

Desarrollo sustentable e innovación: una simbiosis industrial para la biomitigación del CO₂

Claudia V. DiezMartínez, Joel A. Villalobos, Karla O. Ruiz,
Tecnológico de Monterrey, México, claudia.viridiana@gmail.com, joel.avl09@gmail.com, karlaarui16@gmail.com

Mentor: Darinka Ramírez, Ph.D.
Tecnológico de Monterrey, México, darinka@itesm.mx

Resumen— *El siguiente artículo presenta una idea innovadora en el área de desarrollo sustentable generada por alumnos de cuarto semestre de la carrera de Ingeniero en desarrollo sustentable del Tecnológico de Monterrey. El objetivo de la propuesta es el aprovechamiento de los gases de chimenea de la combustión del biogás a partir de la creación de un microecosistema industrial con una planta de cultivo de microalgas que sea viable ambiental, social y económicamente. Para validar la proposición y generar recomendaciones de implementación, se realizó una investigación documental rigurosa de datos teóricos y experimentales.*

Palabras clave — *desarrollo sustentable, ecología industrial, simbiosis industrial, biogás, microalgas.*

Abstract— *The following paper presents an innovative idea on the sustainable development field conceived by B.S. Sustainable development engineering students from Tecnológico de Monterrey. The aim of this proposal is the exploitation of biogas combustion flue gases by the creation of an industrial microecosystem with a microalgae cultivation plant, which has to be environmentally, socially and economically feasible. To validate this proposition and create recommendations, a thorough investigation with theoretical and experimental data was performed.*

Keywords — *sustainable development, industrial ecology, industrial symbiosis, microalgae.*

I. INTRODUCCIÓN

La definición más importante del desarrollo sustentable data desde 1987: desarrollo que satisface las necesidades actuales sin comprometer a las generaciones futuras. Después de casi ya tres décadas, esta definición sigue vigente y sigue siendo la representación más importante del desarrollo sustentable. Este tipo de desarrollo busca el equilibrio entre tres ámbitos: el social, el económico, y el ambiental. Es decir, que en toda propuesta exista responsabilidad social, que sea económicamente viable, y finalmente, que sea ambientalmente sustentable.

En el presente artículo se propone una idea innovadora en el área de desarrollo sustentable para la mitigación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) del proceso de combustión de biogás por medio de un microecosistema industrial entre una planta de biogás y una planta de cultivo de microalgas, donde los gases de chimenea de la primera serán la materia prima de la segunda. Este microecosistema industrial se basa en un es-

quema de intercambios óptimos de materia, reciclaje y cero residuos y sería una alternativa viable tanto económica, ambiental y socialmente para aprovechar aún más la capacidad productiva del biogás. La propuesta fue desarrollada por alumnos de cuarto semestre de la carrera de Ingeniero en desarrollo sustentable del Tecnológico de Monterrey, en México, a partir de una visita a una planta de quema de biogás local para la producción de energía eléctrica, como parte de un proyecto de clases del área de ingeniería química. Dicha propuesta será validada en este texto a partir de una extensa investigación documental que sustenta su factibilidad y relevancia.

La emisión de gases de efecto invernadero y, en especial, de CO₂, es el problema del que se habla con más recelo al referirse a la industria. Sin duda alguna, los avances tecnológicos han mejorado y facilitado la vida del ser humano. Pero mientras la tecnología crece, el planeta decrece. Estos avances tecnológicos han traído consigo daños colaterales, tanto directos como indirectos: una explotación inmoderada de recursos que está agotando los no renovables y convirtiendo los renovables en no renovables. Teniendo esto en mente, la sociedad está cada vez más consciente de tales prácticas y las repercusiones que estas tienen en el planeta. Un claro ejemplo es el cambio de desarrollo convencional al desarrollo sustentable. Si bien es cierto que el concepto de desarrollo sustentable ya tiene muchas décadas en existencia, últimamente se ha trabajado más al respecto. Es decir, su investigación y práctica están más presentes que nunca. Tomemos el caso de las industrias.

Un ejemplo muy interesante es la generación de energía eléctrica a través del biogás. Esta práctica parece tranquilizar un poco las inquietudes por todas las toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) que evita que lleguen a la atmósfera. Sin embargo, el biogás contiene, per se, hasta un 50% de CO₂ y su quema, como toda combustión, produce incluso más CO₂. Ante esto, surge la pregunta: ¿qué se puede hacer con este gas de efecto invernadero?

