

**MARCO CONCEPTUAL PRELIMINAR PARA EL EMPLEO DE LAS
MICROALGAS EN LA FIJACIÓN DEL CO₂ PRESENTE EN LOS GASES DE
CHIMENEA DE EQUIPOS INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN EN COLOMBIA**

ANDREA PAOLA DÍAZ OVALLE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

**MARCO CONCEPTUAL PRELIMINAR PARA EL EMPLEO DE LAS
MICROALGAS EN LA FIJACIÓN DEL CO₂ PRESENTE EN LOS GASES DE
CHIMENEA DE EQUIPOS INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN EN COLOMBIA**

ANDREA PAOLA DÍAZ OVALLE

**Monografía de grado para optar al título de
Especialista en Química Ambiental**

**Director:
RICARDO RESTREPO MANRIQUE
Biólogo Especialista en Química Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. MARCO TEÒRICO	16
3.1 RESEÑA HISTORICA	16
3.2 GENERALIDADES DE LAS MICROALGAS	18
3.3 COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA	19
3.4 PARAMETROS DE CULTIVO	20
3.4.1 Luz.	20
3.4.2 Temperatura.	20
3.4.3 Salinidad.	20
3.4.4 pH.	20
3.4.5 Nutrientes.	21
3.4.6 Oxígeno.	22
3.4.7 Agua.	22
3.4.8 Dióxido de carbono.	22
3.5 SISTEMAS DE CULTIVO	23
3.5.1 Cultivo de microalgas en sistemas abiertos.	23
3.5.2 Cultivo de microalgas en sistemas cerrados.	25
3.5.3 Mantenimiento de los sistemas de cultivo.	27

3.6 BIOFIJACIÓN DE DIOXIDO DE CARBONO DE LOS GASES DE CHIMENEA	29
3.7 CULTIVO DE MICROALGAS	32
3.8 COSECHA DEL SISTEMA DE CULTIVO	37
3.9 APLICACIONES DE LAS MICROALGAS	38
4. COSTOS DE LA PRODUCCIÓN	42
CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFIA	46
ANEXOS	51

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fotografías de diseños de tanques abiertos (a) Tanque circular con brazo de rotación en Australia occidental, cultivo <i>Dunaliella salina</i> , (b) Tanque circular con agitación en República Checa, cultivo <i>Scenedesmu</i> , (c) Tanque tipo pista en Taipei, cultivo <i>Chlorella</i> . Fuente: MOHEIMANI, 2005	25
Figura 2. Fotografías de diseños de Fotobioreactores (a) Tubular en forma horizontal e inclinado (Greenfuels), (b) Columna vertical de burbujas, (c) Reactor de paneles planos. Fuente: McGINN, 2008	27
Figura 3. Fotografías de técnicas de cosecha (a) Filtración de cultivo de diatomeas (b) Equipo de centrifugación (c) Auto-floculación de diatomeas (d) Floculación química de microalgas. Fuente: BEN-AMOTZ, 2009 y ROSCH, 2009.	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Cuadro comparativo tanques abiertos-fotobioreactores	28
Tabla 2 Tolerancia de microalgas a diferentes concentraciones de dióxido de carbono	31
Tabla 3 Biofijación de dióxido de carbono por microalgas según investigadores	33
Tabla 4 Microalgas para cultivo en Colombia	35
Tabla 5 Uso comercial de las microalgas	39
Tabla 6 Uso comercial de microalgas fijadoras de dióxido de carbono	40

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. MARCO CONCEPTUAL PRELIMINAR PARA EL EMPLEO DE LAS MICROALGAS EN LA FIJACIÓN DEL CO₂ PRESENTE EN LOS GASES DE CHIMENEA DE EQUIPOS INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN EN COLOMBIA*51

RESUMEN

TÍTULO

MARCO CONCEPTUAL PRELIMINAR PARA EL EMPLEO DE LAS MICROALGAS EN LA FIJACIÓN DEL CO₂ PRESENTE EN LOS GASES DE CHIMENEA DE EQUIPOS INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN EN COLOMBIA*

AUTOR

Andrea Paola Díaz Ovalle[†]

PALABRAS CLAVES

Dióxido de carbono, microalgas, gases de chimenea.

DESCRIPCIÓN

El dióxido de carbono es uno de los Gases Efecto Invernadero (GEI) que se genera debido a las diferentes actividades realizadas por las industrias, incrementando su concentración en la atmósfera y contribuyendo al calentamiento global.

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que han sido objeto de estudio por sus aplicaciones productivas y comerciales en el campo alimenticio y farmacéutico. Teniendo en cuenta su capacidad para fijar el dióxido de carbono, investigadores han encontrado en ellos una alternativa para aprovechar el CO₂ de los gases de chimenea de equipos industriales proporcionando una tecnología ambiental para minimizar emisiones. Actualmente su empleo arroja altos valores de inversión y mantenimiento del sistema de cultivo, debido al desconocimiento e inexperiencia en el campo, por lo que se debe establecer un plan a mediano y largo plazo, teniendo en cuenta el progreso de cada una de las etapas del proceso.

Aunque el tema no ha sido profundizado en Colombia, las condiciones climáticas del país lo hacen apto para su producción y así determinar la viabilidad del proceso. Su aplicación traería beneficios económicos y ambientales a las industrias nacionales al efectuar proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), y a su vez se pueden obtener subproductos del cultivo de microalgas de gran valor.

* Trabajo de Grado

[†] Facultad de Ciencias. Especialización en Química Ambiental. Director: Ricardo Restrepo Manrique

SUMMARY

TÍTULO

CONCEPTUAL FRAMEWORK PRELIMINARY FOR THE APPLICATION OF THE MICROALGAES IN THE FIXATION OF CO₂ PRESENT IN FLUE GASES OF INDUSTRIAL EQUIPMENT OF COMBUSTION IN COLOMBIA[‡]

AUTHOR

Andrea Paola Díaz Ovalle[§]

KEY WORDS

Carbon dioxide, microalgae, flue gases.

DESCRIPTION

The carbon dioxide is one of the Greenhouse Gases (GHG) that is generate due the differents activities of the industries, increasing the atmospheric concentration of CO₂ and contributing with the global warming.

The microalgae are photosynthetic microorganisms, they have been under study for its production and trade applications in the field of food and pharmaceutical. They have the capacity of fix the carbon dioxide and the investigators found in the microalgae an alternative to make use of CO₂ present in the flue gases of industrial equipment, providing an environmental technology for minimize emissions. Currently its use gives high levels of investment and maintenance of the culture, due to ignorance and inexperience in the field. There must be a plan for medium and long term, keeping in mind the progress in each of the stages of process.

Although the subject is recent in Colombia, the climatic conditions make it suitable for production and determine the feasibility of the process. Its application would bring economic and environmental benefits to national industries when they carry out projects of Clean Development Mechanism (CDM), and can be obtained microalgal culture products of high value.

[‡] Work Degree

[§] Faculty of Sciences. Specialization in Environmental Chemistry. Directress: Ricardo Restrepo Manrique.

INTRODUCCIÓN

Las industrias como consecuencia de sus actividades emiten una serie de gases conocidos como Gases Efecto Invernadero (GEI), dentro de los cuales se encuentra el dióxido de carbono (CO₂). Según mediciones realizadas en el año 2000, la concentración de este gas en la atmosfera ha alcanzado una cifra de 387 ppm, esto significa un crecimiento de casi el 40% desde la revolución industrial¹.

Grupos de investigación en busca de alternativas medio ambientales han planteado la posibilidad de determinar el potencial de los sistemas de cultivo de microalgas para mitigar o disminuir las emisiones de CO₂, teniendo en cuenta que estos microorganismos fotosintéticos tienen la capacidad de utilizar la energía solar para fijar el dióxido de carbono y sintetizar los nutrientes necesarios para su desarrollo (MOHEIMANI, 2005).

Su aplicación implica una inversión de tipo económico e intelectual, debido a que es un tema del que se conoce poco en el campo. El bio-combustible, fertilizantes y alimento animal son algunos de los subproductos que se pueden obtener del cultivo de las microalgas.

¹La concentración de CO₂ en la atmósfera alcanza niveles récord. [artículo de internet], <http://www.cambio-climatico.com/la-concentracion-de-CO2-en-la-atmosfera-alcanza-niveles-record>. [Consulta: 20 febrero de 2010].

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los gases de efecto invernadero (GEI), entre estos el dióxido de carbono, proviene de la combustión de los compuestos orgánicos y es uno de los gases que contribuye a que la Tierra tenga una temperatura habitable. Un exceso del mismo acentuaría el fenómeno conocido como efecto invernadero, reduciendo la emisión de calor al espacio y provocando un mayor calentamiento del planeta.

Según La Agencia Internacional de Energía (IEA) en 1995 por uso de combustibles, se emitieron en el planeta 22.150 millones de toneladas de CO₂, de las cuales Colombia aportó menos de 0,3%, en donde el 86% pertenece al empleo de combustibles energéticos, el 8% actividades relacionadas con pérdida de cobertura boscosa y 6% procesos industriales. La industria y el transporte son las mayores fuentes de contaminación y su crecimiento acelerado y desorganizado en las zonas urbanas más densamente pobladas ha generado un impacto negativo en el ambiente.

Actualmente existen una variedad de actividades de reducción de emisiones de GEI aplicables a sectores tales como energía, transporte, residuos, agropecuario, forestal e industrial, las cuales se vinculan al desarrollo de las políticas internacionales y nacionales frente al cambio climático. Las actividades de mitigación incorporan cambios tecnológicos en los sistemas de producción, eficiencia en el uso de materias primas y combustibles, cambio de combustibles, evitar emisiones de GEI por diferentes fuentes, y por la expansión, protección y conservación de ecosistemas forestales.

Teniendo en cuenta el incremento del CO₂ atmosférico y el problema que representa capturarlo y disponer del gran volumen que constituye, es necesario investigar tecnologías y prácticas para minimizar y remover las emisiones a través de procesos económica y técnicamente viables (CHAPARRO, *et al.* 2000).

Las plantas por medio de la fotosíntesis aprovechan una cantidad significativa del dióxido de carbono, por lo tanto aumentar la superficie boscosa representa una alternativa para reducir el impacto de este gas en la atmosfera. Teniendo en cuenta su lenta tasa de crecimiento, el requerimiento de agua y la extensión de la tierra necesaria así como su costo, constituye una desventaja para ser aplicada a amplia escala y a corto tiempo.

