en reactor continuo tipo fotoquimiostato; posteriormente, evaluó el cultivo a escala industrial en estanque y reactor plano vertical, encontrando que la *C. vulgaris* resistía mejor el cultivo a la intemperie (fue capaz de fijar CO₂ para la producción de almidones) y que el mejor diseño por factores económicos y rendimiento del cultivo era el tipo vertical.

Intensidad y calidad de la luz

La *intensidad lumínica* depende de si es luz natural o artificial y qué tan alto sea el flujo lumínico. Así, por ejemplo, Li et ál. (2012) estudiaron el efecto de la intensidad lumínica sobre el crecimiento de *Chlorella kessleri* y *Chlorella protothecoide* en agua residual proveniente del proceso de deshidratación de lodos activados de una planta de tratamiento de agua residual domiciliaria, encontrando que con intensidades desde 0 hasta 120 μmol m⁻² s⁻¹ se presentaba crecimiento para *C. kessleri*. No obstante, verificaron que con intensidades superiores había fotoinhibición. Al parecer, con *Chlorella protothecoide* después de 30 mmol μ⁻² s⁻¹ se retrasaba la acumulación de biomasa microalgal.

Naderi, Tadó y Znad (2015) probaron cinco intensidades (30, 50, 100, 185 y 300 mmol m⁻² s⁻¹) con *Chlorella vulgaris*; observaron fotolimitación para intensidades inferiores a 50 μmol m⁻² s⁻¹ y fotoinhibición para intensidades superiores a 185 mmol m⁻² s⁻¹. La máxima biofijación de CO₂ fue 0.45 g L⁻¹ d⁻¹ (ver anexo 1) con intensidad de 100 mmol m⁻² s⁻¹. Mejía, Colmenares y Voroney (2013) ensayaron con tres diferentes tipos de luz emitida por diodos (LED): roja, con longitud de onda de 620-625 nm e intensidad de 1345 μmol m⁻² s⁻¹; azul, 425-430 nm y 2143 μmol m⁻² s⁻¹, y blanca, 380-760 nm y 1838 μmol m⁻² s⁻¹. Esta intensidad disminuye con la distancia; por su parte, los diodos emisores estaban a 7 mm de la suspensión algal para minimizar la fotoinhibición. Los autores encontraron que con una concentración inicial de 8.5 % de CO₂ en aire la productividad alcanza su máximo nivel (1.6 g L⁻¹ d⁻¹) con luz azul, mientras que con luz roja la máxima productividad se alcanzó con una concentración de CO₂ inicial de 3.7 % (0.57 g L⁻¹ d⁻¹).

Hu, Zhou y Liu (2016) desarrollaron una celda de captura microbial de carbón tipo *air-lift* (ALMCC, por sus siglas en inglés) con el fin de encontrar los valores óptimos de intensidad lumínica para *Chlorella vulgaris*. En el estudio se determinó que a 8.9 W m⁻² (aproximadamente 40.6 μmol m⁻² s⁻¹) se pudo fijar 0.89 g de CO₂ L⁻¹ d⁻¹; sin embargo, a 11.4 W m⁻² (cerca de 53 μmol m⁻² s⁻¹)

la fijación disminuía a $0.78 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Teniendo en cuenta estos resultados,¹ se podría decir que a pesar de que hay una fuerte dependencia del crecimiento microalgal con la intensidad lumínica, no se puede concluir cuantitativamente acerca de la relación de esta con la capacidad de fijación de CO_2 .

Otros factores

El *fotoperiodo* (Wijanarko, Dianursanti, Witarto y Soemantojo, 2004; Ho, Chen y Chang, 2010) afecta de forma directamente proporcional la capacidad de fijación de CO_2 . Por su parte, Colla, Reinehr, Reichert y Vieira (2017) evaluaron la influencia de la *temperatura* en la productividad de *Spirulina platensis*. La *frecuencia de suministro de CO_2* fue analizada por Kin-Chung et ál. (2013) para el caso de *Chlorella vulgaris*. La velocidad de flujo de mezcla gaseosa alimentada, evaluada por Fan et ál. (2007), afecta de forma inversamente proporcional a la capacidad de fijación de CO_2 . Todos estos son factores que se deben tener en cuenta a la hora de escalar cualquier proceso de biofijación microbiológica a nivel industrial.