Otro avance podría dar la respuesta: la ecología industrial. Esta práctica de gestión ambiental tiene como objetivo aprovechar en su totalidad todo tipo de recursos y residuos que entran y salen de los procesos industriales. Una pequeña simbiosis in-

dustrial entre la producción de biogás y otro proceso que requiera CO₂ como materia prima podría suponer una alternativa eficaz en vista de la alarmante cantidad de este gas de efecto invernadero presente en la atmósfera.

La producción de microalgas cuenta con un gran potencial ante tal disyuntiva, debido a que estos organismos requieren de CO₂ para poder desarrollarse, lo cual se profundizará a continuación.

II. MICROALGAS Y BIOMITIGACIÓN

Las microalgas son organismos fotosintéticos que se encuentran en vasta abundancia en la naturaleza. Están clasificadas principalmente en 5 grupos: *Chlorophyceae*, *Rhodophyceae*, *Phaeophyceae*, *Cyanophyceae* y *Bacillariophyceae*, los cuales, a su vez, están conformados por diferentes especies [1]. En la tabla 1 se hace referencia a estos grupos y sus características.

TABLA 1.
Características de los 5 grupos de microalgas.

Nombre científico	Nombre común	Características
<i>Chlorophyceae</i>	Alga verde	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 6000-8000 especies. • El 90% se encuentra en agua dulce. • Van desde diminutos organismos unicelulares y coloniales a grandes malezas macroscópicas.
<i>Rhodophyceae</i>	Alga roja	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 4.000-5.000 especies. • El 90% se encuentra en el mar. • Van desde organismos unicelulares a algas macroscópicas.
<i>Phaeophyceae</i>	Alga café	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 1500-2000 especies. • Casi todos se encuentran en el mar. • Van desde quelpos gigantes a algas intermareales más pequeñas.
<i>Cyanophyceae</i>	Alga verde azulado	<ul style="list-style-type: none"> • Célula procarionta. • Presente en casi todos los hábitats viables. • Fijadores de dióxido de carbono y nitrógeno desde hace mil millones de años.
<i>Bacillariophyceae</i>	Diatomeas	<ul style="list-style-type: none"> • 12.000 especies conocidas. • Unicelular con tamaño microscópico. • Crecen en mares, lagos y suelos húmedos y fuera de vidrio.

Las microalgas tienen la capacidad de duplicar rápidamente su biomasa celular y, aunque carecen de tallos, raíces y hojas, poseen clorofila como su pigmento fotosintético. Asimismo, pueden almacenar grandes cantidades de CO₂ dependiendo de la especie, lo cual, a su vez, contribuye a favor de su crecimiento. Además, reciclan completamente el CO₂, ya que este se convierte en energía química a través de la fotosíntesis [1].

La reacción de fotosíntesis ocurre en dos etapas: la dependiente y la independiente de la luz. La primera consiste en el almacenamiento de la energía de los rayos del sol para convertir

el adenosín difosfato (ADP) y la nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP) en las moléculas portadoras de energía adenosín trifosfato (ATP) y NADP en su forma reducida (NADPH). Esto sucede por acción de la luz absorbida por la clorofila, la cual impulsa una transferencia de electrones e hidrógeno a un receptor NADP, que almacena temporalmente los electrones energizados. Las reacciones luminosas utilizan esa energía para reducir el NADP a NADPH al añadir un par de electrones junto con un núcleo de hidrógeno. Al mismo tiempo, también es generado ATP por la alimentación de la adición de un grupo de fosfato a ADP. Por lo tanto, la energía lumínica se convierte inicialmente en energía química [2].

En la segunda etapa, la independiente de la luz, definida por el ciclo de Calvin-Benson, se captura CO₂ mediante las moléculas NADPH y ATP para convertirlo en energía química [1]. El ciclo de Calvin reduce el carbono fijo a hidratos de carbono mediante la adición de electrones. El poder reductor es proporcionado por NADPH y por la energía química en forma de ATP [2].

En relación a lo anterior, es importante destacar que existen diferentes fuentes de las cuales las microalgas pueden fijar el CO₂: de la atmósfera, de los gases de escape industriales y el fijado en forma de carbonatos solubles; por ejemplo, bicarbonato de sodio [1].