La biofijación del CO₂ por medio de microalgas, trae beneficios adicionales debido a que estas tienen una mayor capacidad de asimilar el dióxido de carbono a través de la fotosíntesis y obtener biomasa por el cultivo de las mismas. Su aplicación permite obtener productos de gran beneficio como el bio-combustible, bio-etanol, alimento orgánico para animales, además de contribuir en el control de este gas (ROSCH, 2009).

Este trabajo monográfico se realiza con el fin de dar a conocer alternativas actuales y aplicables a nuestro medio para el aprovechamiento y fijación del CO₂ desde el punto de vista biológico, teniendo como figuras principales a las microalgas en dicho proceso.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer un marco conceptual preliminar para el uso de microalgas como mecanismo de fijación del CO₂ presente en los gases de chimenea de equipos industriales de combustión, que sirva de punto de partida para futuras investigaciones en torno a esta tecnología en Colombia para la mitigación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las posibilidades de aplicación del uso de microalgas como agente fijador de CO₂ a partir de experiencias comprobables en otros países y su potencial impacto en la mitigación de los Gases del Efecto de Invernadero (GEI).
- Recomendar a partir de investigaciones internacionales y locales el grupo de especies de microalgas aptas para crecer bajo las condiciones medioambientales promedio de Colombia, empleando como sustrato gases de chimenea procedentes de equipos de combustión.
- Preseleccionar cualitativamente las tecnologías disponibles actualmente para el cultivo de las especies de microalgas recomendadas, tomando como referencia experiencias e investigaciones de otros autores.
- Evaluar las posibles aplicaciones comerciales en Colombia de la biomasa y subproductos obtenidos a partir del desarrollo de las microalgas recomendadas.

3. MARCO TEÒRICO

3.1 RESEÑA HISTORICA

Las microalgas han sido usadas durante siglos por el hombre para preparar alimentos y bebidas, en México precolonial y actualmente por tribus africanas, el alga cianófito *Spirulina* hacia parte de la dieta alimenticia de sus habitantes. Pero fue sólo hasta a mitad del siglo pasado que se ha incrementado el interés técnico en el tema.

En 1890 el microbiólogo holandés Biejelinçk realizó un estudio científico de las microalgas y estableció cultivos puros de *Chlorella vulgaris* en agua dulce. Estos cultivos y el de otras microalgas fueron objeto de atención por parte de numerosos investigadores, observándose que bajo condiciones de cultivo adecuadas e intensidad de luz de saturación, eran mucho más productivos que las plantas superiores o las células fotolitotróficas aisladas de las mismas.

La producción masiva de microalgas se llevó a cabo por primera vez en Alemania durante la II Guerra mundial, con el fin de obtener lípidos para su uso como fuente de combustible. Se utilizaron las microalgas *Chlorella pirenoidosa* y *Nitzschia palea*. A partir de esto, se empezó a considerar la biomasa microalgal como un suplemento importante, capaz de reemplazar las proteínas animales o vegetales convencionales para consumo directo del ganado o del hombre.

Una investigación en el Departamento de Biología de la planta del Instituto Carnegie en Washington estimuló el interés en el cultivo a amplia escala de las algas y los productos que se pueden obtener para beneficio del ser humano. El primer intento en este país de trasladar los requisitos biológicos de cultivo de algas

a gran escala fue hecho por El Instituto de Investigación de Stanford de 1948-1950.

Se genera a nivel mundial interés por la búsqueda de proteínas para la alimentación, por lo que se amplió los estudios a otras microalgas de agua dulce de los géneros *Scenedesmus*, *Coelastrum* y *Spirulina*, además de encontrar otras aplicaciones. Durante 1951 un avance adicional se realizó en la operación de una planta piloto con *Chlorella* por el Instituto Carnegie, lo cual demostró que el proyecto es técnicamente viable. Oswald y colaboradores (1952) de la Universidad de California, en Berkeley, sugirieron la aplicación de cultivos masivos de microalgas para el tratamiento de aguas residuales y producción de proteínas simultáneamente, así como el desarrollo de sistemas para la bioconversión de energía solar en metano.

En los años 60 se desarrollaron sistemas cerrados de cultivo de microalgas para utilizar en misiones espaciales, además se hicieron las primeras pruebas utilizando *Chlorella* en la dieta humana.

En la década de los 70 los trabajos de Woods Hole estimularon el desarrollo de sistemas para el cultivo masivo de microalgas marinas, junto con importantes investigaciones básicas. En la década de los 80 se establecen ya numerosas industrias para la producción de microalgas, sobre todo de *Spirulina* y *Dunaliella*. La producción de *Dunaliella* fue pronto considerada como una de las más prometedoras, por su contenido en β -caroteno y sus propiedades terapéuticas¹. En los últimos años, los desarrollos tecnológicos para la producción masiva de microalgas han sido significativos en todo el mundo.

Pueden ser utilizadas como biofertilizantes, en la purificación de aguas residuales, acondicionadores de suelo y alimento en acuicultura. Además de la producción de

ácidos grasos, pigmentos, vitaminas, antibióticos, productos farmacéuticos, así como hidrógeno, hidrocarburos y otros combustibles biológicos².

3.2 GENERALIDADES DE LAS MICROALGAS

Son un conjunto de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes y eucariontes, que se localizan en hábitats diversos como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes. Se han identificado alrededor de 40,000 especies aunque se estima que son 100,000, de las que se desconoce su composición bioquímica y metabolismo (GARIBAY, *et al.* 2009).

Las divisiones microalgales más representativas son: Cyanophyta, Euglenophyta, Cryptophyta, Chrysophyta, Pyrrophyta y Chlorophyta.

En el caso de la división Cyanophyta, los botánicos las consideran microalgas debido a la presencia de clorofila al igual que en plantas superiores, pero según los bacteriólogos son bacterias debido a su estructura procarionte (SÁNCHEZ, *et al.* 2002).

Los organismos pertenecientes a la división Euglenophyta son dulceacuícolas, unos pocos de ambiente estuarino y marino. Se encuentran en pequeño cuerpos de agua ricos en materia orgánica y en general son unicelulares solitarios.

Las Criptofitas pueden ser marinas o dulceacuícolas y la mayoría pueden ser fotosintéticas. Se consideran entre los organismos más obicuos existentes en aguas blandas.

² Composición nutritiva de las microalgas. [artículo en Internet]. <http://www.ual.es/~jlgui/Investigacion/Composicion.htm> [Consulta 5 de mayo 2010]

La división Chrysophyta o algas pardo-amarillas, aparecen esporádicamente en embalses tropicales y su contribución a la riqueza y a la biomasa es poco importante en los trópicos. Se divide en seis clases, pero Crysophyceae y Bacillariophyceae son las más importantes. Las Crysophyceae o algas doradas predominan en aguas dulces, la mayoría son fototróficas. Los organismos de la clase Bacillariophyceae son conocidos como diatomeas y son generalmente unicelulares. Contienen sílice polimerizado en sus paredes celulares y almacenan carbón en diversas formas.

Las microalgas Pyrrophyta en su clase Dinophyceae, son llamadas dinoflageladas y se presentan en aguas marinas, salobres y dulces.

La división Chlorophyta constituye uno de los mayores grupos de microalgas, si se tiene en cuenta su abundancia en género y especie. Se encuentran generalmente en lagos y ríos (RAMÍREZ, 2000).

Las microalgas desempeñan un papel muy importante ya que son los principales productores primarios de materia orgánica a través de la fotosíntesis. Contribuye con el 50% de la actividad fotosintética del planeta y forman la base de la cadena alimenticia para más del 70% de la biomasa del mundo (QUEVEDO, 2006).

3.3 COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA

Las microalgas presentan un alto contenido de proteínas, lípidos ricos en ácidos grasos insaturados, ácidos nucleicos, carbohidratos, vitaminas hidro y liposolubles, pigmentos y minerales. También se pueden encontrar otras moléculas como carotenoides, clorofila, enzimas, aceites esenciales, glicerol, entre otros. Cerca del 90% del peso seco está constituido por proteínas, lípidos y carbohidratos. El componente principal es protéico con aproximadamente 50% del material seco, el segundo que son los lípidos o carbohidratos depende de la especie y condiciones

de cultivo. Los ácidos nucleicos y las cenizas son proporciones menores del peso seco. (QUEVEDO, 2006).

3.4 PARAMETROS DE CULTIVO

3.4.1 Luz. La totalidad de la radiación que emite el espectro lumínico no es aprovechada en la fotosíntesis microalgal, sólo es útil el rango del espectro comprendido entre los 400 y 700 nm de longitud de onda. Representa la fuente de energía para realizar la fotosíntesis, sintetizando los nutrientes necesarios (GARIBAY, *et al.* 2009).

3.4.2 Temperatura. Las microalgas tienen una temperatura de crecimiento de 15 a 40°C que depende de cada especie, a pesar de que pueden tolerar amplios rangos, su respuesta a variaciones en la temperatura puede afectar sus requerimientos nutricionales, metabolismo y composición celular (MOHEIMANI, 2005).

3.4.3 Salinidad. La salinidad en las aguas naturales se incrementa con las altas temperaturas debido a la alta evaporación tanto en tanques abiertos como cerrados. Por la variación que se presenta en la concentración de sales en el agua, a través de fenómenos como la evaporación y precipitación, se puede llegar a inhibir el crecimiento de las microalgas por la carencia o abundancia de las sales necesarias para su desarrollo. Para controlar la salinidad a nivel operativo, usualmente se debe agregar agua fresca o sal según el caso (MOHEIMANI, 2005).

3.4.4 pH. El pH es uno de los factores más importantes en el cultivo. Las membranas plasmáticas de las células microalgales no son libremente permeables a los iones hidrógeno e hidroxilo, por lo que las concentraciones de hidrogeniones intracelulares y extracelulares no están equilibradas. Cada microalga tiene un pH

óptimo para su cultivo (entre 7,0 y 8,0). El pH del medio se ve afectado por la cantidad de dióxido de carbono disuelto, temperatura que a su vez controla la solubilidad del CO₂, la actividad metabólica de las microalgas y la fuente de nitrógeno suministrada para el crecimiento. La asimilación de nitrato tiende a aumentar el pH, pero cuando se utiliza amonio este puede disminuir hasta niveles de 3,0. A niveles de 11,0 en adelante hay inhibición del crecimiento (QUEVEDO, 2006).