Comparación de resultados

Entre diferentes especies de microalgas

En el anexo 1 se muestran algunos resultados de fijación y productividad a escala laboratorio con diferentes especies, así como se destacan las condiciones más relevantes en las que se obtuvieron los resultados. Como se observa, la especie con los mejores resultados fue *Scenedesmus obliquus*, que toleró hasta un 10 % de CO_2 y consiguió remover $0.55 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Con respecto a otras técnicas

Cuando se emplean adsorbentes físicos, la capacidad de fijación se expresa en unidades de $\text{mmol CO}_2/\text{g}$ adsorbente; por ejemplo, el carbón activado de hueso de aceituna tratado con KOH adsorbe 5.6 mmol de CO_2 por gramo de material adsorbente (Moussa et ál., 2017). Las nanopartículas mesoporosas de óxido de magnesio adsorben 1.34 mmol de CO_2 por gramo de material adsorbente (Hiremath, Shavi y Seo, 2017). Las mezclas acuosas de monoetanol amina y glicerol adsorben 0.886 mol de CO_2 por mol de amina a 1500 kPa (Shamiri et ál., 2016). Tsai, Chen y Ramaraj (2017) compararon la capacidad de fijación de CO_2 de microalgas a escala industrial ($23.86 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) con la de plantas maderables ($4.80 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y plantas no maderables ($0 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Teniendo en cuenta la densidad promedio de cultivo de microalga, similar a la del agua, se puede calcular el rendimiento en unidades de $\text{g CO}_2/\text{g}$ cultivo. De manera que, según Fulke Krishnamurthi, Giripunje, Saravana y Chakrabarti (2015), el máximo 1.8 g/g por un día de proceso sería mayor al obtenido por Moussa et ál. (2017), de $5.6 \text{ mmol/g} = 0.246 \text{ g/g}$ adsorbente, y más aún que el de Hiremath et ál. (2017), de $1.34 \text{ mmol/g} = 0.059 \text{ g/g}$ adsorbente (ver anexo 1).

¹ Al respecto, Martínez (2012) afirma: “los valores de fotosaturación (fotoinhibición) para las especies no son muy concisos” (p. 5).

Tendencias actuales

Existen algunos trabajos que buscan acoplar el cultivo de microalga con otro tipo de tecnología de captura de CO₂, como, por ejemplo, los biodepuradores o torres de adsorción, que incorporen microalgas como parte de biofiltros o biomembranas de adsorción (Jeong, Gillis y Hwang, 2003). También se observa el uso de fotobiorreactores *in situ* con membranas (Wiley, 2013). Finalmente, el estudio del mecanismo interno celular por el cual el CO₂ es asimilado en cada microalga es un tema que está en continuo desarrollo (ver, por ejemplo, Singh, Sundaram, Sinha, Rahman y Kapur, 2016; Goli et ál., 2016).

CONCLUSIONES

La capacidad de fijación de CO₂ obtenida por las microalgas es superior a la de macroalgas y plantas de orden superior (Tsai et ál., 2017) y a la de los adsorbentes físicos estudiados (Shamiri et ál., 2016; Moussa et ál., 2017; Hiremath et ál., 2017). Según los trabajos analizados en esta revisión (ver anexo 1), los géneros de microalga que toleran mayores concentraciones de CO₂ son *Scenedesmus*, *Spirulina* (cianobacteria) y *Chlorella*. Los factores que se relacionan con el rendimiento en el proceso son: tolerancia de la especie a la concentración de CO₂, diseño del reactor, intensidad y calidad de la luz, fotoperiodo, velocidad de flujo, concentración de CO₂ inicial, entre otros. Se consigue mayor rendimiento a menor concentración inicial de CO₂ y mayor intensidad lumínica, hasta cierto valor de fotoinhibición; pero en cada especie los valores óptimos de estos parámetros son diferentes y dependen del tipo de reactor. Finalmente, de acuerdo con esta revisión, se observa que pocas especies pueden soportar emisiones de gases de chimenea sin purificar.