III. SIMBIOSIS INDUSTRIAL

Las necesidades de un planeta decadente han hecho que se desarrollen nuevas maneras innovadoras y sustentables de tratar con el sector industrial de hoy en día. La ecología industrial es el estudio de las interacciones dentro de sistemas industriales, así como entre sistemas naturales e industriales [3]. En otras palabras, representa una analogía biológica adecuada al funcionamiento industrial moderno. Un ecosistema natural representa diferentes variables orgánicas e inorgánicas que se relacionan por procesos de transferencia de materia y energía, teniendo como resultado que el residuo de una variable se transforme en la materia prima de otra. En otras palabras, los ecosistemas naturales reciclan los materiales y energía utilizados en el proceso de las comunidades biológicas: no existen residuos. De este concepto se desprende la simbiosis industrial. Una simbiosis en el mundo natural no es más que las interacciones inter e intraespecies. Así, una simbiosis industrial es la interacción positiva entre distintas empresas que anteriormente operaban separadamente para lograr una mayor ventaja competitiva al intercambiar materiales y energía.

Los procesos industriales normalmente son de naturaleza lineal; es decir, se extrae la materia prima, se procesa, y finalmente se obtienen desechos de materia y energía. El objetivo de la ecología industrial es el de transformar esta linealidad en sistemas circulares o cíclicos, en los que, como ya se mencionó anteriormente, los residuos de un proceso se convierten en materia prima para otro [4]. De esta manera, es indispensable la interacción de cuatro actores principales: los extractores de materia prima, los procesadores de materia prima, los procesadores

de residuos, y el consumidor final, como se muestra en el siguiente diagrama (Fig. 1).

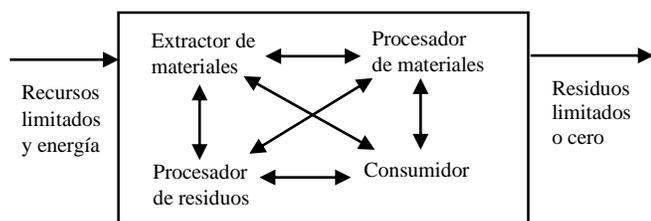


Fig. 1 Representación esquemática de las interacciones principales en la ecología industrial.

El concepto de ecología industrial ha obtenido considerable relevancia en los últimos 20 años, comenzando desde una perspectiva global (en la sociedad), pasando a una macroperspectiva (parques industriales), para finalizar en una microperspectiva (una misma industria). El mejor ejemplo es el de Kalundborg, Dinamarca. En esta municipalidad, un conjunto de empresas y el gobierno colaboran para crear un ecosistema industrial con la menor cantidad de residuos posibles. Dentro de estas industrias se encuentran farmacéuticas, energéticas, de construcción, de manejo residual, de remediación de suelos contaminados, entre muchas otras [5]. Esto quiere decir que, a pesar de la gran diferencia que pueda existir en el área de desempeño, es posible crear una simbiosis industrial que sea económicamente viable, ambientalmente sustentable y socialmente responsable.

Ahora bien, una vez entendido el concepto de ecología industrial, lo que se propone a continuación es crear un pequeño ecosistema industrial entre una planta de biogás y una planta de cultivo de microalgas, ya que ambas responden favorablemente a las necesidades de su proceso paralelo.

Primero que nada, la planta de biogás en cuestión, a grandes rasgos, funciona de la siguiente manera: después de una separación de residuos sólidos, los desechos orgánicos son llevados a un relleno sanitario. La producción de energía a partir de biogás inicia con la captación del combustible mediante la perforación de pozos en estos rellenos sanitarios, donde por un largo tiempo, bacterias metanogénicas ya se han encargado de la descomposición de materia orgánica en condiciones anaerobias, donde permanecen hasta completar su descomposición. Cuando pasa esto, se liberan diferentes gases, como CO_2 , óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y, el más importante, el metano, todos estos componiendo el biogás. Una vez que se obtiene esta mezcla de gases, se somete a un largo proceso de filtración para remover condensados, siloxanos, y otros compuestos volátiles [6]; esto incrementa la concentración de metano y, por lo tanto, el poder calorífico del biogás y, al mismo tiempo, protege a los motores de combustión de la deposición de compuestos que, eventualmente, podrían dañarlos. Finalmente, el biogás pasa por una serie de motogeneradores para hacer reaccionar el metano con oxígeno en un proceso

de combustión, dando como resultado, entre otros compuestos, CO_2 y agua. Los motogeneradores se encargan de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, la cual puede ser usada para consumo de una empresa o alumbrado público, dependiendo del giro de la planta de biogás.