3.4.5 Nutrientes. Los nutrientes requeridos por una microalga se clasifican como macronutrientes, los cuales incluyen el carbono, nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, azufre y potasio. Por otro lado se encuentran los micronutrientes o elementos trazas como el cobre, hierro y zinc. Para la producción de biomasa de microalgas es necesario tener en cuenta el tipo de alga utilizado, debido que tienen diferentes requerimientos nutricionales.

La composición del medio de cultivo y las especificaciones del inóculo a utilizar permiten el aumento de la cantidad de biomasa. A continuación la importancia de algunos macronutrientes:

- Carbono: Es el macronutriente más importante y constituye el 50% de la biomasa microalgal. Su crecimiento está limitado por la fuente de carbono sea orgánico e inorgánico. Es necesario para la construcción de moléculas orgánicas y fuente de energía para las reacciones metabólicas.
- Nitrógeno: Es el segundo elemento que tiene mayor contribución a la materia seca. La fuente puede ser inorgánica (nitratos, nitritos y amino), aunque también puede ser orgánico y se usa en ese caso urea. Permite sintetizar aminoácidos, algunos hidratos de carbono y lípidos.
- Fósforo: Interviene en los procesos celulares de transferencia de energía y síntesis de ácidos nucleicos. Como fuente se usa fosfato inorgánico. Su

deficiencia provoca un descenso en la síntesis de ácidos nucleicos, ATP (trifosfato de adenosina) y clorofila. (QUEVEDO, 2006).

3.4.6 Oxígeno. Una concentración alta de oxígeno producido por la fotosíntesis es un importante factor inhibitorio de crecimiento que se debe tener en cuenta en el cultivo de las microalgas. En sistemas cerrados y abiertos el crecimiento de varias especies de microalgas puede ser inhibido por niveles de oxígeno por encima de la saturación del aire. La supersaturación del oxígeno puede llevar a la inhibición de la fotorespiración y la muerte de la microalga por foto- oxidación (MOHEIMANI, 2005).

3.4.7 Agua. Para el cultivo de las microalgas se emplean entre 200 o más de 2 millones de litros, teniendo en cuenta el sistema y escala empleada. Las fuentes pueden ser salinas (mar, estuarios), dulces (ríos, lagos u otros) y aguas residuales del sector agropecuario. Según datos recopilados por Navid Moheimani para su tesis, el agua puede reutilizarse casi en su totalidad debido a que no se contamina en el proceso. Sin embargo se recomienda evaluar las condiciones del cultivo, la microalga a emplear y el producto que se quiere obtener para así determinar su manejo (MOHEIMANI, 2005).

3.4.8 Dióxido de carbono. La clorofila de las microalgas absorbe el CO₂ con la ayuda de la energía solar, convirtiéndolo en azúcar y otros nutrientes usados para sintetizar los demás constituyentes de la biomasa, produciendo O₂ que es liberado a la atmosfera a cambio del CO₂ absorbido (PRIBALDI, 2009).

En el ciclo de vida de las microalgas durante el día respira, consumiendo CO₂ y liberando O₂, y durante la noche este proceso se invierte, por los procesos de respiración vegetal (RAMÍREZ, 1998).

Las microalgas pueden automantenerse en un sistema cerrado donde únicamente se deben controlar factores ambientales como temperatura y pH. La inyección de CO₂ en el cultivo previene la sedimentación de las microalgas y asegura que todas las células reciban la misma exposición a la luz y los nutrientes. El crecimiento de las microalgas puede inhibirse según la concentración de dióxido de carbono presente en el medio de cultivo. Esto depende del tipo de especie que se emplee. (RAMOS, *et al.* 2010).

3.5 SISTEMAS DE CULTIVO

Las microalgas presentan su ciclo de crecimiento cada 24 a 48 horas, necesitan menos espacio para su producción que un cultivo o superficie boscosa, alrededor de 10 a 100 veces menos (PRIBALDI, 2009).

Para la producción de las microalgas en una planta piloto se han presentado una serie de obstáculos a través del proceso de investigación como la falta de conocimiento de las microalgas, el estrés físico impuesto por la producción a gran escala y el desconocimiento de variedades más productivas (McGINN, 2008). Los sistemas de cultivo de biomasa microalgal a gran escala pueden ser abiertos como los estanques o cerrados como los fotobioreactores.

3.5.1 Cultivo de microalgas en sistemas abiertos. Es el método más usado para producir biomasa microalgal. Las algas necesitan CO₂ atmosférico, nutrientes y una fuente de luz sea natural o artificial.

A nivel industrial la producción es hecha en tanques abiertos, con la operación en régimen continuo y semicontinuo y control de los parámetros más importantes (HENNENBERG, *et al.* 2009). El sistema se puede realizar al aire libre o realizarse bajo condiciones de invernadero:

- **Al aire libre:** Se trata de piscinas descubiertas a las cuales se les suministra nutrientes para que las microalgas puedan reproducirse a un ritmo acelerado. Es el sistema menos eficiente aunque el más económico. A nivel industrial no resulta rentable.
- **En invernadero:** Los tanques de agua en los cuales se reproducen las microalgas están protegidos bajo condiciones de invernaderos. Las ventajas de este sistema son un mejor control de la temperatura y una pérdida muy reducida de agua. Estos factores favorecen una mayor reproducción de las algas y por lo tanto un mayor rendimiento.

Como características principales de estanques abiertos están:

- Un canal cerrado de recirculación que requiere una rueda de paletas para garantizar mezcla y aireación.
- Los materiales para su construcción dependen del tipo de estanque que se desea. En el caso de uno tipo pista requiere concreto, fibra de vidrio o materiales que garanticen la sostenibilidad en el tiempo y buena iluminación. También el plástico es una opción por su bajo costo.
- Las dimensiones típicas son de 30 cm de profundidad y entre 100 a 250 hectáreas³.

Hay diferentes tipos de estanques y los más usados son:

- **Tanque circular:** presenta un brazo de rotación, el cual puede ser operado en aguas de una profundidad de 10-20 cm con un sistema de mezclado para así prevenir sedimentación de células en puntos con baja turbulencia resultando en pérdida de células e incrementando el riesgo celular (Figura 1a). (VEMA, *et al.* 2010)
- **Tanque circular con agitación:** de 45 m de diámetro y 30 a 70 cm de profundidad, en algunos casos son cubiertos con fibra de vidrio (Figura 1b). Su

³ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Producción de biodiesel a partir de microalgas: Introducción a la Ingeniería Bioquímica. 2009; 1-20p. www.monografias.com/...microalgas/producción-biodiesel-microalgas. [Consulta: 26 abril de 2010].

diseño es menor a 10 hectáreas debido a la incapacidad del brazo de mezclar todo el cultivo uniformemente.

- **Tanques tipo pista solo o en grupo:** son poco profundos, entre 15 a 25 cm de profundidad y cubre cerca de 0,5 a 0,6 hectáreas
(Figura 1c). Hay sistemas para el mezclado como aspas y bombas de aire, lo que le proporciona una mayor productividad. Pueden estar forrados con plástico o cemento. (MOHEIMANI, 2005).



Figura 1. Fotografías de diseños de tanques abiertos (a) Tanque circular con brazo de rotación en Australia occidental, cultivo *Dunaliella salina*, (b) Tanque circular con agitación en República Checa, cultivo *Scenedesmus*, (c) Tanque tipo pista en Taipei, cultivo *Chlorella*. Fuente: MOHEIMANI, 2005

3.5.2 Cultivo de microalgas en sistemas cerrados. Son sistemas de cultivo cerrados, donde los conductos transparentes son aislados de exterior. Los parámetros como nutrientes, luz, intercambio de gases entre otros están controlados técnicamente. Los costos económicos y energéticos adicionales son

altos, pero la contaminación es baja. Pueden ir situados dentro de invernaderos de plástico o de cristal, para disponer de una temperatura ambiente más elevada. El fotobioreactor tubular es muy popular, las algas son accionadas por una bomba a través de los tubos⁴.

Hay diferentes tipos de fotobioreactores y se encuentran:

- **Tubos plásticos o de vidrio de forma triangular:** Se hacen fluir los gases de CO₂ y O₂ desde la parte baja de la hipotenusa y las microalgas con medio de cultivo fluyen en sentido opuesto.
- **Tubulares en forma horizontal:** son túbulos hechos de acrílico, vidrio, plástico o teflón con aprox. 3-6 cm de diámetro y de 10-100 m de longitud (Figura 2a). El cultivo pasa a través de estos tubos por medio de bombas. Los tubos pueden estar organizados vertical, horizontal o cónico helicoidal. La temperatura se controla con enfriamiento evaporativo o intercambio de calor. Por medio de este diseño las microalgas reciben la misma cantidad de luz, nutrientes y evita que se precipiten.
- **Columna vertical de burbujas:** Se genera circulación del medio con microalgas en una columna vertical a través del flujo de gases como dióxido de carbono (Figura 2b). Se ilumina a través de tubos de luz y su objetivo es disminuir el costo del cultivo a gran escala y hacerlo más simple.
- **Flat Panel Reactors (Reactores de paneles planos):** Consiste en una caja rectangular transparente con 1 a 5 cm de profundidad. Una capa fina de suspensión de células circula por una placa, lo cual permite que la luz pueda ser absorbida (Figura 2c). Este tipo de reactor permite una alta densidad celular.