REFERENCIAS

- Adinurani, P., Setyobudi, R., Wahono, S., Mel, M., Nindita, A., Purbajanti, E., Harsono, S., Malala, A., y Sasmito, A. (2016). Carbon dioxide capture efficiency using algae biological absorbent and solid adsorbent for biogas purification. *Jurnal Teknologi*, 78, 175-178
- Chiu, S., Kao, C., Chen, C., Kuan, T., Ong, S., y Lin, C. (2008). Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. *Bioresource technology*, 99(9), 3389-3396.
- Chiu, S., Kao, C., Tsai, M., Ong, S., Chen, C., y Lin, C. (2009). Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource technology*, 100(2), 833-838.
- Colla, L., Reinehr, C., Reichert, C. y Vieira, J. (2017). Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource technology*, 98(7), 1489-93
- Collins, S., Sueltemeyer, D., y Bell, G. (2006). Changes in C uptake in populations of *Chlamydomonas reinhardtii* selected at high CO₂. *Plant, cell y environment*, 29(9), 1812-1819.
- Fan, L., Zhang, Y., Cheng, L., Zhang, L., Tang, D., y Chen, H. (2007). Optimization of carbon dioxide fixation by *Chlorella vulgaris* cultivated in a membrane-photobioreactor. *Chemical engineering y technology*, 30(8), 1094-1099.
- Fiaschi, D., Gamberi, F., Bartlett, M. y Griffin, T., (2005). The air membrane-ATR integrated gas turbine power cycle: A method for producing electricity with low CO₂ emissions. *Energy Conversion and Management*, 46(15), 2514-2529

- Fulke, A., Krishnamurthi, K., Giripunje, M., Saravana, S. y Chakrabarti, T. (2015). Biosequestration of carbon dioxide, biomass, calorific value and biodiesel precursors production using a novel flask culture photobioreactor. *Biomass and bioenergy*, 72, 136 -142
- Gaikwad, R., Gudadhe, M. y Bhagat, S. (2016). Carbon Dioxide Capture, Tolerance and Sequestration Using Microalgae- A Review. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 6(3), 345-349
- García, R. (2014). *Producción de biomasa de microalgas rica en carbohidratos acoplada a la eliminación fotosintética de CO₂* (tesis doctoral). Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Ghezel-Ayagh, H., Jolly, S., Patel, D., y Steen, W. (2017). Electrochemical membrane technology for carbon dioxide capture from flue gas. *Energy Procedia*, 108, 2-9.
- Giordano, M., Beardall, J. y Raven, J. (2005). CO₂ concentrating mechanisms in algae: mechanisms, environmental modulation, and evolution. *Annual reviews of plant biology*, 56, 99-131. doi: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144052
- Goli, A., Shamiri, A., Talaiekhosani, A., Eshtiaghi, N., Aghamohammadi, N., y Aroua, M. K. (2016). An overview of biological processes and their potential for CO₂ capture. *Journal of environmental management*, 183, 41-58.
- González-López, C., Acien, F., Fernández-Sevilla, J., Molina, E. (2011). Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogénicas de CO₂. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal*, 2(2), 93-106.
- Greque, M., y Vieira, J. (2007a). Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, 129(3), 439-445. doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.01.009
- Greque, M., y Vieira, J. (2007b). Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. Cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. *Biotechnology letters*, 29(9), 1349-1352. doi 10.1007/s10529-007-9394-6
- Han, W., Li, Ch., Miao, X. y Yu, G. (2012). A novel miniature culture system to screen CO₂-sequestering microalgae. *Energies*, 5(11), 4372-4389. doi:10.3390/en5114372
- Hiremath, V., Shavi, R., y Seo, J. (2017). Mesoporous magnesium oxide nanoparticles derived via complexation-combustion for enhanced performance in carbon dioxide capture. *Journal of Colloid and Interface Science*, 498, 55-63
- Ho, S-H., Chen, W-M., y Chang, J-S. (2017). *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potential candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. *Bioresource technology*, 101(22), 8725-8730.
- Hu, X., Zhou, J., y Liu, B. (2016). Effect of algal species and light intensity on the performance of an air-lift-type microbial carbon capture cell with an algae-assisted cathode. *The Royal Society of Chemistry*, 6(30), 25094-25100.
- IPCC. (2015). *Cambio climático 2014: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo i, ii y iii al quinto informe de evaluación del grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC.

