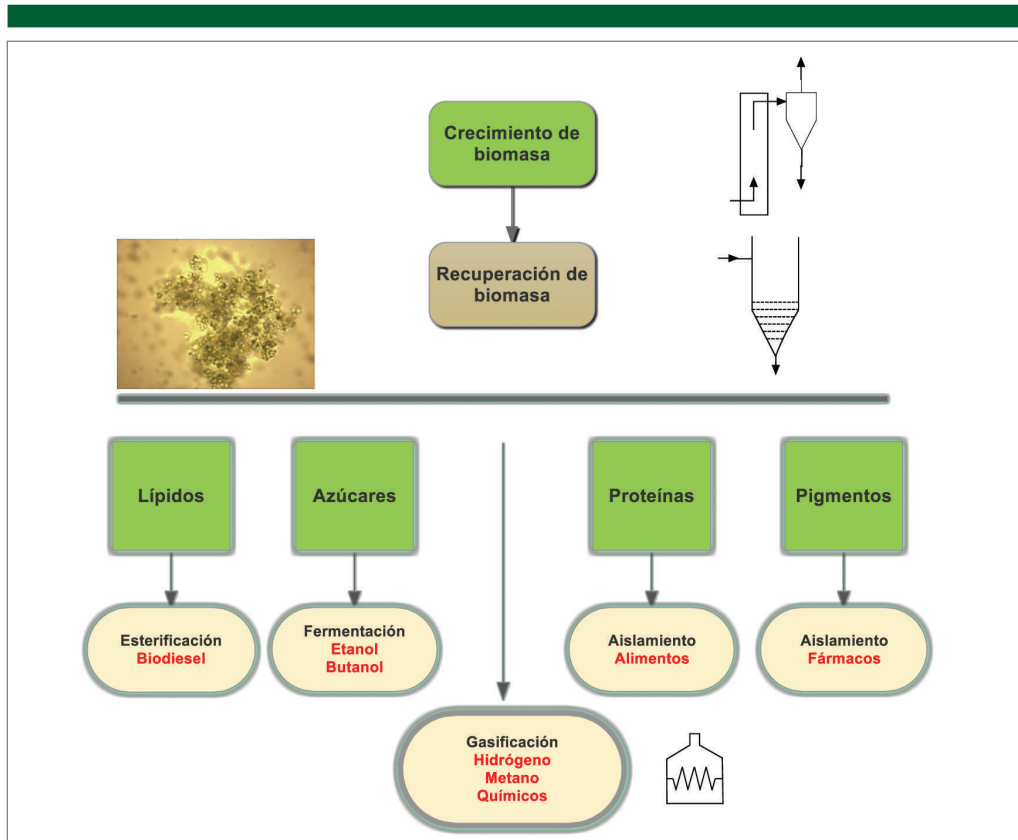


# Usos múltiples de las algas y cianobacterias en el tratamiento del agua

En años recientes ha aumentado el interés académico como industrial, en emplear la biomasa de las algas microscópicas como una materia prima para producir una amplia gama de productos, entre los mencionados están: a) los combustibles biológicos renovables, b) productos químicos, c) productos farmacéuticos y d) diversos compuestos nutritivos (Gráfica 1) (Raja et al. 2008; Harun, et al. 2010; Williams et al. 2010; Guedes et al. 2011; Subashchandrabose et al. 2011; Varfolomeev & Wasserman, 2011; Olgún 2012; Cai et al, 2013; Markou & Nerantzis, 2013; Leu & Boussiba, 2014; Bharathiraja et al. 2015; Trivedi et al. 2015; Delrue et al. 2016; Zhang et al. 2016; Colotta et al. 2016).

¿Cuál es la razón de este interés? Son varias, *primero*, es posible crecer las algas en las aguas de desecho, logrando con ello, en forma simultánea, una reducción de la contaminación ambiental; *segundo*, es posible crecer las algas empleando CO<sub>2</sub> como fuente de carbono, lo cual implica la reducción de las descargas de este gas de aquellos procesos industriales que lo producen y con ello contribuir positivamente para menguar los efectos del cambio climático; y *tercero*, el crecimiento de las algas no implica el empleo de tierra apta para la agricultura, por lo tanto no interfiere con la producción de los alimentos.



Gráfica 1. Productos obtenidos de la biomasa de algas

En esta Perspectiva se ofrecerán comentarios sobre algunas alternativas del tema titular.

## El crecimiento de la biomasa de algas

Las algas microscópicas crecen autotróficamente<sup>1</sup> en medios acuosos aprovechando la energía solar por medio de la fotosíntesis, el carbono del CO<sub>2</sub> del aire y los nutrientes inorgánicos disueltos en el cuerpo de agua. Se ha estimado que dicho sistema ecológico puede llegar a producir entre 120 y 150 Mg de biomasa seca por hectárea por año bajo las mejores condiciones ambientales (Weyer et al. 2010). Un estudio más reciente estimó una producción promedio de 48 y 55 Mg de biomasa seca por hectárea por año basados en datos del alga *Nannochloropsis* creciendo en un sistema cerrado e iluminado o fotobioreactor como corrientemente se le ha denominado (Moody et al. 2014).