⁴ Iden. Página 13

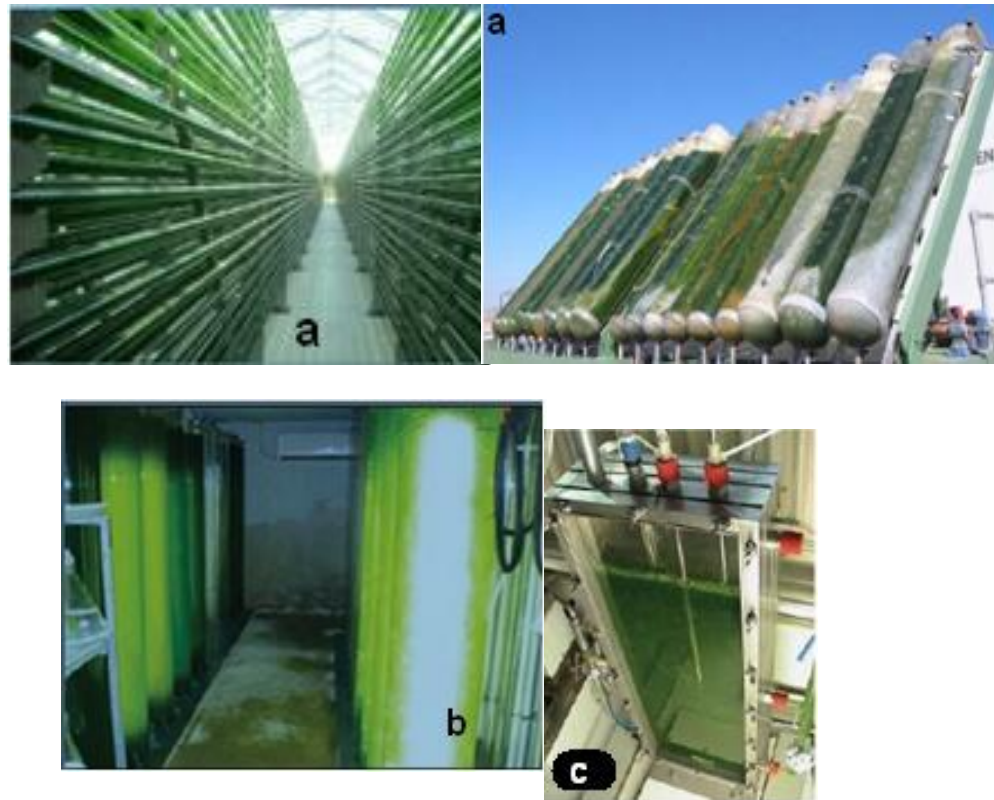


Figura 2. Fotografías de diseños de Fotobioreactores (a) Tubular en forma horizontal e inclinado (Greenfuels), (b) Columna vertical de burbujas, (c) Reactor de paneles planos. Fuente: McGINN, 2008

3.5.3 Mantenimiento de los sistemas de cultivo. Un tema a tratar es la limpieza de ambos sistemas, los biofilms que se forman en las paredes reduce la penetración de la luz. Este inconveniente se puede manejar manteniendo un alto flujo de turbulencia con bombas de aire y lavando con peróxido de hidrógeno para remover partículas pequeñas. Por otro lado, la remoción del agua se debe realizar para evitar el estancamiento de la misma y así evitar adherencia de microalgas a las paredes de los estanques, dificultando la cosecha de estas, y aumentar el intercambio del agua con el oxígeno. En la tabla 1 se mencionan ventajas y desventajas de los sistemas de cultivo abiertos y cerrados⁵.

⁵ Iden. Página 13

Tabla 1 Cuadro comparativo tanques abiertos-fotobioreactores

Parámetros	Tanques abiertos	Fotobioreactores
Requerimiento de espacio	Alto	Bajo para el mismo
Pérdida de agua	Muy alto, puede ocasionar precipitación de sales	Bajo
Pérdida de CO₂	Alta dependiendo de la profundidad del tanque	Baja
Concentración de oxígeno	Usualmente suficientemente bajo, debido a la continua y espontanea liberación de gases	Aumenta en sistemas cerrados, por lo cual requiere dispositivos para intercambio de gases. El oxígeno debe ser removido para evitar la inhibición de la fotosíntesis y el daño por foto-oxidación.
Temperatura	Variable alta, depende de la región, algunos la controlan con tanques profundos	A veces necesitan enfriamiento (rociando agua sobre en fotobioreactores o sumergiendo tubos en baños de enfriamiento)
Mezclado-turbulencia	Bajo usualmente (mezclado apacible)	Usualmente alto, se requiere un flujo rápido y turbulento para el mezclado, dispositivo para intercambio de gases)
Limpieza	Ninguno	Requerido (biofilms reducen penetración de la luz) pero causa rallado y limita la vida útil del equipo
Riesgo de contaminación	Alto, limita el número de especies que puede crecer	Medio a bajo
Calidad de biomasa	Variable	Reproducible
Concentración de biomasa	Bajo entre 0.1 y 0.5 g/l	Alto entre 0.5 y 8 g/l
Flexibilidad de producción	Solamente pocas especies	Alta, posibles cambios
Control del proceso y reproducibilidad	Limitada (velocidad de flujo, mezclado, temperatura solamente en tanques profundos)	Posible dentro de ciertas tolerancias
Dependencia del clima	Alta (luz, temperatura, precipitación)	Media (intensidad de luz, enfriamiento requerido)
Ponerse en marcha	6-8 semanas	2-4 semanas
Costos	Alto, aproximadamente 100,000 dólares por hectárea	Alto 250,000 a 1 millón por hectárea
Costos de cosecha	Alto, depende de la especie	Baja para una alta concentración de biomasa y un mejor con ciertas especies
Aplicaciones comerciales actuales	5000 (8 a 10,000)t de biomasa por año	Comida o cosméticos

Fuente: HENNENBERG, *et al.* 2009

3.6 BIOFIJACIÓN DE DIOXIDO DE CARBONO DE LOS GASES DE CHIMENEA

En diferentes grupos de investigación se ha estudiado la eficiencia de fijación de CO₂ por las microalgas por medio de la fotosíntesis. A escala de laboratorio Cheng et al en 2006 encontró una eficiencia de 6,24 g CO₂/l/día si se mantiene esta tasa en un bioreactor a gran escala, la captura sería de 26 Kg/h de dióxido de carbono en un reactor de 100.000 l o 114 T/año asumiendo días lumínicos de 12 horas. Kajiwara et al en 1997 encontró que la cepa *Synechococcus* alcanzó una tasa máxima de absorción de CO₂ de 0,025 g/l/h o 0,6 g/l/día en una concentración de masa celular de 0,286 g / l. Si se aplica una ampliación a escala, equivaldría a un biorreactor de tamaño de 4000 m³ con una tasa de fijación promedio de 1 tonelada de CO₂/h de las fuentes de emisión.

Hirata et al en 1996 utilizó la cepa *Chlorella sp.* UK001. La tasa media de fijación de CO₂ fue de 0,0318 g CO₂/l/día. La eficiencia de conversión de energía a biomasa se estimó en 4,3%.

Murakami et al en 1997 utilizaron la cepa *Synechocystis* en un biorreactor de 5 litros con condiciones optimizadas, alcanzaron una velocidad máxima de fijación de CO₂ de 1,5 g CO₂/l/día. La cepa *Botryococcus braunii*, alcanzó una tasa de crecimiento de alrededor de 0,5 g / l / día. La biomasa de esta microalga en particular contenía más del 15% de su peso seco como hidrocarburos, y su tasa de fijación de CO₂ superó a 1 g / l / día⁶.

Las industrias a raíz de sus procesos de combustión generan una serie de gases, entre los cuales se encuentra el dióxido de carbono, siendo el de mayor importancia en el calentamiento global. En busca de una tecnología que mitigue o reduzca las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, se están realizando una

⁶ Mitigación de dióxido de carbono en algas. [artículo de internet]. <http://www.ficoespectro.com/category/soluciones/>. [Consulta: 18 mayo de 2010].

serie de investigaciones para aplicar los bioreactores con microalgas como alternativa para dicho problema.

Dentro de los estudios realizados se plantea la posibilidad de acoplar a las chimeneas de emisión de CO₂ de las fábricas a un cultivo de las microalgas aprovechando dicho gas como fuente de carbono para su crecimiento y desarrollo, en lugar de ser emitido a la atmósfera, donde colabora con el efecto invernadero (BENEMAN, 2003).

Los cultivos de microalgas tienen la capacidad de utilizar altos volúmenes de CO₂ proveniente de procesos industriales y de generación de energía eléctrica. Hasta 90% ó más del CO₂ inyectado en los estanques puede ser utilizado eficientemente por las microalgas⁷.

Identificar las concentraciones de dióxido de carbono a las que las microalgas son tolerantes es importante, teniendo en cuenta que se tiene como fuente las emisiones de chimenea y asumiendo que presenta una concentración de CO₂ entre 15-20% v/v aproximadamente. Muchas especies han sido evaluadas en concentraciones por encima del 15%. Kodama et al en 1994, encontró que *Chlorococcum littorale* puede crecer a 60% de CO₂ usando técnicas de adaptación. Nakano et al en 1996, estudiaron a *Euglena gracilis*, la cual puede crecer entre 5-45% en presencia del gas, aunque su crecimiento es el mejor al 5%. Hirata y Hanagata en sus respectivos grupos de investigación manifestaron que *Chlorella sp* puede desarrollarse con éxito bajo un 10% de dióxido de carbono y aún con un 40%.

Scenedesmus sp crece a un 80%, pero su máxima masa celular se observó entre 10-20% según Haganata et al en 1992. *Cyanidium caldarium* y otras especies

⁷ Iden. Página 13

puede crecer en CO₂ puro según estudios de Graham y Wilcox en 2000. La tabla 2 resume la tolerancia al dióxido de carbono de varias especies.

Tabla 2 Tolerancia de microalgas a diferentes concentraciones de dióxido de carbono

Especies	Concentración CO₂ (%) máximo crecimiento	Fuente
<i>Cyanidium caldarium</i>	100	Graham y Wilcox, 2000
<i>Scenedesmus</i> sp	80	Haganata et al, 1992
<i>Chlorococcum littorale</i>	60	Kodama et al, 1994
<i>Synechococcus elongatus</i>	60	Miyairi, 1997
<i>Euglena gracilis</i>	45	Nakano et al, 1996
<i>Chlorella</i> sp	40	Haganata et al, 1992
<i>Eudorina</i> sp	20	Haganata et al, 1992
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	15	Nagase et al, 1998
<i>Nannochloris</i> sp	15	Yoshihara et al, 1996
<i>Chlamydomonas</i> sp	15	Miura et al, 1993
<i>Tetraselmis</i> sp	14	Matsumoto et al, 1995

Fuente: CUELLO y ONO, 2005

Junto con el dióxido de carbono, se eliminan gases ácidos como NO_x y SO₂. En algunas investigaciones se han encontrado microalgas tolerantes a ciertas concentraciones de estos gases como *Nannochloris* sp, *Dunaliella tertiolecta*, *Tetraselmis* sp y *Chlorella* teniendo en cuenta las condiciones de crecimiento. Las microalgas pueden asimilar concentraciones de CO₂ entre 0.04- 100% v/v, seleccionando la especie adecuada y un rango de temperatura de 25 a 100 ° C utilizando tecnología apropiada (CUELLO y ONO, 2005).