- Jeong, M., Gillis, J. y Hwang, J-Y. (2003). Carbon dioxide mitigation by microalgal photosynthesis. *Bulletin of Korean Chemistry Society*, 24(12), 1763-1766
- Kaštánek, F., Šabata, S., Šolcová, O., Maléterová, Y., Kaštánek, P., Brányíková, I., Kuthan, K., y Zachleder, V. (2010). In-field experimental verification of cultivation of microalgae *Chlorella* sp. using the flue gas from a cogeneration unit as a source of carbon dioxide. *Waste Management y Research*, 28(11), 961-966.
- Khanipour, M., Mirvakili, A., Bakhtyari, A., Farniaei, M., y Reza, M. (2017). Enhancement of synthesis gas and methanol production by flare gas recovery utilizing a membrane based separation process. *Fuel Processing Technology*, 166, 186-201. dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.06.008
- Kin-Chung, W., Chi-Chung, L., On-Kit, H., y Ho-Man, Y. (2013). A Study on Algal Growth Behavior under different Sparging Period of CO₂ Supplementation. Ponencia presentada en *1st International Conference on Beneficial Uses of Algal Biomass*, ICBUAB, Hong Kong.
- Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., Malcata, F., y van Langenhove, H. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in biotechnology*, 28(7), 371-380.
- Li, Y., Zhou, W., Hu, B., Min, M., Chen, P., y Ruan, R. (2012). Effect of light intensity on algal biomass accumulation and biodiesel production for mixotrophic strains *Chlorella kessleri* and *Chlorella protothecoide* cultivated in highly concentrated municipal wastewater. *Biotechnology and bioengineering*, 109(9), 2222-2229.
- Lutzu, G. (2012). *Analysis of the growth of microalgae in batch and semi-batch photobioreactors* (disertación doctoral). Universidad de Cagliari, Cagliari Italia.
- Martínez, J. (2012). *Modelo de biomasa algal para la captura de CO₂ y su desarrollo en un software de evaluación* (trabajo de maestría). Máster en Investigación en Ingeniería para el Desarrollo Agroforestal, Escuela de ingenierías agrarias, Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- Mejía, S., Colmenares, G., y Voroney, P. (2013). Effect of carbon dioxide concentration on the growth response of *Chlorella vulgaris* under four different led illuminations. *International journal of biotechnology for wellness industries*, 2(3), 125-131.
- Moroney, J. y Ynalvez, R. (2007). Proposed Carbon Dioxide Concentrating Mechanism in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Eukaryotic Cell*, 6(8), 1251-1259. doi:10.1128/EC.00064-07
- Moussa, M., Bader, N., Querejeta, N., Durán, I., Pevida, C., y Ouederni, A. (2017). Toward sustainable hydrogen storage and carbon dioxide capture in post-combustion conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1628-1637.
- Mulabagala, V., Baaha, D., Egieborb, N., y Chenb, W. (2015). Biochar from Biomass: A strategy for carbon dioxide sequestration, soil amendment, power generation, and CO₂ utilization. En W. Chen, T. Suzuki, Toshio, M. Lackner (Eds.), *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 1937-1974). Nueva York: Springer.
- Naderi, G., Tade, M. y Znad, H. (2015). Modified photobioreactor for biofixation of carbon dioxide by *Chlorella vulgaris* at different light intensities. *Chemical engineering and technology*, 38(8), 1371-1379
- Rahman, F., Aziz, M., Saidur, R., Bakar, W., Hainin, M., Putrajaya, R., y Hassan, N. (2017). Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO₂) and its utilization