Por otro lado, durante el crecimiento fotosintético las algas microscópicas producen oxígeno y se ha estimado que en todo el planeta se producen 100 GMg de O<sub>2</sub> al año capturando 183 GMg de CO<sub>2</sub> del aire, mostrando una mayor eficiencia fotosintética que cualquier otra planta terrestre (Milano et al, 2016).

Puede decirse entonces, aunque los estimados anteriores muestran una alta variación, que en términos de producir biomasa en cuerpos de agua, los microorganismos fotosintéticos, tanto algas

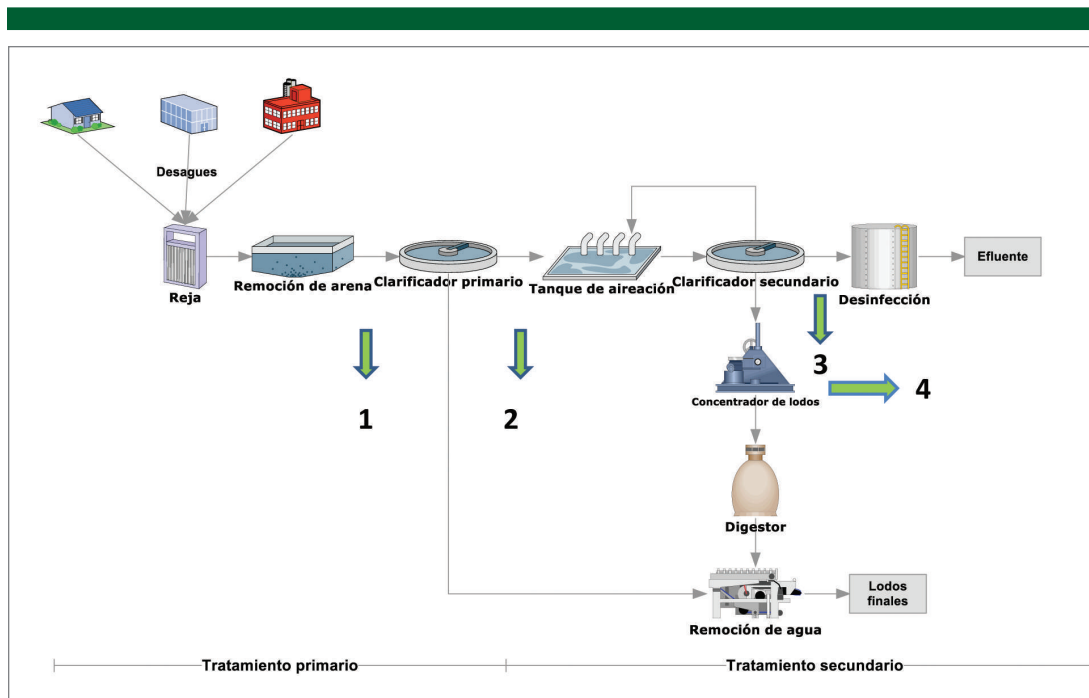
como cianobacterias, muestran un potencial interesante, y por lo tanto, es necesario desarrollar procesos consolidados<sup>2</sup> para lograr productos renovables económicamente rentables.

## Aguas de desecho

Existe un marcado interés en desarrollar sistemas empleando algas para el tratamiento de aguas de desecho industriales, agro-industriales y municipales, tanto en esquemas de aplicación directa como en esquemas combinados con otras tecnologías (Wang et al. 2010; Cho et al. 2011; Craggs et al, 2011; Li et al. 2011; Wang y Lan, 2011, Zhou et al. 2011; Menger-Krug et al. 2012; Gil et al. 2013; Maity et al, 2014; Abinandan y Shanthakumar, 2015; Gómez-Serrano et al. 2015; Hupfauf et al. 2016, Xin et al. 2016, Wang et al. 2016).

## Incorporación del crecimiento de algas en plantas de tratamiento

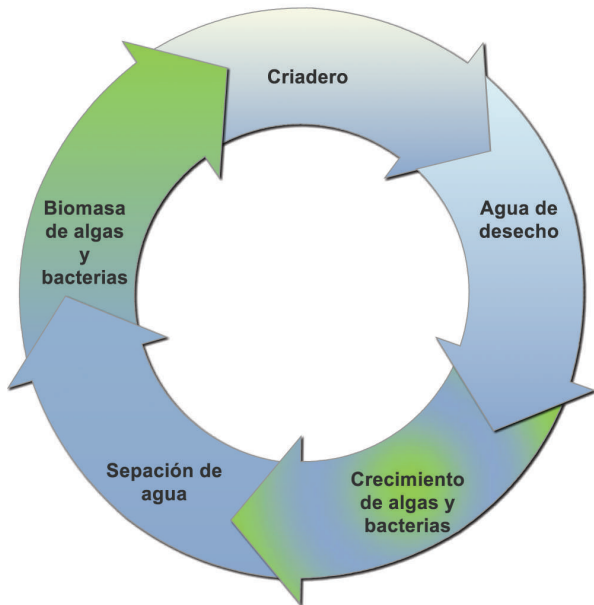
La Gráfica 2 muestra algunas alternativas para la integración de la producción de algas en la planta aeróbica de lodos activados diseñada para tratar efluentes municipales o industriales. Dicha tecnología es la más frecuentemente empleada en el país y existen varias de ellas operando. Las opciones 1 y 2 se refieren al uso directo del reactor fotosintético en el efluente o desagüe, sin clarificación primaria o luego de una clarificación primaria. La opción 3 señala la producción de algas luego del tanque de



Gráfica 2. Acoplamientos posibles del uso de algas en las plantas de tratamiento aeróbicas de efluentes municipales o industriales

<sup>1</sup> Crecimiento autotrófico: se denomina al crecimiento microbiano logrado sin la utilización de carbono orgánico en solución.