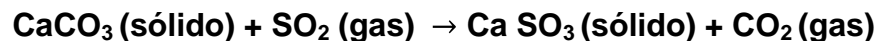
Seambiotic es la primera empresa en el mundo que ha desarrollado el cultivo y procesamiento de las microalgas marinas usando gases de combustión de Plantas Eléctricas. Se encuentra ubicada en Israel y plantea un sistema que consiste en conductos de desulfurización para una mejor asimilación del dióxido de carbono en el cultivo. En la ciudad de Ashkelon, Seambiotic desarrolló la primera planta piloto de FGD (Conductos de Gas para Desulfurización), la cual es

una tecnología encargada de retirar el dióxido de sulfuro de las emisiones de las chimeneas, para evitar alguna inhibición por estos gases y poder ser asimilado el CO₂ por las microalgas. El proyecto se localiza en una de las cuatro plantas a carbón de La Corporación Eléctrica de Israel.

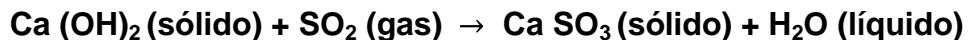
El FGD remueve el gas venenoso contenido en la descarga de carbón mineral o calderas de petróleo, además de remover material particulado. La planta produce yeso como subproducto y es reciclado como tablas de yeso o cemento.

El SO₂ (óxido de azufre) es un gas ácido que puede ser removido con un material absorbente o de tipo alcalino (BEN-AMOTZ, 2009).

-La reacción se realiza a través de un “lavado en húmedo” usando piedra caliza, CaCO₃ para sulfito de calcio, CaSO₃:



- Cuando la limpieza en húmedo se realiza con Ca (OH)₂ (cal), la reacción produce CaSO₃ (sulfito de calcio):



-Cuando la limpieza en húmedo se realiza con Mg (OH)₂ (hidróxido de magnesio) la reacción produce MgSO₃ (sulfito de magnesio):



-Algunos sistemas de FGD van un paso más allá oxidando el CaSO₃ (sulfito de calcio) y produce yeso CaSO₄ · 2H₂O:



3.7 CULTIVO DE MICROALGAS

Las microalgas son microorganismos unicelulares que componen la base de la cadena alimenticia en océanos, lagos y ríos. El proceso de fotosíntesis es alrededor de 40 veces más eficiente comparado con las plantas terrestres. Su

cultivo representa una alternativa para la solución de problemas como el calentamiento global. A nivel mundial las investigaciones han permitido descubrir su potencial. Cada microalga presenta una estrategia para establecerse bajo ciertas condiciones ambientales. Parte de este conocimiento se debe a las diferentes investigaciones realizadas por medio de su cultivo en el laboratorio (LIZAMA, 2000).

El inóculo requerido para producción es pequeño, teniendo en cuenta el tamaño de los estanques o fotobioreactores. Es cerca del 1-2% de la biomasa total (BENEMAN, 2008).

Universidades y empresas dedicadas a su estudio han identificado el potencial de diferentes microalgas basándose en los subproductos que generan y sus condiciones de crecimiento. Dentro de la revisión bibliográfica realizada se elaboró una lista de las más importantes hasta el momento basándose en los estudios reportados. A continuación la tabla 3 indica las microalgas más destacadas.

Tabla 3 Biofijación de dióxido de carbono por microalgas según investigadores

Microalga	Fuente
<i>Botryococcus braunii</i>	HENNEBERG, 2009 PRIBALDI, 2009 ATEHORTUA, 2008
<i>Chlorella sp</i>	
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	
<i>Cylindrotheca sp</i>	
<i>Dunaliella primolecta</i>	
<i>Euglena gracilis</i>	
<i>Isochrysis sp</i>	
<i>Monallanthus salina</i>	
<i>Nannochloris sp</i>	
<i>Nannochloropsis sp</i>	
<i>Neochloris oleoabundans</i>	
<i>Nitzschia sp</i>	
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	
<i>Schizochytrium sp</i>	
<i>Spirulina sp</i>	
<i>Tetraselmis sueica</i>	
<i>Scenedesmus sP</i>	QUEVEDO, 2006

Fuente: Autor

La producción de microalgas y la obtención de sus productos es uno de los campos menos explorados en Colombia, falta investigar las cepas silvestres y determinar su posible aplicación a nivel industrial. La Universidad de Antioquia a través de un grupo de investigadores del Instituto de Microbiología ha desarrollado estudios para la aplicación de las microalgas en la producción de biocombustible y así llegar a establecer un prototipo de cultivo⁸. En el Grupo de Bioprocesos del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad ya mencionada, se realizó pruebas con la microalga *Scenedesmus sp*, debido a que posee niveles de lisina superiores al patrón de la FAO, proporcionando una aplicación potencial en la industria de alimentos balanceados para animales⁹. Por otro lado, un estudio científico de la Universidad Nacional desde hace dos años se concentro en hallar microalgas colombianas capaces de producir biocombustible, investigando los géneros *Chlorella* y *Botryococcus* para agua dulce, y *Nanochloropsis* e *Isochrysis* para agua salada. En el país las pocas investigaciones realizadas no han tenido gran alcance, falta inversión y apoyo por parte del Estado, impidiendo la elaboración de estudios más profundos sobre estos microorganismos para obtener mayores beneficios¹⁰.

El clima en el país es tropical, manteniendo una temperatura uniforme la mayor parte del año. Está determinado por aspectos geográficos y atmosféricos que desarrollan un amplio mosaico de climas que van desde 30°C (nivel del mar) hasta temperaturas bajo 0°C (alta montaña en nieves perpetuas)¹¹. El potencial energético solar en todo el territorio tiene un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m², en la península de La Guajira tiene un valor de 6,0 kWh/m² ¹².

⁸ Microalgas una maravilla para biodiesel. [artículo en internet]. <http://biodiesel.com.ar/444/microalgas-una-maravilla-para-biodiesel>. [Consulta: 8 julio de 2010].

⁹ Crecimiento de *Scenedesmus sp* en diferentes medios de cultivo para la producción de proteína microalgal. [artículo en internet]. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?>. [Consulta: 8 julio de 2010].

¹⁰ Microalgas otra opción para producir biocombustible. [artículo en internet]. <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-429.htm>. [Consulta: 8 julio de 2010].

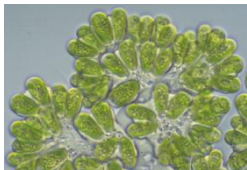
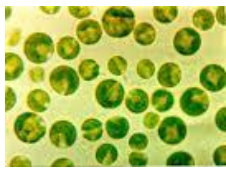
¹¹ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. [artículo en internet]. <http://www2.ideam.gov.co/biblio/bol17/bol17a.htm>. [Consulta: 29 mayo de 2010].

¹² Atlas de Radiación Solar de Colombia. [artículo en internet]. http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/0-Primera_Parte.pdf. [Consulta: 16 julio de 2010].

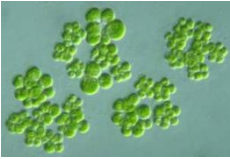
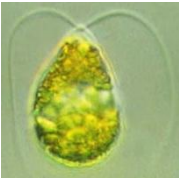

La intensidad media de radiación medida fuera de la atmósfera en un plano normal es aproximadamente de 2.26 kW/m²¹³.

En la tabla 4 se sugieren algunas microalgas para su cultivo en el país teniendo en cuenta los aspectos ya mencionados, las condiciones necesarias para su cultivo y la información recopilada de diferentes grupos de investigación en el mundo.

Tabla 4 Microalgas para cultivo en Colombia

Microalga	Características	Condiciones de cultivo	Fuente
<p><i>Botryococcus braunii</i></p>  <p>Fuente: PRIBALDI, 2009</p>	<p>Son microalgas de superficie. Se encuentra en agua dulce como lagos, embalses y estanques. Es común en aguas semiduras. Se considera fuente de hidrocarburo biológico, cerca del 75% de su peso seco contiene hidrocarburo para ser usado en biocombustible.</p>	<p>Crece a una temperatura entre 25-30°C, Iluminación aproximada de 800 lux (lámparas de 60 W), una salinidad de 0.15 Molar de NaCl y niveles de pH entre 7 - 8,5.</p>	<p>PRIBALDI, 2009</p>
<p><i>Chlorella</i></p>  <p>Fuente: PRIBALDI, 2009</p>	<p>Tiene niveles altos de eficiencia fotosintética y mantienen una gran tasa de división celular. Fuente natural de proteínas, vitaminas y minerales.</p>	<p>Tolera amplia temperaturas siendo óptima 25-30°C, Iluminación aproximada de 600 lux (lámparas fluorescentes de 40 w), pH 7-7,5 y aireación constante.</p>	<p>VERA, <i>et al.</i> 2007</p>

¹³ Energía Solar. [artículo en internet]. <http://www.ecotec2000.de/espanol/sun1.htm>. [Consulta: 16 julio de 2010].