- as a renewable energy source for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 112-126.
- Ramaraj, R., Tsai, D. y Chen, P. (2014). Freshwater microalgae niche of air carbon dioxide mitigation. *Ecological Engineering*, 68, 47-52
- Sankar, V., Daniel, D. y Krastanov, A., (2011). Carbon dioxide fixation by *Chlorella minutissima* batch cultures in a stirred tank bioreactor. *Biotechnology y Biotechnological Equipment*, 25(3), 2468-2476. doi: 10.5504/BBEQ.2011.0058
- Shabani, M., Sayadi, M., y Rezaei, M. (2016). CO₂ bio-sequestration by *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* in response to different levels of salinity and CO₂. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 6(2), 53-61
- Shamiri, A., Shafeeyan, M., Tee, H., Leo, C., Aroua, M., y Aghamohammadi, N. (2016). Absorption of CO₂ into aqueous mixtures of glycerol and monoethanolamine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 605-613.
- Singh, S., Rahman, A., Dixit, K., Nath, A. y Sundaram, S. (2015). Evaluation of promising algal strains for sustainable exploitation coupled with CO₂ fixation. *Environmental technology*, 37(5), 613-622. doi: 10.1080/09593330.2015.1075599
- Singh, S., Sundaram, S., Sinha, S., Rahman, A. y Kapur, S. (2016). Recent advances in CO₂ uptake and fixation mechanism of cyanobacteria and microalgae. *Critical reviews in environmental science and technology*, 46(16), 1297-1323. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2016.1217911>
- Sondak, C., Ang, P., Beardall, J., Bellgrove, A., Boo, S., Gerung, G., Hepburn, C., Hong, D., Hu, Z., Kawai, H., Largo, D., Lee, J., Lim, P., Mayakun, J., Nelson, W., Hyun, J., Phang, S., Sahoo, D., Peerapornpis, YangIk, Y., y Chung, I. (2016). Carbon dioxide mitigation potential of seaweed aquaculture beds (SABs). *Journal of Applied Phycology*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-1022-1>
- Sydney, E., Sturm, W., de Carvalho, J., Thomaz-Soccol, V., Larroche, C., Pandey, A., y Soccol, C. (2010). Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresource technology*, 101(15), 5892-5896.
- Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., y Zhong, J. (2011). CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO₂ levels. *Biore-source Technology*, 102(3), 3071-3076
- Tsai, D., Chen, P. y Ramaraj, R. (2017). The potential of carbon dioxide capture and sequestration with algae. *Ecological engineering*, 98, 17-23.
- Velásquez, A., Alza, V., Flores, C., Gutiérrez, L., Sánchez, J., Bernabé, P., y Bernabé, N. (2014). Escalamiento de fotobiorreactor solar secuestrante de CO₂ de gases de combustión optimizando producción de "espirulina". *SCIÉND0*, 15(1), 7-21.
- Vijendren, K., Uemura, Y., Yusup, S. y Osman, N. (2014). Aspects of carbon dioxide mitigation by *Nannochloropsis oculata* cultured in a photobioreactor. *Applied mechanics and materials*. 625, 775-779. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.625.775
- Wijanarko, A., Dianursanti, Witarto, A.B. y Soemantojo, R.W. (2004). Effect of photoperiodicity on CO₂ fixation by *Chlorella vulgaris* *buitenzorg* in bubble column photobioreactor for food supplement production. *Makara, teknologi*, 8(2), 35-43

- Wiley, P. (2013). *Microalgae cultivation using offshore membrane enclosures for growing algae (OMEGA)* (disertación doctoral). University of California, California, EE. UU.
- Young, E., y Beardall, J. (2005). Modulation of photosynthesis and inorganic carbon acquisition in a marine microalga by nitrogen, iron, and light availability. *Canadian Journal of Botany*, 83(7), 917-928.
- Yun, H-S., Ji, M-K., Park, Y-T., Salama, E-S y Choi, J. (2016). Microalga, *Acutodesmus obliquus* KGE 30 as a potential candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. *Environmental Science and Pollution Research* 23(17), 17831-17839. doi 10.1007/s11356-016-6971-z
- Yun, Y-S., Lee, S., Park, J.M., Lee, C. y Yang, J-W. (1997). Carbon Dioxide Fixation by Algal Cultivation Using Wastewater Nutrients. *Journal of Chemistry Technology and Biotechnology*. 69(4), 451-455
- Zhou, W., Wang, J., Chen, P., Ji, C., Kang, Q., Lu, B., Li, K., Liu, J., y Ruan, R. (2017). Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1163-1175.

Anexo 1. Resultados de fijación de CO₂ a escala laboratorio para varias especies de microalgas