<sup>2</sup> Procesos consolidados: aquellos en los cuales se procesan varias materias primas, o se producen varios productos, o se juntan operaciones unitarias en el diagrama de flujo productivo incluyendo la generación in situ de energía empleada en el propio proceso.



Gráfica 3. Reciclaje de nutrientes en sistemas de acuicultura



Gráfica 4. Raceway pond <sup>5</sup>

aireación y el clarificador secundario. La opción 4 la producción de algas en el líquido resultante de la separación de los sólidos. En todas las opciones el empleo de las algas tiene como principal objetivo la remoción de la mayoría de nitrógeno y fósforo presentes en solución, y por lo tanto se integra adecuadamente al sistema de tratamiento ya que la mayoría de compuestos orgánicos son eliminados en el tanque de aireación.

### Tratamiento de efluentes industriales con algas

Se ha experimentado con algunos efluentes que por sus características de un alto volumen de descarga se prestan como medios adecuados para el crecimiento de un consorcio de algas, cianobacterias y bacterias. El crecimiento microbiano en este caso es prácticamente heterotrófico<sup>3</sup> debido a la presencia en el agua de carbono orgánico el cual emplean los microorganismos para crecer. Una aplicación interesante de esta tecnología es el tratamiento de las aguas de desecho de criaderos de peces y mariscos en la denominada acuicultura. En este caso, el crecimiento del consorcio microbiano origina una reducción del contenido de materia orgánica, o sea carbono orgánico, del nitrógeno y del fósforo, reduciendo así la contaminación ambiental en la descarga de estas aguas. Sin embargo, al mismo tiempo

es posible utilizar la biomasa producida como un alimento, considerado esencial en las diferentes etapas de desarrollo de los peces y mariscos (Hemaiswarya et al. 2011), logrando de esta manera crear parcialmente un reciclo de los nutrientes contenidos en los microorganismos (Posadas et al. 2015) tal como se ilustra en la Gráfica 3.

En este sistema es común emplear el reactor de bajo costo conformado por un canal ovalado cerrado de poca profundidad provisto de agitación mecánica por medio de paletas rotatorias ("raceway ponds"), ver Gráfica 4. Datos de operación de un reactor piloto de este tipo con una capacidad de 180 litros operando con aguas de desecho de un criadero de peces se ilustran en el Cuadro 1 (Posadas et al. 2015). Se observa en el cuadro que: a) en todos los casos se logró reducir la demanda química de oxígeno (DQO)<sup>4</sup> y las concentraciones de nitrógeno total (N) y fósforo total (P), y b) conforme disminuyó el tiempo de residencia de las aguas de desecho en el reactor, de 20 a 5 días, y por ende aumentó la carga de agua al reactor, disminuyó la reducción de DQO, N y P en el agua de descarga, pero por otro lado, aumentó la cantidad de biomasa de algas, cianobacterias y bacterias que podría reciclarse al criadero de peces luego de su recuperación.

<sup>3</sup> Crecimiento heterotrófico: se denomina al crecimiento microbiano empleando el carbono orgánico en solución como fuente de energía.

<sup>4</sup> La DQO mide indirectamente la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua que puede oxidarse químicamente, siendo el indicador más empleado en el tratamiento de aguas residuales.

<sup>5</sup> Foto obtenida de un sitio de libre acceso en el internet.

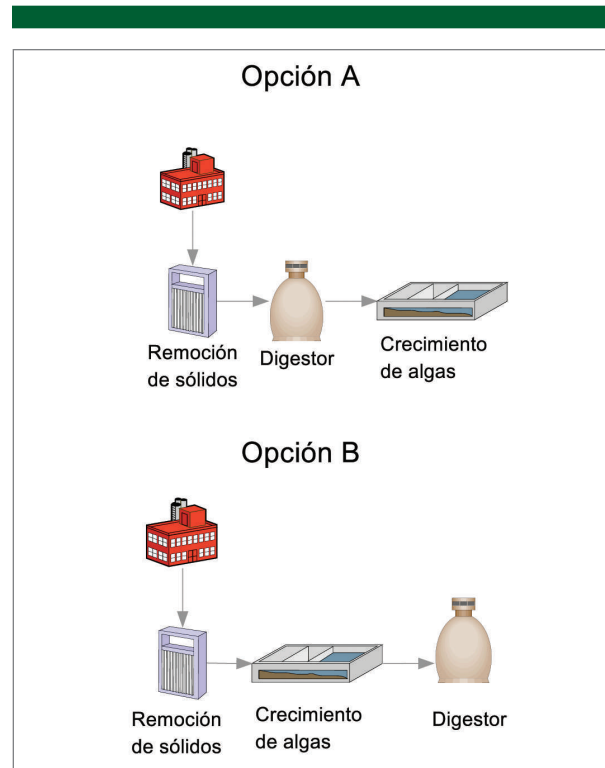
## Acoplamiento de la digestión anaerobia y el crecimiento de algas