<p><i>Nannochloropsis</i></p>  <p>Fuente: BEN-AMOTZ, 2009</p>	<p>Dependiendo de la especie las condiciones de temperatura y salinidad varían. Se cree que crece mejor en gas de tubería de caldera, que en CO₂ puro.</p>	<p>Son tolerantes con diferentes temperaturas, entre 18 y 30° C y distintos niveles de salinidad (entre 33 y 36 %). Niveles de pH entre 7,8 y 8 son los adecuados.</p>	<p>MANTECÓN, 1997</p>
<p><i>Dunaliella</i></p>  <p>Fuente: BEN-AMOTZ, 2009</p>	<p>Se caracteriza por su alta tolerancia a la salinidad. Son eurihalinos.</p>	<p>Adaptados a concentraciones de sal desde los 50 Mm de NaCl hasta casi 5,5 M de NaCl. Temperatura óptima de 30°C. Tolera un pH máximo de 8. Iluminación de 6000 lux.</p>	<p>FERNANDEZ, 2003 SERPA, 2005</p>
<p><i>Scenedesmus</i></p>  <p>Fuente: QUEVEDO, 2006</p>	<p>Son microalgas de superficie. Se aplican en cultivos a amplia escala, el tratamiento de aguas residuales y la producción de biomasa. Según la especie pueden vivir en aguas con elevado contenido mineral. Y dominan en un sistema cuando la concentración de fósforo es alta.</p>	<p>Su crecimiento es óptimo entre 30-35° centígrados. Crece en medios ligeramente ácidos, pH por encima de 10 inhibe su crecimiento. Tienen amplio rango de salinidad. Intensidad lumínica de 1000 lux (lámparas de luz blanca 75 W).</p>	<p>RAMOS, 2010 QUEVEDO, 2006</p>

Fuente: Autor

3.8 COSECHA DEL SISTEMA DE CULTIVO

En la producción de microalgas se conocen diferentes técnicas para la cosecha como son:

- **Filtración:** Separa el cultivo en una fase líquida y en una sólida, la cual contiene los microorganismos o biomasa (Figura 3a). Esta puede ser separada de la parte líquida por centrifugación o con una unidad con filtro.
- **Centrifugación:** Se basa en la diferencia de densidad entre las microalgas y el medio líquido, extrae el 80-90% con un aceleración de 500 a 1000 rpm (Figura 3b). Se aplica a cultivos pequeños debido a su alto costo energético, por lo que a gran escala resulta muy costoso. La centrifugación con microfiltración, es un método el cual utiliza un microfiltro para así garantizar la extracción¹⁴.
- **Biofloculación:** Es un proceso espontaneo de floculación- sedimentación de las células en el cual se conoce poco las causas de este fenómeno (Figura 3c). Otra técnica es interrumpir el flujo de CO₂ ocasionando auto-floculación. Sin embargo, es poco comprendida las condiciones óptimas de las microalgas y el medio de cultivo para aplicarla (BENEMAN, 2008).
- **Floculación química:** Se usa aluminio, cloruro férrico y Chitosin, el cual es un producto comercial (Figura 3d). Su aplicación es costosa, teniendo en cuenta que la cosecha se realiza en sistemas a amplia escala (ROSCH, 2009).

¹⁴ Iden. Página 13

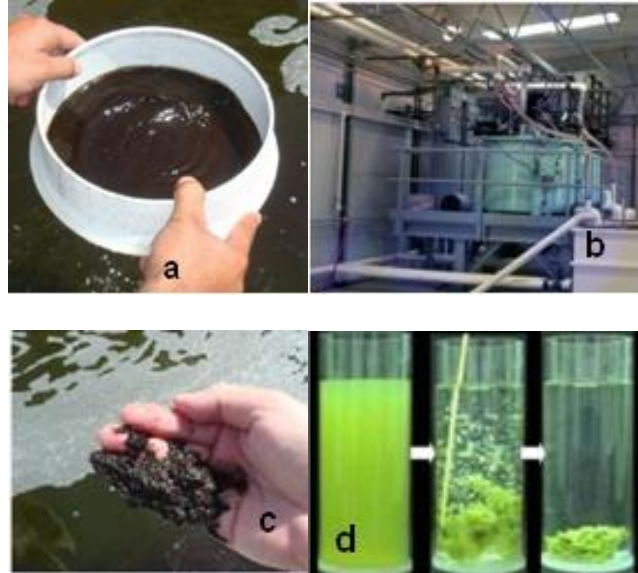


Figura 3. Fotografías de técnicas de cosecha (a) Filtración de cultivo de diatomeas (b) Equipo de centrifugación (c) Auto-floculación de diatomeas (d) Floculación química de microalgas. Fuente: BEN-AMOTZ, 2009 y ROSCH, 2009.

Los técnica para realizar la cosecha del cultivo se pueden combinar entres si, como filtración seguida de sedimentación o la centrifugación y posterior floculación química (ROSCH, 2009).

El 20 a 40% del volumen del tanque puede ser cosechado diariamente, teniendo en cuenta la época del año y otros factores. En el momento no se ha encontrado una tecnología para la cosecha a bajo costo y práctica, debido a que las características de los métodos anteriormente expuestos dificultan su aplicación industrial (BENEMAN, 2008).

3.9 APLICACIONES DE LAS MICROALGAS

Las aplicaciones productivas y comerciales de las microalgas son numerosas, van desde la producción de suplementos alimenticios y nutricionales de consumo humano y animal hasta la obtención de productos activos para la industria farmacéutica y cosmética. Son organismos poco explorados, que en la actualidad son objeto de estudio para la búsqueda de nuevas sustancias bioactivas.

La tabla 5 enumera los diversos usos conocidos actualmente de las microalgas en diferentes campos.

Tabla 5 Uso comercial de las microalgas

Grupo	Especie	Producto	Aplicación
Aplicación a larga escala			
Cyanobacteria	<i>Arthrospira (Spirulina) platensis</i>	Ficocianina, biomasa	Suplemento dietario, cosméticos, alimento animal
Algas verdes (se conocen de 8000-10000 ⁵ especies)	<i>Chlorella vulgaris</i>	biomasa	Suplemento dietario, alimento animal, cosméticos, biomasa, tratamiento de aguas
	<i>Dunaliella salina, D. tertiolecta</i>	Carotenoide, β -caroteno	Suplemento dietario, alimento animal, aditivos para alimentos
	<i>Haematococcus pluvialis</i>	Carotenoide, astaxantina	Suplemento dietario, fármacos, aditivos para alimentos
Haptophyta	<i>Pavlova lutheri</i> <i>Isochrysis galbana</i>	Ácidos grasos	Alimento animal, biodiesel
Diatomeas y otras heterokontofitas (se conocen 5000 especies)	<i>Phaeodactylum tricornutum</i> , <i>Nitzschia</i> sp., <i>Cyclotella</i> sp., <i>Nannochloropsis oculata</i>	Ácidos grasos, biomasa	Suplemento dietario, alimento animal, combustible
Pequeña escala y alta calidad de aplicación			
Cyanobacteria	<i>Lyngbya majuscula</i> and <i>lager-heimii</i>	inmunomodulador	Industria farmacéutica
	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	biomasa	Suplemento dietario
	<i>Oscillatoria</i> sp.		Tratamiento de agua residuales
Algas rojas (se conocen alrededor de 4000 especies)	<i>Porphyridium</i> spp. <i>Cyanidium caldarum</i> <i>Galderia partite</i>	Ficobiliproteínas, polisacáridos	Fármacos, suplemento dietario, cosméticos, C-fijación
Algas verdes	<i>Muriellopsis</i> sp	Carotenoides, luteína	Alimento animal
	<i>Botryococcus</i> sp.	Lípidos	Alimento animal, biodiesel
	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Hidrógeno	combustible
	<i>Tetraselmis suecica</i>	Ácidos grasos	Alimento animal
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	Ácidos grasos	C-fijación, producción de lisina, alimento animal
	<i>Monoraphidium, Nannochloris, Chlorococcum</i>	Biomasa, lípidos	C-fijación, combustible
	<i>Micrasterias</i> sp.	biomasa	Tratamiento de agua residuales
Dinophyceae	<i>Cryptocodinium cohnii</i>	biomasa	Alimento animal
Diatomeas (existen alrededor de 100,000 especies conocidas)	<i>Odontella aurita</i>	Alta calidad	Fármacos, cosméticos, alimento para bebés
	<i>Skeletonema, Chaetoceros, Nitzschia, Thalassiosira</i> sp.	lípidos	Alimento animal, cosméticos, aditivos para alimentos

Fuente: HENNENBERG, et al. 2009

El metabolismo celular puede dirigirse hacia la biosíntesis de las sustancias que se buscan mediante la simulación de ciertas condiciones en los sistemas de cultivo, como son:

- La síntesis de sustancias mucilaginosas extracelulares para protegerse del estrés hidrodinámico.
- La acumulación intracelular de pequeñas moléculas con funciones osmorreguladoras en medios salinos.
- La síntesis de pigmentos fotoprotectores o bien accesorios de la fotosíntesis para cultivos con intensidades de iluminación altas o bajas, respectivamente.
- La acumulación de productos como lípidos o polisacáridos bajo condiciones de limitación en el uso de nitrógeno¹⁵.

La tabla 6 resume las aplicaciones de microalgas actualmente investigadas como biofijadores de dióxido de carbono por grupos a pequeña y gran escala.

Tabla 6 Uso comercial de microalgas fijadoras de dióxido de carbono

Grupo	Especie	Producto	Aplicación
Aplicación a larga escala			
Algas verdes	<i>Chlorella vulgaris</i>	biomasa	Alimento animal, biomasa, tratamiento de aguas
	<i>Dunaliella salina</i> , <i>D. tertiolecta</i>	Carotenoide, β -caroteno	Alimento animal, aditivos para alimentos
Haptophyta	<i>Isochrysis galbana</i>	Ácidos grasos	Alimento animal, biodiesel
Diatomeas y otras heterokontofitas	<i>Phaeodactylum tricornutum</i> , <i>Nitzschia</i> sp., <i>Nannochloropsis oculata</i>	Ácidos grasos, biomasa	Alimento animal, combustible
Pequeña escala y alta calidad de aplicación			
Algas verdes	<i>Botryococcus</i> sp.	Lípidos	Alimento animal, biodiesel
	<i>Tetraselmis suecica</i>	Ácidos grasos	Alimento animal
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	Ácidos grasos	C-fijación, producción de lisina, alimento animal
	<i>Monoraphidium</i> , <i>Nannochloris</i> , <i>Chlorococcum</i>	Biomasa, lípidos	C-fijación, combustible

Fuente: Autor, modificado de HENNENBERG, *et al.* 2009

¹⁵ Iden. Página 6

Las microalgas pueden llegar a ser una fuente renovable de bio-combustible produciendo, biodiesel, bioetanol, metanol e hidrogeno, además de servicios medio ambientales como tratamiento de aguas residuales. Los restos de biomasa pueden utilizarse para compost y fertilizantes (BENEMAN, 2003).