Espece algal	% entrada de CO ₂	Fijación de CO ₂	Detalles	Referencia
<i>Spirulina sp.</i>	0.04	99.90%	VTP 4L	Greque y Vieira (2007a)
<i>Spirulina sp.</i>	6	0.39 gL ⁻¹ d ⁻¹	CPBR 2L	Greque y Vieira (2007b)
<i>Spirulina sp.</i>	6	27-38%	CPBR 2L	Greque y Vieira (2007b)
<i>Spirulina sp.</i> (A. Jenneri)	11.70%	58.00%	TPBR 44 L 96 horas	Velásquez et ál (2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	6	7-14%	CPBR 2L	Greque y Vieira (2007b)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	0.04	88.00%	VTP 4L	Greque y Vieira (2007b)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	6	2.00%	CPBR 2L	Greque y Vieira (2007b)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	10	0.55 gL ⁻¹ d ⁻¹	PBR 1 L, Fotoperiodo 24:0. I ₀ : 60 μmol m ⁻² s ⁻¹	Ho, Chen y Chang (2010)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	7.5	1.8 gL ⁻¹ d ⁻¹	250 mL Erlenmeyer	Fulke, Krishnamurthi, Giripunjje, Saravana y Chakrabarti (2015)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	10	0.29 gL ⁻¹ d ⁻¹	Erlenmeyer 800 mL 25 °C. I ₀ : 180 μmol m ⁻² s ⁻¹	Tang, Han, Li, Miao y Zhong (2011)
<i>Scenedesmus sp.</i>		14-22%	Emisiones directamente de planta industrial	Adinurani et al. (2016)
<i>Scenedesmus sp.</i>	6	0.62 gL ⁻¹ d ⁻¹	CPBR 2.25 L 27°C 4320 lux. Fotoperiodo 14:10	Singh, Rahman, Dixit, Nath y Sundaram (2015)
<i>Chlorella sp.</i>	2	58%	CPBR 800 mL	Chiu et al. (2008)
<i>Chlorella sp.</i>	10	0,125 gL ⁻¹ d ⁻¹	Sistema ALMCC. Cátodo 500 mL	Hu, Zhou y Liu (2016)
<i>Chlorella sp.</i>	6	0.45 gL ⁻¹ d ⁻¹	CPBR 2,25 L 27°C 4320 lux. Fotoperiodo 14:10	Singh, Rahman, Dixit, Nath y Sundaram (2015)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	10	0.26 gL ⁻¹ d ⁻¹	Erlenmeyer 800 mL 25°C. I ₀ : 180 μmol m ⁻² s ⁻¹	Tang, Han, Li, Miao y Zhong (2011)
<i>Chlorella kessleri</i>	0.04	90%	VTP 4L	Greque y Vieira (2007a)
<i>Chlorella vulgaris</i>	1	0.011 gL ⁻¹ d ⁻¹	FBR de membrana con chaqueta de agua 5,6 L I ₀ : 10800 lx	Fan et ál. (2007)
<i>Chlorella vulgaris</i>	0.04	60,1%	VTP 4L	Greque y Vieira (2007a)
<i>Chlorella vulgaris</i>	2	0.15 g/(L*d)	Reactor cilíndrico vertical 2 L Con camisa de agua	Naderi, Tadé y Znad, 2015
<i>Chlorella vulgaris</i>	10	0.22 g/(L*d)	Sistema ALMCC. Cátodo 500 mL	Hu, Zhou y Liu (2016)
<i>Chlorella vulgaris</i>	10	0.15 g/(L*d)	Reactor plano agua de mar	Shabani, Sayadi y Rezaei (2016)
<i>Spirulina platensis</i>	10	0.49 g/(L*d)	Reactor plano agua de mar	Shabani, Sayadi y Rezaei (2016)

Espece algal	% entrada de CO ₂	Fijación de CO ₂	Detalles	Referencia
<i>Spirulina platensis</i>	5	0.32 g/(L*d)	Fermentador BioFlo 8 L, pH 9 3500 lx. Fotoperiodo 12:12	Sydney et ál. (2010)
<i>Spirulina platensis</i>	6	0.68 g/(L*d)	TPBR 2,25 L 27°C 4320 lux. Fotoperiodo 14:10	Singh, Rahman, Dixit, Nath y Sundaram (2015)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	2	47.00%	CPBR 800 mL	Chiu et ál. (2009)
<i>Botryococcus braunii</i>	5	0.5 g/(L*d)	Fermentador BioFlo 8 L, pH 7.2 3500 lx. Fotoperiodo 12:12	Sydney et ál. (2010)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	5	0.27 g/(L*d)	Fermentador BioFlo 8 L, pH 7.2 3500 lx. Fotoperiodo 12:12	Sydney et ál. (2010)

Abreviaturas: a) ALMCC: celda de captura de carbono microbial tipo *air-lift*; b) CPBR: fotobiorreactor de columna; c) I₀: intensidad lumínica inicial; d) PBR: fotobiorreactor; e) TPBR: fotobiorreactor tubular; d) VTP: fotobiorreactor tubular vertical