El tratamiento anaeróbico<sup>6</sup> de aguas residuales convierte la materia orgánica básicamente en metano y dióxido de carbono. Es un proceso positivo en energía, es decir, produce más energía de la requerida. El acoplamiento de este sistema con la producción de algas propuesto por varios investigadores lo convierte también en un sistema positivo en el reciclo de nutrientes. Ambas características lo han convertido, entonces, en una tecnología interesante (Olguín, 2012; Cai et al. 2013; Monlau et al. 2015; Xia y Murphy, 2016; Zhu et al. 2016).

Varios investigadores han propuesto básicamente dos opciones las cuales se ilustran en la Gráfica 5. En la opción A, al agua de desecho los sólidos se le eliminan, luego, se introducen a un reactor anaeróbico de alta productividad en donde una proporción alta del carbono de la materia orgánica se transforma en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, es decir el comúnmente llamado biogás, luego, el líquido digerido se introduce en el reactor fotosintético de circulación en canales en donde el crecimiento de algas y cianobacterias, mayormente fotosintético debido al bajo contenido de carbono, elimina del agua una fracción mayoritaria del nitrógeno y fósforo presentes, la cual finalmente se descarga. En la opción B, el orden de las reacciones se invierte en el diagrama de flujo. Luego de la eliminación de sólidos, el agua de desecho se introduce en el reactor fotosintético, el crecimiento mixotrófico<sup>7</sup> disminuye la carga inicial de carbono, nitrógeno y fósforo del agua. Se recupera la biomasa de algas y cianobacterias y por otro lado el agua se descarga. La biomasa húmeda de algas y bacterias se introduce en un reactor anaeróbico para de nuevo generar metano y un residuo sólido que puede emplearse en la agricultura.

¿Cuál de las dos opciones es la más adecuada? Depende principalmente de: a) las características del agua industrial o agro-industrial de que se trate y b) del uso que se le dé al biogás.

Ejemplos de la aplicación en el país de la opción A, como son el tratamiento de la vinasa producida en la producción de etanol



Gráfica 5. Opciones del diagrama de flujo

por fermentación de la caña de azúcar (Marques et al. 2013) y el tratamiento del agua de desecho de la extracción del aceite de palma (Lam y Lee, 2011) el lector puede encontrarlos en las referencias anotadas. Una adición interesante en la opción A consiste en introducir el flujo de biogás en el reactor fotosintético como una fuente de CO<sub>2</sub> utilizable por las algas y cianobacterias. El gas que sale contiene una mayor proporción de metano y el proceso ha eliminado también otros contaminantes como el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S). Esta etapa se considera entonces como una purificación y concentración del biogás (*upgrading*), el cual puede ser convertido a electricidad en el generador apropiado.

Cuadro 1. Reducción de DQO, N y P en función del tiempo de residencia de las aguas de desecho en el reactor y cantidad de biomasa producida

Tiempo de residencia d	Demanda química de oxígeno (DQO) g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Reducción % de DQO	Nitrógeno total g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Reducción del nitrógeno total %	Fósforo total g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Reducción del fósforo total %	Biomasa del consorcio microbiano g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
20	3.9	77	0.2	91	0.2	84	0.5
10	10.2	77	0.5	85	0.3	94	1.1
5	20.5	64	1.1	78	0.5	64	2.7

<sup>6</sup> Sistema anaeróbico: consiste en la transformación de la materia orgánica en metano y dióxido de carbono en un ambiente sin la presencia de aire (oxígeno) llevada a cabo por la acción de un consorcio complejo de bacterias.

<sup>7</sup> Crecimiento mixotrófico: se denomina al crecimiento microbiano empleando tanto carbono orgánico como carbono inorgánico.



Gráfica 6. Columnas piloto de burbujeo para el crecimiento mixotrófico de algas y cianobacterias (BioVantage Resources)

Tal adición ha sido estudiada recientemente (Bahr, 2014; Tongprawhan et al. 2014; Posadas et al. 2015; Serejo et al. 2015; Lebrero et al. 2016; Toledo-Cervantes et al. 2016). En la adición a la opción A, el reactor fotosintético apropiado sería la columna de burbujeo, un ejemplo de la misma se ilustra en la Gráfica 6.

El lector puede encontrar una aplicación de la opción B en (Prajapati et al. 2013; 2014). La digestión anaeróbica de la biomasa húmeda de algas y bacterias, parte crucial en esta opción, no es una operación sencilla. Con el objeto de lograr conversiones adecuadas es necesario llevar a cabo un pretratamiento de la biomasa lo cual encarece el proceso, ver el artículo de revisión reciente (Carrere et al. 2016).