Las microalgas deben competir con la industria de síntesis química y petroquímica, así como con la agricultura para crear un interés en la economía e industria contemporánea. Algunos productos que representan ganancia son carotenoides, ácidos grasos poliinsaturados y polisacáridos, debido a su uso en el campo farmacéutico y alimenticio¹⁶.

¹⁶ Iden. Página 6

4. COSTOS DE LA PRODUCCIÓN

Calcular los costos de un sistema de cultivo de microalgas es complejo debido a que se deben tener en cuenta diferentes puntos del proceso. Según Rosch, en su artículo estima la producción de biomasa en 4.785 a 11.964 dólares por kilogramo, y el tipo de cosecha empleado influye en la variación del valor (ROSCH, 2009).

Por otro lado un análisis de viabilidad económica y de ingeniería realizado por una empresa privada manifiesta que trabajando con un tanque abierto sencillo, el sistema en general puede tener un costo de por lo menos \$100,000 dólares por hectárea. Además habría que sumar los costos de operación, la locación que debe tener un clima favorable, disponibilidad de agua (puede ser salina, salobre o agua residual), fuente de CO₂ y en una zona plana (BENEMAN, 2008).

Para hacer rentable su aplicación se deben obtener productos que representen un valor adicional como alimento para animales, fertilizantes, biocombustibles, es decir multipropósito (ROSCH, 2009).

CONCLUSIONES

Desde comienzos del siglo pasado se han estudiado las microalgas y su potencial productivo. Grupos de investigación de universidades y empresas privadas han trabajado en obtener una producción a escala industrial económicamente factible, para lo que sería necesario superar obstáculos biotécnicos, medio ambientales y de costos. Es necesario desarrollar un cultivo, cosecha y sistemas de extracción de nutrientes con una alta productividad.

La rentabilidad del cultivo de microalgas es posible aplicándolas como biofijadores de dióxido de carbono de gases de chimenea y en el tratamiento de aguas residuales, así como la producción de suplementos alimenticios para humanos y animales.

En Colombia no se han realizado investigaciones acerca de las microalgas como fijadoras de CO₂ presente en los gases de chimenea de equipos industriales, lo cual sería una alternativa ambiental a la contaminación generada.

Las condiciones climáticas del país lo hacen apto para su producción, lo cual hace posible estudiar las microalgas en el medio, determinando así la viabilidad del proceso. La aplicación del sistema de cultivo depende más de la capacidad de inversión, debido a que los fotobioreactores cuentan con tecnología más avanzada, controlada y por ende representa un mayor costo. Los tanques abiertos son más económicos, se pueden mantener al aire libre controlando algunos parámetros de importancia, pero son menos eficientes.

La aplicación de esta tecnología por las industrias nacionales les permitiría implementar proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), creando un bien ambiental viable, una asistencia financiera para la promoción del desarrollo

sostenible y beneficios adicionales según los protocolos de Kioto y Copenhague. Por otro lado se pueden obtener subproductos como fertilizantes, alimento para animales, bio-combustible, dependiendo del microorganismo empleado.

A través de la información encontrada se puede plantear un caso para llegar a conocer el costo promedio de la biofijación del dióxido de carbono en la industria. Según Korn se estima que una termoeléctrica a carbón emite cerca de 1 Kg de CO₂/kWh, y esta a su vez tiene una capacidad de 321,000 kW. Al llevar la cantidad de dióxido de carbono eliminado por hora a 1 año se obtiene un valor de 8700 Kg de CO₂/Kw/año. Lo anterior se multiplica por la capacidad de la termoeléctrica ya descrita, dando por resultado 2'792,700,000 Kg de CO₂ emitidos por año. El valor de la producción de biomasa según Rosch es de 4.785 a 11.964 dólares por Kg/año. Si se toma el mayor valor posible y se calcula en gramos de biomasa microalgal, se obtiene un dato de 0,011 dólares/gr.

A su vez McGINN propone que 1 gr de microalga puede secuestrar 1, 83 gr de CO₂ en condiciones generales, es decir, que este último puede asumir un valor de 0,011 dólares. Al relacionar el valor del gramo de CO₂ y los 2'792,700,000,000 gr de CO₂ al año emitidos por la termoeléctrica, expuesto anteriormente en Kg, se puede concluir que fijar esta cantidad de gramos tendría un costo aproximado de 18.160.180.327,8 dólares/año.

A medida que una nueva tecnología se da a conocer los costos van disminuyendo. Según información recopilada durante la revisión bibliográfica, su aplicación arroja altos valores de inversión y mantenimiento del sistema de cultivo, debido al desconocimiento e inexperiencia en el campo.

Según un estudio realizado por Krishnahadi Pribaldi en el 2009 en Indonesia, el desarrollo de este tipo de tecnología debe establecer un plan a mediano y largo

plazo, realizando una inversión paulatina y teniendo en cuenta el progreso de cada una de las etapas del proceso.

BIBLIOGRAFIA

- ATEHORTUA, Lucia. Plan Colombiano de I+D+I en biocombustible. En: Plan Biocom-Colciencias; 2008 Julio 10-11; Medellín. www.corpodib.com.co/memorias/2%20DR%20David%20Cala.pdf. [Consulta: 25 marzo de 2010].
- BEN-AMOTZ, Ami. Bio-fuel and CO₂ capture by algae. En: Third generation Biofuels; 2009 Feb 5; Paris. <http://newbusiness.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/2008/12/benamotz-nasa-nov-2008.pdf> . [Consulta: 22 marzo de 2010].
- BENEMAN, Jhon. Algae Biofuels-a brief introduction. [artículo de Internet]. www.adelaide.edu.au/biogas/renewable/biofuels_introduction.pdf [Consulta: 23 marzo de 2010].
- BENEMAN, Jhon, *et al.* Technology Roadmap for Biofixation of CO₂ and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae. [artículo en Internet]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs>. [Consulta: 16 febrero de 2010]
- CHAPARRO, Luis, *et al.* Emisiones al ambiente en Colombia. [artículo en Internet]. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/colnc1.pdf>. [Consulta: 12 enero de 2010].
- CUELLO, Joel y ONO, Eiichi. Selection of optimal microalgae species for CO₂ sequestration. [artículo de Internet]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbonseq/PDFs/158.pdf>. [Consulta: 29 mayo de 2010]
- FERNANDEZ, Edgardo; TAPIA, Claudia y VARGAS, Carmiña. Crecimiento de *Dunaliella salina* con polvillo de horno de cemento subproducto de la fabricación industrial del cemento. [artículo de Internet]. http://apolo.uniatlantico.edu.co:8091/uniatlantico/hermesoft/portal/home_1/rec/arc_715.pdf. [Consulta: 1 junio de 2010].

- GARIBAY, Adriana, *et al.* Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología* 2009; 13 (3): 38-61. http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Biodiesel.pdf. [Consulta: 20 mayo de 2009].
- HENNENBERG, Klaus, *et al.* Aquatic Biomass: Sustainable Bio-energy from algae? [artículo en Internet] http://www.bioenergywiki.net/International_Workshop_on_Sustainable_Bioenergy_from_Algae. [Consulta: 18 abril de 2010].
- KORN, Patricio. El boom de las algas para biocombustible. [artículo en Internet]. <http://www.ingenierosagronomos.cl/2009/sept/htm/boom.html>. [Consulta: 8 abril de 2010].
- LIZAMA, Miriam. Importancia del cultivo de microalgas en el conocimiento biológico de las floraciones nocivas para la salmonicultura. [artículo en Internet]. www.veterinaria.uchile.cl/.../Miriam%20Seguel%20%20Medio%20Ambiente.doc. [Consulta: 31 mayo de 2010].
- MANTECÓN, E., UNAMUNZAGA, C., CAÑAVATE, J. Diseño de un fotobiorreactor tubular para el cultivo masivo al exterior de la microalga marina *Nannochloropsis gaditana* en la bahía de Cádiz. [artículo en Internet]. http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/pesca/acuicultura/descargas/OtrosOrganismos/8_diseno_fotobiorreactor.pdf. [Consulta: 1 junio de 2010].
- McGINN, Patrick. Current perspectives on the comercial exploitation of algal biomass. En: *The Canadian Conference on Industrial Bioproduct Innovation*; 2008 Nov. 5-6; Montreal: <http://www.gowebpost.com/BIOP/En/Conference>. [Consulta: 8 diciembre de 2009].
- MOHEIMANI, Navid. The culture of Coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation [Tesis de Doctorado]. Australia: Murdoch University. 2005. 35-41p. <http://www.lib.murdoch.edu.au/adt/pubfiles/adt-MU20050901.140745/02Whole.pdf>. [Consulta: 22 marzo de 2009].

- PRIBALDI, Krishnahadi. Development of Scaleable Algae Production System for Biological CO₂ Sequestering and Production of Bio- Fuel. [artículo de Internet]. <http://www.iges.or.jp/en/bf/pdf/>. [Consulta: 11 enero de 2009].
- QUEVEDO, Catalina. Selección de un medio de cultivo para la producción de proteína microalgal a partir de *Scenedesmus sp* [Tesis de pregrado]. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería; 2006. 23 p.
- RAMÍREZ, Alberto y VIZCAÍNO, Gerardo. Limnología colombiana. 1 ed. Bogotá: BP Exploration Company; 1998.
- RAMÍREZ RESTREPO, Jhon Jairo. Fitoplancton de agua dulce: aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios. 1 ed. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia; 2000.
- RAMOS, Carlos, *et al.* Maximization of *Scenedesmus dimorphus* lipid yield for the production of biodiesel [Tesis de pregrado]. San Juan: Universidad Politécnica de Puerto Rico. Facultad de Ingeniería; 2010. <http://www.slideshare.net/kabronic/maximization-of-scenedesmus-dimorphus-lipid-yield-for-the-production-of-biodiesel>. [Consulta: 1 abril de 2010].
- ROSCH, Christine; SKARKA, Johannes y PATYK, Andreas. Microalgae- Opportunities and challenges of an innovative energy source. En: 17th European Biomass Conference and Exhibition; 2009 Jun 29-Jul 3; Alemania. <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2009/roua09b.pdf>. [Consulta: 16 febrero de 2010].
- SÁNCHEZ, Martha, *et al.* *Spirulina (Arthrospira)*: an edible microorganism. A review. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias; 2002. http://www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum/universitas_docs/vol_8n1/J_bernal.htm. [Consulta: 22 marzo de 2009].
- SERPA, Román y RODRÍGUEZ, Abelardo. Efecto del estrés por salinidad en cuatro cepas de *Dunaliella salina* teod. En el Perú. [artículo de Internet]. <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/341/34100217.pdf> [Consulta: 1 junio de 2010].
- VEMA, Narendra, *et al.* Prospective of biodiesel production utilizing microalgae as the cell factories: A comprehensive discussion. African Journal of

Biotechnology. 2010; 9 (10):1402-1411. <http://www.academicjournals.org/AJB>. [Consulta: 29 mayo de 2010].