La simbiosis industrial propuesta se crea por los residuos que el proceso de la generación de biogás puede tener. Una planta de este tipo cuenta con cierta eficiencia relacionada al flujo de biogás en cuestión; es decir, hay ocasiones en que el flujo es mayor a la capacidad que la planta puede soportar. Cuando existe este excedente de biogás, es necesario someterlo a una combustión que no es utilizada para la generación de energía. Este proceso de combustión contingente genera CO_2 que es liberado a la atmósfera. Si bien es cierto que el biogás pudiera ser liberado tal y como es, se tiene que considerar que el potencial de calentamiento global del metano, principal componente del biogás, es mucho mayor que el CO_2 , y debido a las legislaciones ambientales vigentes, la planta estaría infringiendo la ley. Por estas razones, es necesaria la combustión cuando hay excedente. No obstante, como ya se mencionó, el CO_2 es liberado a la atmósfera sin más. Sin embargo, no se puede contar con que siempre existirá un excedente de biogás, por lo que se tiene que considerar otros puntos en el proceso, los cuales sí son constantes. Lo establecido anteriormente para el excedente aplica igualmente para los gases de chimenea generados por la combustión en los motogeneradores. Sin embargo, con estos últimos sí se puede contar, ya que son, en esencia, el residuo del punto principal de la generación de energía mediante biogás. Justamente aquí es donde entra la simbiosis industrial.

Como se estableció anteriormente, las diferentes especies de microalgas requieren de CO_2 para poder desarrollarse. Entonces, el residuo de un proceso (el CO_2 generado por la combustión) puede ser la materia prima de otro (la maduración de las microalgas). De igual manera, una vez terminado su ciclo de vida, las microalgas pueden ser transferidas a los rellenos sanitarios para también ser materia prima del proceso de generación de energía mediante biogás; o bien, como se planteará más adelante, las microalgas también tienen un valor en el mercado de bienes y servicios, y son una herramienta útil para el tratamiento de aguas residuales, un beneficio colateral que se busca obtener.

Para poder establecer esta simbiosis industrial, es necesaria la creación de infraestructura adecuada que permita el flujo del CO_2 al área donde se encuentra el cultivo de microalgas. Igualmente, esto requiere de una inversión económica inicial considerable, ya que se tiene que considerar el costo de planeación, construcción e implementación de una serie de tuberías que permitan el traslado y enfriamiento del gas. Asimismo, es un proceso que lleva un largo tiempo hacer funcionar; los mismos procesos recién mencionados necesitan una vasta cantidad de estu-

dios a profundidad de materiales, zonas, costos y aspectos legales que, combinados, requieren años de exhausta evaluación. Sin embargo, todo ecosistema industrial es una visión a largo plazo, tal y como fue el exitoso caso de Kalundborg.

Al crear este flujo circular de materia y energía, se espera una cantidad limitada de residuos. Ahora bien, para poder lograr esto, existe una serie de consideraciones a tomar en cuenta para optimizar este pequeño ecosistema industrial.

IV. ESTRATEGIA DE APLICACIÓN

El éxito de un ecosistema industrial no solo depende de si existe o no la posibilidad de intercambiar materia y energía entre un componente y otro; también se deben encontrar los mejores medios para que esa simbiosis interorganizacional se lleve a cabo. En este caso, se deben de tomar dos decisiones importantes: el método que se utilizará para cultivo y la selección de una especie de microalgas adecuada para los propósitos deseados. Estos determinantes definirán el éxito o fracaso del aprovechamiento del CO₂.