### Fijación del CO<sub>2</sub> producido en procesos industriales

El uso de combustibles fósiles en la generación de electricidad y en el transporte es una de las causas del incremento del CO<sub>2</sub> a valores de alrededor de 400 ppm en la atmósfera, contribuyendo con esto al efecto invernadero que ha originado el cambio climático. Debido a la continuidad en el futuro próximo de esta actividad económico-industrial, existe interés en desarrollar y poner en práctica tecnologías de captura del CO<sub>2</sub> en el punto de producción, de su almacenamiento y posterior uso (Pires et al. 2011; Yuan et al. 2016). Entre las tecnologías en desarrollo se encuentran los sistemas biológicos empleando algas y cianobacterias de cuya biomasa pueden obtenerse combustibles renovables como el etanol, el biodiesel, el biogás e hidrocarburos (Hughes y Benemann 1997; Wang et al. 2008; Brennan y Owende, 2010; Kumar et al. 2010; Ación-Fernández et al. 2012; Lam et al. 2012; Ho et al. 2014; Chen et al. 2015; Cuellar-Bermúdez et al. 2015; Cheah et al. 2016; Hallenbek et al. 2016; Moreira y Pires, 2016).

La generación de electricidad por medio de la combustión del carbón mineral y la producción de cemento son actividades industriales con altas emisiones de CO<sub>2</sub>. Es pertinente resaltarlas dada la infraestructura generadora actual y la importancia

**Cuadro 2.** Barreras técnicas para el empleo de las algas y cianobacterias como fijadoras de CO<sub>2</sub> presente en los gases de combustión

Problemas asociados con la captura del CO <sub>2</sub> de los gases de combustión	Soluciones posibles
Concentración de CO <sub>2</sub> alta en el gas (>15%)	Seleccionar algas con una tolerancia alta al CO <sub>2</sub> .
Temperatura alta del gas	Seleccionar algas termo-tolerantes.
Presencia de SO <sub>x</sub> en el gas	Seleccionar algas tolerantes. Limpiar el gas previamente. Reducir la acidificación del medio ajustando el pH.
Desperdicio de CO <sub>2</sub>	Diseñar sistemas efectivos de inyección del gas y reactores que incrementen el tiempo de contacto entre las fases. Inyección de CO <sub>2</sub> intermitente.
Costos altos de operación	Use de sistemas abiertos y no cerrados. Emplear aguas de desecho. Definir posibles usos de la biomasa de algas y cianobacterias. Usar sistemas de baja demanda de energía en la recolección final de la biomasa producida.

industrial del cemento en nuestro país. En ambos casos el CO<sub>2</sub> contenido en los gases de combustión o de chimenea, que oscila, más o menos, entre 5 a 25 % según el combustible empleado, podría considerarse como una fuente de carbono para el crecimiento de algas y cianobacterias.

Sin embargo, resultados experimentales recientes muestran que la captura del CO<sub>2</sub> de los gases de combustión no resulta sencilla como parece (Cheah et al. 2016). Se ha encontrado que: a) las algas muestran una inhibición de crecimiento a altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, b) los óxidos de azufre contenidos en el gas y otros componentes minoritarios han mostrado toxicidad para algunas algas, c) la transferencia del CO<sub>2</sub> del gas a la fase líquida requiere un lapso de contacto entre las fases que en algunos reactores fotosintéticos de bajo costo no se logra y por lo tanto una cantidad apreciable de CO<sub>2</sub> sale del reactor desperdiciado, y d) es necesario enfriar los gases de combustión a la temperatura óptima del alga y/o cianobacteria seleccionada (Kumar et al. 2010). En el Cuadro 2 se resumen algunas soluciones posibles para los problemas antes mencionados (Cheah et al. 2016).

Experimentos positivos se encuentran en la literatura en donde la captura del CO<sub>2</sub> ha sido aceptable (Chiu et al. 2011; Jacob-Lopes y Franco, 2013; de Godos et al. 2014); también los hay en donde la captura ha sido pobre (Kumar et al. 2014). En estos experimentos se han seleccionado algas ricas en grasa o en hidrocarburos de manera que puedan ser los compuestos recuperados y empleados como combustibles líquidos.

En el caso del CO<sub>2</sub> producido en las plantas de producción de cemento, debe tomarse en cuenta que existe el polvo fino arrastrado por el gas, el cual por su composición química, puede emplearse como un agente regulador del pH, como ha sido demostrado por Lara-Gil et al. (2016).

## Epílogo

Los temas puntuales tratados sucintamente en esta Perspectiva han ilustrado el potencial de los microorganismos fotosintéticos, tanto algas como cianobacterias, para tratar aguas de desecho y para mitigar las descargas de CO<sub>2</sub> al ambiente. No se ha abordado temas en los cuales el crecimiento se lleva a cabo en sistemas cerrados, en medios de cultivo definidos, con el objeto de enriquecer la biomasa del microorganismo en algún compuesto químico específico, debido a que dicho tema se aparta del objetivo. Tampoco se ha comentado la serie de iniciativas experimentales en el desarrollo de bio-refinerías en donde el crecimiento de algas y cianobacterias forma parte del diagrama de flujo completo del sistema. Por otro lado, se ha dejado a un lado los estudios de ingeniería para optimizar el diseño de diferentes geometrías de bio-reactores. Sin embargo, con énfasis en el tratamiento de aguas de desecho, más que en la producción de combustibles y productos químicos, se han citado ejemplos de aplicación en el país. Tal el caso de las plantas aeróbicas o anaeróbicas de tratamiento de aguas, la acuicultura, la vinasa,

los efluentes de la elaboración de aceite de palma, la generación térmica de electricidad y la producción de cemento. En todas ellas se ha referido al lector a referencias seleccionadas de manera que pueda profundizar sobre el tema que desee.