Los sistemas de cultivo de microalgas se dividen en dos grandes tipos: abiertos y cerrados. Entre los métodos abiertos, destacan los estanques estacionarios y los de flujo continuo o tipo *raceway*. Estos son los más utilizados actualmente para el cultivo de microalgas a gran escala, debido a su bajo costo, facilidad de mantenimiento y la libertad para el uso de aguas residuales como medio de cultivo. La desventaja de estos sistemas es que requieren de grandes áreas y si no se lleva un control adecuado, el cultivo puede contaminarse y desarrollar depredadores o, bien, tener pérdidas significativas de agua por evaporación. Como prevención ante este último problema, para prolongar los periodos de crecimiento de las microalgas y para facilitar la distribución de CO₂, los estanques son usualmente cubiertos con materiales transparentes [1]. Dentro de esta categoría, también se han desarrollado los biorreactores multicapa de flujo ascendente. Con una capacidad de hasta 40,000 litros [7], el sistema consiste en una serie de tanques dispuestos uno arriba del otro en donde, por acción de la gravedad, fluye el medio de cultivo desde la cima hasta el último tanque del biorreactor y regresa de nuevo por medio de bombeo. Adicionalmente, se puede agregar iluminación artificial en cada capa para complementar la radiación solar. Aunque tienen limitaciones similares a los sistemas ya descritos, los biorreactores multicapa de flujo ascendente permiten reducir espacios a costos razonables y pueden ser ampliados fácilmente [1].

Los sistemas cerrados son más variados e incluyen diferentes tipos de fotobiorreactores que se ajustan a distintas necesidades de cultivo. Las principales ventajas de estos diseños es que reducen espacios, permiten el control de temperatura y la esterilización del cultivo y la incorporación de iluminación artificial. Sin embargo, los costos capitales de todos los sistemas cerrados son, hasta la fecha, muy altos [8].

El valor agregado de los sistemas cerrados es muy tentador y pueden ser el mejor método para el cultivo de microalgas en escalas pequeñas de laboratorio y, sobre todo, si se busca obtener biomasa selecta y limpia para propósitos delicados; por ejemplo, para aplicaciones en la industria farmacéutica [1]. Sin embargo, puesto que se busca una relación simbiótica con una planta de cultivo a gran escala y para el tratamiento simultáneo de aguas residuales, los beneficios que ofrecen los sistemas cerrados pierden peso y, por cuestiones de practicidad y ahorro económico, los sistemas abiertos son la mejor opción. Si la extensión de los cultivos no es un problema, los estanques de flujo continuo darían buenos resultados, pues su diseño permite la homogeneización de los nutrientes y una absorción efectiva de CO₂. Por otro lado, si se desea minimizar el espacio, el biorreactor multicapa de flujo ascendente sería el más recomendado. La Fig. 2 muestra la estructura de los estanques de flujo continuo.

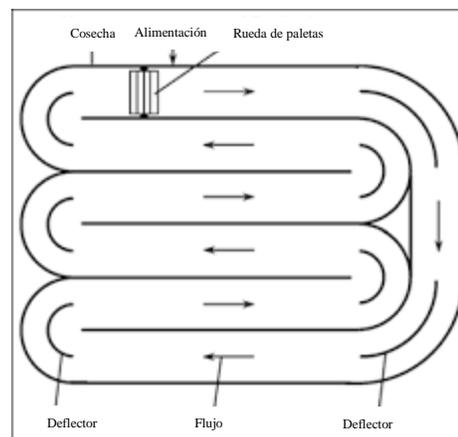


Fig. 2 Estructura básica de un estanque de flujo continuo.

Ahora bien, para seleccionar una especie de microalgas como el mejor sumidero de carbono para flujos de gases de chimenea, se deben de considerar, al menos, 5 aspectos principales: tolerancia a altas concentraciones de CO₂, altas temperaturas, presencia de contaminantes como los NO_x y los SO_x, nutrientes limitados y pH [1].

Las microalgas son muy sensibles a los niveles de concentración de CO₂ a los que están expuestas. Si solo tienen la atmósfera como fuente carbono (0.03 – 0.06% CO₂), su crecimiento se aletarga, pero concentraciones muy altas son también, en la mayoría de los casos, contraproducentes [1]. Los procesos de combustión producen, en general, gases de chimenea concentrados hasta un 15% de CO₂ y aunque no parece una cifra muy elevada, solo algunas especies son tolerantes a fuentes tan ricas en CO₂. Sin embargo, puesto que el biogás tiene hasta un 50% de CO₂ y su combustión produce aún más de este gas, la composición de los gases exhaustos de la quema de biogás tiene un porcentaje mucho más elevado que un 15%. Por

supuesto, esta cifra depende de la composición inicial del biogás y de la eficiencia de la combustión. Por otro lado, las temperaturas óptimas para el cultivo de microalgas se reportan en un rango de 15 a 26 °C [9]. Temperaturas muy bajas inhiben la actividad enzimática que promueve la fotosíntesis y temperaturas muy altas inhiben el metabolismo de las microalgas, reducen la solubilidad del CO₂ [1] y minimizan su conversión entre un 20 y 30% [10]. Por suerte, existen excepciones. Según la referencia [1], la especie *Chlorella sp.* fue capaz de crecer en un ambiente con 40% de CO₂, pH 5.5 – 6.0 y a 30 °C. A su vez, la referencia [7] reporta el crecimiento de *Chlorella sp.* a una concentración con 40% de CO₂ y 42°C. Aun así, lo más prudente para garantizar una simbiosis efectiva sería mezclar los gases de chimenea con aire para lograr una concentración adecuada de CO₂ y reducir, al mismo tiempo, su temperatura a un rango aceptable.

Otro inhibidor del crecimiento de las microalgas es la presencia de contaminantes. Los compuestos tóxicos cuyo efecto se ha estudiado más a fondo son los SO_x y NO_x. A pesar de que estos no son componentes de gran concentración en el biogás, pueden llegar a estar presentes en los gases de chimenea. Aunque en la mayoría de los casos, la presencia de SO_x y NO_x es perjudicial, algunas especies, como *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.*, pueden tolerar niveles moderados de concentración. *Chlorella sp.*, por ejemplo, a concentraciones de 23% de CO₂, 78 ppm de NO_x y 87 ppm de SO_x, no mostró inhibición alguna en su crecimiento. *Scenedesmus sp.* tampoco se vio afectada a concentraciones de 18% de CO₂, 150 ppm de NO_x y 200 ppm de SO_x [1].

El carbono, nitrógeno y fósforo son los tres nutrientes esenciales para el crecimiento de biomasa [8]. Estos compuestos deben ser absorbidos por las microalgas dentro de su medio de cultivo, además de otros compuestos inorgánicos como sales, vitaminas y metales. El carbono puede ser obtenido de las descargas de CO₂, el nitrógeno generalmente se alimenta en forma de amonio y el fósforo en forma de fosfatos. Debido a estas necesidades, el cultivo de microalgas en aguas residuales toma protagonismo. Por un lado, las microalgas absorben el nitrógeno, fósforo y metales de las aguas negras y las purifican sin la necesidad de químicos y, al mismo tiempo, producen biomasa que mitiga CO₂ y que puede ser aprovechada posteriormente en otras aplicaciones. Entre las especies con mayores razones de asimilación de nutrientes se encuentran de nuevo *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* [11].

Cada especie puede crecer en diferentes rangos óptimos de pH. En general, se prefieren evitar los medios ácidos. No obstante, los gases de chimenea y, en especial, cuando vienen acompañados de NO_x y SO_x son medios con bajos niveles de pH. Por suerte, *Chlorella sp.* puede tolerar pH menores de 4 [9][10]. De cualquier manera, el pH es ajustable al agregar hidróxido de sodio y carbonato de calcio al medio.

Considerando todo lo anterior, la especie de microalgas más prometedora, tanto para la biomitigación de CO₂ como para el tratamiento de aguas residuales, es *Chlorella sp.*

Es importante considerar que los casos mencionados fueron de esta especie cultivada con diferentes gases de chimenea provenientes de distintos procesos industriales convencionales, no de la combustión de biogás. Sin embargo, los resultados son una buena referencia para la selección de la especie de cultivo. En la tabla 2 se resumen algunos de estos casos.

TABLA 2.
Propiedades de *Chlorella sp.* Dependiendo de la fuente de CO₂.

Microalga	CO ₂ % (v/v)	NO _x (ppm)	SO _x (ppm)	Fuente
<i>Chlorella sp.</i>	8-10.2	38	3.8	Gas de combustión real a partir de un co-generado.
<i>Chlorella sp.</i>	6-8	37	-	Los gases de combustión de bienes procedentes de la combustión de gas natural de una caldera.
<i>Chlorella sp.</i>	23	78	87	Gases de combustión real del horno de coque de una planta de acero.

Una vez que se tomen las decisiones correctas con respecto al sistema de cultivo y la especie a tratar, el microecosistema industrial debería funcionar, cumpliendo con todas las normas y leyes establecidas, para producir energía y bienes de calidad y con menor huella ecológica.