## Bibliografía

- Abinandan, S. Shanthakumar, S. (2015) *Challenges and opportunities in application of microalgae (Chlorophyta) for wastewater treatment: A review* Renewable and Sustainable Energy Reviews 52: 123-132.
- Ación-Fernández, F.G., González-López, C.V., Fernández-Sevilla, J.M., Molina-Grima, E. (2012) *Conversion of CO<sub>2</sub> into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO<sub>2</sub> removal?* Applied Microbiology and Biotechnology 96: 577-586.
- Bahr, M., Diaz, I., Dominguez, A. González-Sánchez, A., Muñoz, R. (2014) *Microalgal-Biotechnology As a Platform for an Integral Biogas Upgrading and Nutrient Removal from Anaerobic Effluents* Environmental Science and Technology 48: 573-581.
- Bharathiraja, B., Chakravarthy, M., Ranjith Kumar, R., Yogendran, D., Yuvaraj, D., Jayamuthunagai, J., Praveen Kumar, R., Palani, S. (2015) *Aquatic biomass (algae) as a future feed stock for bio-refineries: A review on cultivation, processing and products* Renewable and Sustainable Energy Reviews 47: 634-653.
- Brennan, L., Owende, P. (2010) *Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products* Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 557-577.
- Cai, T., Park, S.Y., Li, Y. (2013) *Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects* Renewable and Sustainable Energy Reviews 19: 360-369.
- Carrere, H., Antonopoulou, G., Affes, R., Passos, F., Battimelli, A., Lyberatos, G., Ferrer, I. (2016) *Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application* Bioresource Technology 199: 386-397.
- Collotta, M., Busi, L., Champagne, P., Mabee, W., Tomasoni, G., Alberti, M. (2016) *Evaluating microalgae-to-energy-systems: different approaches to life cycle assessment (LCA) studies* Biofuels, Bioproducts and Biorefining 10: 883-895.
- Craggs, R. J., Heubek, S., Lundquist, T.J., Benemann, J.R. (2011) *Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds* Water Science and Technology 63: 660-665.
- Cuellar-Bermudez, S. P., García-Pérez, J.S., Rittmann, B.E., Parra-Saldívar, R. (2015) *Photosynthetic bioenergy utilizing CO<sub>2</sub>: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels* Journal of Cleaner Production 98: 53-65.
- Cheah, W. Y., Ling, T.C., Juan, J.C., Lee, D.J., Chang, J.S., Show, P.L. (2016) *Biorefineries of carbon dioxide: From carbon capture and storage (CCS) to bioenergies production* Bioresource Technology 215: 346-356.
- Chen, H., Qiu, T., Rong, J., He, C., Wang, Q. (2015) *Microalgal biofuel revisited: An informatics-based analysis of developments to date and future prospects* Applied Energy 155: 585-598.
- Chiu, S.-Y., Kao, C.Y., Huang, T.T., Lin, C.J., Ong, S.C., Chen, C.D., Chang, J.S., Lin, C.S. (2011) *Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using Chlorella sp. cultures* Bioresource Technology 102: 9135-9142.
- Cho, S., Luong, T.T., Lee, D., Oh, Y.K., Lee, T. (2011) *Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production* Bioresource Technology 102: 8639-8645.
- de Godos, I., Mendoza, J.L., Ación, F.G., Molina, E., Banks, C.J., Heaven, S., Rogalla, F. (2014) *Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgae culture using flue gases* Bioresource Technology 153: 307-314.

- Delrue, F., Álvarez-Díaz, P.D., Fong Sing, F., Fleury, G., Sassi, J.F. (2016) *The Environmental Biorefinery: Using Microalgae to Remediate Wastewater, a Win-Win Paradigm* Energies 9, 132.
- Gil, S. S., Mehmood, M.A., Rashid, U., Ibrahim, M., Saqib, A., Tabassum, M.R. (2013) *Waste-water Treatment Coupled with Biodiesel Production Using Microalgae: A Bio-refinery Approach* Pakistan Journal of Life and Social Sciences 11 (3): 179-189.
- Gómez-Serrano, C., Morales-Amaral, M.M., Acién, F.G., Escudero, R., Fernández-Sevilla, J.M., Molina-Grima, E. (2015) *Utilization of secondary-treated wastewater for the production of freshwater microalgae* Applied Microbiology and Biotechnology 99: 6931-6944.
- Guedes, A.C., Amaro, H.M., Malcata, F.X. (2011) *Microalgae as sources of high added-value compounds-a brief review of recent work* Biotechnology Progress 27: 597-613.
- Harun, R., Singh, M., Forde, G.M., Danquah, M.K. (2010) *Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products* Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 1037-1047.
- Hemaiswarya, S., Raja, R., Ravi-Kumar, R., Ganesan, V., Anbazhagan, C. (2011) *Microalgae: a sustainable feed source for aquaculture* World J Microbiol Biotechnol 27: 1737-1746.
- Ho, S.-H., Ye, X., Hasunuma, T., Chang, J.S., Kondo, A. (2014) *Perspectives on engineering strategies for improving biofuel production from microalgae - A critical review* Biotechnology Advances 32: 1448-1459.
- Hughes, E., Benemann, J.R. (1997) *Biological fossil CO<sub>2</sub> mitigation* Energy Conversion and Management 38 (Supplement 1): S467-S473.
- Hupfaut, B., Suss, M., Dumfort, A., Fuessl-Le, H. (2016) *Cultivation of Microalgae in Municipal Wastewater and Conversion by Hydrothermal Carbonization: A Review* ChemBioEng Reviews 3: 186-200.
- Jacob-Lopes, E., Franco, T.T. (2013) *From oil refinery to microalgal biorefinery* Journal of CO<sub>2</sub> utilization 2: 1-7.
- Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Zhang, Q., Dewulf, J., Malcata, F.X., van Langenhove, H. (2010) *Enhanced CO<sub>2</sub> fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions* Trends in Biotechnology 28: 371-380.
- Kumar, K., Banerjee, D., Das, D. (2014) *Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by Chlorella sorokiniana* Bioresource Technology 152: 225-233.
- Lam, M.K., Lee, K.T. (2011) *Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection* Biotechnology Advances 29: 124-141.
- Lam, M.K., Lee, K.T., Mohamed, A.R. (2012) *Current status and challenges on microalgae-based carbon capture* International Journal of Greenhouse Gas Control 10: 456-469.
- Lara-Gil, J.A., Sénes-Guerrero, C., Pacheco, A. (2016) *Cement flue gas as a potential source of nutrients during CO<sub>2</sub> mitigation by microalgae* Algal Research 17: 285-292.
- Lebrero, R., Toledo-Cervantes, A., del Nery, V., Foresti, E. (2016) *Biogas upgrading from vinasse digesters: a comparison between an anoxic biotrickling filter and an algal-bacterial photobioreactor* Journal of Chemical Technology and Biotechnology 91: 2488-2495.
- Leu, S., Boussiba, S. (2014) *Advances in the Production of High-Value Products by Microalgae* Industrial Biotechnology 10: 169-183.
- Li, Y., Zhou, W., Hu, B., Min, M., Chen, P., Ruan, R.R. (2011) *Integration of algae cultivation as biodiesel production feedstock with municipal wastewater treatment: Strains screening and significance evaluation of environmental factors* Bioresource Technology 102: 10861-10867.
- Maity, J.P., Hou, C.P., Majumder, D., Bundschuh, J., Kulp, T.R., Chen, C.Y., Chuang, L.T., Nathan Chen, C.N., Jean, J.S., Yang, T.C., Chen, C.C. (2014) *The production of biofuel and bioelectricity associated with wastewater treatment by green algae* Energy 78: 94-103.
- Markou, G., Nerantzis, E. (2013) *Microalgae for high-value compounds and biofuels production: A review with focus on cultivation under stress conditions* Biotechnology Advances 31: 1532-1542.
- Marques, S.S. I., Nascimento, I.A., de Almeida, P.F., Chinaya F.A. (2013) *Growth of Chlorella vulgaris on Sugar cane Vinasse: The Effect of Anaerobic Digestion Pretreatment* Applied Biochemistry and Biotechnology 171: 1933-1943.
- Menger-Krug, E., Niederste-Hollenberg, J., Hillenbrand, T., Hiessl, H. (2012) *Integration of Microalgae Systems at Municipal Wastewater Treatment Plants: Implications for Energy and Emission Balances* Environmental Science, and Technology 46: 11505-11514.
- Milano, J., Ong, H.C., Masjuki, H.H., Chong, W.T., Lam, M.K., Loh, P.K., Vellallan, V. (2016) *Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation* Renewable and Sustainable Energy Reviews 58: 180-197.
- Monlau, F., Sambusti, C., Ficara, E., Aboulkas, A., Barakat, A., Carrere, H. (2015) *New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives* Energy and Environmental Science 8: 2600.
- Moody, J.W., McGinty, C.M., Quinn, J.C. (2014) *Global evaluation of biofuel potential from microalgae* Proceedings of the National Academy of Sciences 111: 8691-8696.
- Moreira, D., Pires, J.C.M. (2016) *Atmospheric CO<sub>2</sub> capture by algae: Negative carbon dioxide emission path* Bioresource Technology 215: 371-379.
- Olguín, E.J. (2012) *Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery* Biotechnology Advances 30: 1031-1046.
- Pires, J.C.M., Martins, F.G., Alvin-Ferraz, M.C.M., Simoes, M. (2011) *Recent developments on carbon capture and storage: an overview* Chemical Engineering Research and Design 89: 1446-1460.
- Posadas, E., Muñoz, A., García-González, M.C., Muñoz, R., García-Encina, P.A. (2015) *A case study of a pilot high rate algal pond for the treatment of fish farm and domestic wastewaters* Journal of Chemical Technology and Biotechnology 90: 1094-1101.
- Posadas, E., Serejo, M.L., Blanco, S., Pérez, R., García-Encina, P.A., Muñoz, R. (2015) *Minimization of biomethane oxygen concentration during biogas upgrading in algal-bacterial photobioreactors* Algal Research 12: 221-229.
- Prajapati, S.K., Kaushik, P.A., Malik, A., Vijay, V.K. (2013) *Phycoremediation coupled production of algal biomass, harvesting and anaerobic digestion: Possibilities and challenges* Biotechnology Advances 31: 1408-1425.
- Prajapati, S.K., Kumar, P., Malik, A., Vijay, V.K. (2014) *Bioconversion of algae to methane and subsequent utilization of digestate for algae cultivation: A closed loop bioenergy generation process* Bioresource Technology 158: 174-180.
- Raja, R., Ashok Kumar, N., Srichar, S., Rangasamy, R. (2008) *A Perspective on the Biotechnological Potential of Microalgae* Critical Reviews in Microbiology 34: 77-88.
- Serejo, M.L., Posadas, E., Boncz, S.A., Blanco, S., García-Encina, P., Muñoz, R. (2015) *Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial processes* Environmental Science and Technology 49: 3228-3236.
- Subashchandrabose, S.R., Ramkrishnan, B., Megharaj, M., Naidu, R. (2011) *Consortia of cyanobacteria/microalgae and bacteria: Biotechnological potential* Biotechnology Advances 29: 896-907.
- Toledo-Cervantes, A., Serejo, M.L., Blanco, S., Pérez, R., Lebrero, R., Muñoz, R. (2016) *Photosynthetic biogas upgrading to bio-methane: Boosting nutrient recovery via biomass productivity control* Algal Research 17: 46-52.
- Tongprawhan, W., Srinuanpan, S., Cheirsilp, B. (2014) *Biocapture of CO<sub>2</sub> from biogas by oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid* Bioresource Technology 170: 90-99.
- Trivedi, J., Bangwal, D.P., Kaul, S., Garg, M.O. (2015) *Algae based biorefinery-How to make sense?* Renewable and Sustainable Energy Reviews 47: 295-307.
- Varfolomeev, S.D., Wasserman, L.A. (2011) *Microalgae as Source of Biofuel, Food, Fodder, and Medicines* Applied Biochemistry and Microbiology 47: 789-807.
- Wang, B., Lan, C.Q. (2011) *Biomass production and nitrogen and phosphorus removal by the green alga Neochloris oleoabundans in simulated wastewater and secondary municipal wastewater effluent* Bioresource Technology 102: 5639-5644.