V. BIOMASA PARA LA ENERGÍA

La simbiosis industrial propuesta parece ya haber dado respuesta al problema de las grandes cantidades de CO₂ que se desechan por la combustión del biogás. Sin embargo, el CO₂ no estará capturado por siempre por las microalgas. Al igual que cualquier otro tipo de biomasa, cuando las microalgas han cumplido con sus funciones y mueren, su descomposición libera de nuevo el carbono que fue absorbido previamente a la atmósfera [12], algo que no es deseable si lo que se busca es reducir las emisiones globales del microecosistema. Por ello, y también como incentivo económico, las microalgas deben de aprovecharse incluso después de que ha culminado su ciclo de vida. Actualmente, el concepto de biorefinería ha introducido la aplicación de la biomasa de las microalgas para producir bio-combustible, energía y otros productos de valor agregado, como suplementos alimenticios, medicamentos, cosméticos y fertilizantes naturales [6]. Las especies más utilizadas actualmente para aplicaciones comerciales son *D. salina*, *B. braunii*, *S. platensis*, *Haematococcus pluavialis* y la siempre protagonista *Chlorella sp.* [12].

Sin embargo, puesto que, en este caso, las microalgas crecerán en un ambiente que puede contener SO_x y NO_x , las aplicaciones más delicadas –medicamentos, alimento y cosméticos– deberán ser descartadas por cuestiones de toxicidad, aunque no se han hecho estudios sobre los efectos que las microalgas con alimentación de gases de chimenea tienen en estas aplicaciones. Por suerte, hay otros productos que no se ven afectados por este problema.

La aplicación que ha recibido más atención actualmente es la producción de biocombustibles. De hecho, las microalgas resultan ser bastante prometedoras como una solución parcial a la dependencia de hidrocarburos provenientes del petróleo y carbón, pues almacena cantidades significativas de energía que pueden convertirse en diésel, metano y etanol por medio de métodos termoquímicos y biológicos [13]. Incluso, las microalgas tienen ventaja sobre otras fuentes de biomasa porque no compiten por suelos fértiles o aguas limpias –como ya se explicó, las microalgas pueden crecer convenientemente en aguas residuales– y su uso no reduce la oferta de alimentos para los seres humanos. No obstante, los costos para convertir la biomasa de las microalgas en biocombustible son aún muy elevados y todavía no son utilizadas a gran escala para este propósito. La tecnología necesaria para producir biodiésel a partir de esta biomasa aún está en etapas tempranas de desarrollo. De todas formas, los avances tecnológicos actuales y los que están por venir, marcan un panorama optimista al respecto y se espera que en los siguientes diez a quince años, este proceso pueda ser sustentable económicamente [14].

VI. CONCLUSIONES

La biomitigación de CO_2 mediante microalgas ofrece varias ventajas. En primer lugar, las microalgas crecen más rápido y tienen mejor capacidad de absorción de CO_2 que el resto de las plantas terrestres y acuáticas, incluyendo productos agrícolas. Además, el CO_2 se reciclaría completamente, pues las microalgas lo convierten en carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos que pueden ser aprovechados posteriormente para la generación de biocombustibles, fertilizantes naturales o alimento para ganado. Independientemente del sistema que se utilice para su cultivo, las microalgas no necesitan de nuevos cuerpos de agua fresca para crecer. De hecho, pueden ser aprovechadas al mismo tiempo para el tratamiento de aguas residuales, pues son capaces de remover nitrógeno, fósforo y metales.

Para dos empresas privadas, el microecosistema industrial representa una solución viable para reducir residuos y costos. Por un lado, la planta de biogás produciría energía más limpia y con ingresos adicionales por la venta de sus gases de chimenea. Por el otro, la planta de cultivo de microalgas tendría una fuente constante de materia prima de manera accesible y, con la incorporación del tratamiento de aguas residuales y la venta para la producción de biocombustible, fertilizantes o alimento

también generaría ingresos adicionales. Los gobiernos, por su parte, podrían crear este microecosistema industrial para obtener dos tipos de beneficios: por una parte, los residuos sólidos urbanos que deben tratar serían aprovechados para la generación de biogás, que producirá energía para la ciudad y, al mismo tiempo, las aguas residuales serían aprovechadas y purificadas por las microalgas, biomasa que producirá, a su vez, combustible o fertilizantes, productos con un valor de mercado que permitiría solventar los gastos iniciales relacionados con la formación del microecosistema industrial. Por lo tanto, la propuesta presentada en este artículo demuestra ser viable tanto ambiental, social y económicamente, creando un balance entre los tres ejes del desarrollo sustentable.