- Wang, B., Li, Y., Wu, N., Ian. C. (2008) CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae Applied Microbiology and Biotechnology 79: 707-718.
- Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., Wang, Y., Ruan, R. (2010) Cultivation of Green Algae *Chlorella* sp. in Different Wastewaters from Municipal Wastewater Treatment Plant Applied Biochemistry and Biotechnology 162: 1174-1186.
- Wang, L., Liu, J., Zhao, Q., Wei, W., Sun, Y. (2016) Comparative study of wastewater treatment and nutrient recycle via activated sludge, microalgae and combination systems Bioresource Technology 211:1-5.
- Weyer, K., Bush, D., Darzins, A., Wilson, B. (2010) Theoretical Maximum Algal Oil Production BioEnergy Research 3: 204-213.
- Williams, P.J.I.B., Laurens, L.M.L. (2010) Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics Energy and Environmental Science 3: 554-590.
- Xia, A., Herrman, C., Murphy, J.D. (2015) How do we optimize third-generation algal biofuels Biofuels, Bioproducts and Biorefining 9: 358-367.
- Xin, C., Addy, M.M., Zhao, J., Cheng, Y., Cheng, S., Mu, D., Liu, Y., Ding, R., Chen, P., Ruan, R. (2016) Comprehensive techno-economic analysis of wastewater-based algal biofuel production: A case study Bioresource Technology 211: 584-593.
- Yuan, Z., M.R. Eden (2016) Toward the Development and Deployment of Large-Scale Carbon Dioxide Capture and Conversion Processes Industrial Engineering Chemistry Research 55: 3383-3419.
- Zhang, T.-Y., Hu, H.Y., Wu, Y.H., Zhuang, L.L., Xu, X.Q., Wang, X.X., Dao, G.H. (2016) Promising solutions to solve the bottlenecks in the large-scale cultivation of microalgae for biomass/bioenergy production Renewable and Sustainable Energy Reviews 60: 1602-1614.
- Zhou, W., Li, Y., Zhang, Y., Zhao, Z. (2011) Local bioprospecting for high-lipid producing microalgal strains to be grown on concentrated municipal wastewater for biofuel production Bioresource Technology 102: 6909-6919.
- Zhu, L., Yan, C., Li, Z. (2016) Microalgal cultivation with biogas slurry for biofuel production Bioresource Technology 220: 629-636.

**Carlos Rolz**  
Editor