A lo largo del presente artículo, se mostró solo la primera etapa de lo que conlleva el desarrollo real de un microecosistema industrial. El siguiente paso sería hacer pruebas, tanto a nivel laboratorio, como a nivel industrial, de las propuestas presentadas para corroborar su eficacia e iniciar el proceso de implementación.

La ecología industrial, en cualquiera de sus aplicaciones, es una necesidad. Ha llegado el momento de abrirle las puertas al desarrollo sustentable y pensar más allá de las líneas de producción tradicionales. Para ello, se necesitarán cada vez más científicos e ingenieros dispuestos y capaces a formar parte del cambio. Esta necesidad recalca la importancia de la educación y el intercambio de conocimientos en la comunidad ingenieril, científica e industrial.

Si esta propuesta surgió simplemente de tres alumnos cursando clases de ingeniería a nivel universitario, solo es cuestión de imaginar la trascendencia de las ideas que se generarían de un grupo de ingenieros, científicos y empresarios trabajando en conjunto para efectivamente lograr el desarrollo sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Darinka Ramírez y a la Escuela de Ingeniería y Tecnologías de Información del Tecnológico de Monterrey por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] W.Y. Cheah, P.L. Show, J. Chang, T.C. Ling y J. Joon Ching, "Biosequestration of atmospheric CO_2 and flue gas-containing CO_2 by microalgae," *Bioresource Technology*, vol. 183, pp. 190-201, mayo 2015, en prensa.
- [2] P. Horton. "Interactions between electron transfer and carbon assimilation." *Topics in photosynthesis*, vol. 6, pp. 135-187, 1985.
- [3] M. Despeisse, P.D. Ball, S. Evans, y A. "Industrial ecology at factory level – a conceptual model," *Journal of a Cleaner Production*, vol. 31, pp. 30-39, agosto 2009.

- [4] D. Giurco, B. Cohen, E. Langham, y M. Warnken. "Backcasting energy futures using industrial ecology," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 78, no. 5, pp. 797-818, junio 2011.
- [5] Brings Jacobsen, N. "Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 10, no. 1-2, pp. 239-255. 2006.
- [6] Surita, S. C. y Tansel, B. "Preliminary investigation to characterize deposits forming during combustion of biogas from anaerobic digesters and landfills," *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 674-681, marzo 2015.
- [7] W. G Zhou, et al. "Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters," *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 36, pp. 256-269, agosto 2014.
- [8] B. Wang, Y. Li, N. Wu y C. Q. Lan, "CO₂ bio-mitigation using microalgae," *Applied Microbiology & Biotechnology*, vol. 79, no. 5, pp. 707-718, julio 2008.
- [9] B.-T. Zhao y Y.-X Su, "Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production," *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 31, pp. 121-132, marzo 2014.
- [10] X.-H Zeng, M.K. Danguah, X.D Chen y Y.-H Lu, "Microalgae bioengineering: from CO₂ fixation to biofuel production," *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 15, no. 6, pp. 3252-3260, agosto 2011.
- [11] N.C. Bhatt, A. Panwar, T.S. Bisht y S. Tamta, "Coupling of algal biofuel production with wastewater," *Scientific World Journal*, 2014.
- [12] F.G Acién, C. V. González-López, J. M. Fernández, E. Molina, "Conversion of CO₂ into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO₂ removal?," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 96, no. 3 pp. 577-586, noviembre 2012.
- [13] S.-H. Ho, C.-Y. Chen D.-J. Lee, J.-S. Chang, "Perspectives on microalgal CO₂ emission mitigations systems – a review," *Biotechnology Advances*, vol. 29, no. 2, pp. 189-198, 2011.
- [14] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae," *Biotechnology Advances*, vol. 25, pp. 294-306, 2007.
- [15] R. H. Waijffels, y M. J. Barbosa, "An outlook on microalgal biofuels," *Science*, vol. 329, pp. 796-799, 2010.