- VERA, A, *et al.* *Chlorella* sp. cultivada en medios con el exudado gomoso de *Prosopis juliflora* D.C. [artículo en Internet]. <http://www.socbot.org.ve/congreso/memorias/PDF/BP-06.pdf>. [Consulta: 1 junio de 2010].

- **DIRECCIONES DE INTERNET CONSULTADAS Y CITADAS EN EL TEXTO**

- Item 1. La concentración de CO₂ en la atmósfera alcanza niveles récord. [artículo de internet]. <http://www.cambio-climatico.com/la-concentracion-de-co2-en-la-atmosfera-alcanza-niveles-record>. [Consulta: 20 febrero de 2010].
- Item 2. Composición nutritiva de las microalgas. [artículo en Internet]. <http://www.ual.es/~jlguil/Investigacion/Composicion.htm> [Consulta 5 de mayo 2010]
- Item 3. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Producción de biodiesel a partir de microalgas: Introducción a la Ingeniería Bioquímica. 2009; 1-20p. www.monografias.com/...microalgas/producción-biodiesel microalgas. [Consulta: 26 abril de 2010].
- Item 6. Mitigación de dióxido de carbono en algas. [artículo de internet]. <http://www.ficoespectro.com/category/soluciones/>. [Consulta: 18 mayo de 2010].
- Item 8. Microalgas una maravilla para biodiesel. [artículo en internet]. <http://biodiesel.com.ar/444/microalgas-una-maravilla-para-biodiesel>. [Consulta: 8 julio de 2010].
- Item 9. Crecimiento de *Scenedesmus* sp en diferentes medios de cultivo para la producción de proteína microalgal. [artículo en internet]. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?>. [Consulta: 8 julio de 2010].
- Item 10. Microalgas otra opción para producir biocombustible. [artículo en internet]. <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-429.htm>. [Consulta: 8 julio de 2010].

- Item 11. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. [artículo en internet]. <http://www2.ideam.gov.co/biblio/bol17/bol17a.htm>. [Consulta: 29 mayo de 2010].
- Item 12. Atlas de Radiación Solar de Colombia. [artículo en internet]. http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/0-Primera_Parte.pdf. [Consulta: 16 julio de 2010].
- Item 13. Energía Solar. [artículo en internet]. <http://www.ecotec2000.de/espanol/sun1.htm>. [Consulta: 16 julio de 2010].

ANEXOS

ANEXO A. MARCO CONCEPTUAL PRELIMINAR PARA EL EMPLEO DE LAS MICROALGAS EN LA FIJACIÓN DEL CO₂ PRESENTE EN LOS GASES DE CHIMENEA DE EQUIPOS INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN EN COLOMBIA*

Andrea Paola Díaz Ovalle**
Especialización en Química Ambiental

RESUMEN

El dióxido de carbono es uno de los Gases Efecto Invernadero (GEI) que se genera debido a las diferentes actividades realizadas por las industrias, incrementando su concentración en la atmósfera y contribuyendo al calentamiento global.

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que han sido objeto de estudio por sus aplicaciones productivas y comerciales en el campo alimenticio y farmacéutico. Teniendo en cuenta su capacidad para fijar el dióxido de carbono, investigadores han encontrado en ellos una alternativa para aprovechar el CO₂ de los gases de chimenea de equipos industriales proporcionando una tecnología ambiental para minimizar emisiones. Actualmente su empleo arroja altos valores de inversión y mantenimiento del sistema de cultivo, debido al desconocimiento e inexperiencia en el campo, por lo que se debe establecer un plan a mediano y largo plazo, teniendo en cuenta el progreso de cada una de las etapas del proceso.

Aunque el tema no ha sido profundizado en Colombia, las condiciones climáticas del país lo hacen apto para su producción y así determinar la viabilidad del proceso. Su aplicación traería beneficios económicos y ambientales a las industrias nacionales al efectuar proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), y a su vez se pueden obtener subproductos del cultivo de microalgas de gran valor.

Palabras clave: Dióxido de carbono, microalgas, gases de chimenea.

SUMMARY

The carbon dioxide is one of the Greenhouse Gases (GHG) that is generate due the differents activities of the industries, increasing the atmospheric concentration of CO₂ and contributing with the global warming.

The microalgae are photosynthetic microorganisms, they have been under study for its production and trade applications in the field of food and pharmaceutical. They have the capacity of fix the carbon dioxide and the investigators found in the microalgae an alternative to make use of CO₂ present in the flue gases of industrial equipment, providing an environmental technology for minimize emissions. Currently its use gives high levels of investment and maintenance of the culture, due to ignorance and inexperience in the field. There must be a plan for medium and long term, keeping in mind the progress in each of the stages of process.

Although the subject is recent in Colombia, the climatic conditions make it suitable for production and determine the feasibility of the process. Its application would bring economic and environmental benefits to national industries when they carry out projects of Clean Development Mechanism (CDM), and can be obtained microalgal culture products of high value.

Key words: Carbon dioxide, microalgae, flue gases

*: Artículo para optar al título de Especialista en Química Ambiental en la Universidad Industrial de Santander.

**.: anpadiov@yahoo.com

1 INTRODUCCIÓN

Según mediciones realizadas en el año 2000, la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera ha alcanzado una cifra de 387 ppm, esto significa un crecimiento de casi el 40% desde la revolución industrial [1].

Grupos de investigación en busca de alternativas medio ambientales han planteado la posibilidad de determinar el potencial de los sistemas de cultivo de microalgas para mitigar o disminuir las emisiones de CO₂ (MOHEIMANI, 2005).

Su aplicación implica una inversión de tipo económico e intelectual, debido a que es un tema del que se conoce poco en el campo. El bio-combustible, fertilizantes y alimento animal son algunos de los subproductos que se pueden obtener del cultivo de las microalgas.

1.1 GENERALIDADES DE LAS MICROALGAS

Son un conjunto de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes y eucariontes, que se localizan en hábitats diversos como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes. Se han identificado alrededor de 40,000 especies aunque se estima que son 100,000, de las que se desconoce su composición bioquímica y metabolismo (GARIBAY, *et al.* 2009).

Las microalgas desempeñan un papel muy importante ya que son los principales productores primarios de materia orgánica a través de la fotosíntesis. Contribuye con el 50% de la actividad fotosintética del planeta y forman la base de la cadena alimenticia para más del 70% de la biomasa del mundo (QUEVEDO, 2006).

Las divisiones microalgales más representativas son: Cyanophyta, Euglenophyta, Cryptophyta, Chrysophyta, Pyrrophyta y Chlorophyta.

Cerca del 90% de su peso seco está constituido por proteínas, lípidos y carbohidratos además de presentar ácidos nucleicos, vitaminas hidrófilas y liposolubles, pigmentos y minerales.

1.2 PARAMETROS DE CULTIVO

Las microalgas para su crecimiento y desarrollo deben contar con condiciones óptimas. La luz representa la fuente de energía para realizar la fotosíntesis y así

synthetizar los nutrientes necesarios, sólo es útil el rango del espectro lumínico comprendido entre los 400 y 700 nm de longitud de onda (GARIBAY, *et al.* 2009). Su temperatura de crecimiento es de 15 a 40°C, teniendo en cuenta cada especie, debido a que su respuesta a variaciones en la temperatura puede afectar sus requerimientos nutricionales, metabolismo y composición celular (MOHEIMANI, 2005). Por la carencia o abundancia de las sales necesarias para su desarrollo, se puede llegar a inhibir el crecimiento de las microalgas (MOHEIMANI, 2005).

El pH es uno de los factores más importantes en el cultivo. Cada microalga tiene un pH óptimo para su cultivo (entre 7,0 y 8,0). Este se ve afectado por la cantidad de dióxido de carbono disuelto, temperatura que a su vez controla la solubilidad del CO₂, la actividad metabólica de las microalgas y la fuente de nitrógeno suministrada para el crecimiento (QUEVEDO, 2006). Los nutrientes requeridos se clasifican como macronutrientes, los cuales incluyen el carbono, nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, azufre y potasio. Por otro lado se encuentran los micronutrientes o elementos traza como el cobre, hierro y zinc. Los requerimientos nutricionales varían según el tipo de microalga (QUEVEDO, 2006).

Una concentración alta de oxígeno producido por la fotosíntesis es un importante factor inhibitorio de crecimiento que se debe tener en cuenta en el cultivo de las microalgas. La supersaturación del oxígeno puede llevar a la inhibición de la fotorespiración y la muerte de la microalga por foto-oxidación (MOHEIMANI, 2005). Las fuentes de agua para el cultivo pueden ser salinas (mar), dulces (ríos, lagos u otros) y aguas residuales del sector agropecuario.

La inyección de CO₂ en el cultivo previene la sedimentación de las microalgas y asegura que todas las células reciban la misma exposición a la luz y los nutrientes. El crecimiento de las microalgas puede inhibirse según la concentración de dióxido de carbono presente en el medio de cultivo. Esto depende del tipo de especie que se emplee. (RAMOS, *et al.* 2010).

1.3 SISTEMAS DE CULTIVO

Los sistemas de cultivo de biomasa microalgal a gran escala pueden ser abiertos

como los estanques o cerrados como los fotobioreactores.

1.3.1 Sistemas de cultivo abiertos

A nivel industrial la producción es hecha en tanques abiertos, con la operación en régimen continuo y semicontinuo y control de los parámetros más importantes (HENNENBERG, *et al.* 2009). El sistema se puede realizar al aire libre, el cual consiste en piscinas descubiertas a las cuales se les suministran nutrientes para que las microalgas puedan reproducirse a un ritmo acelerado. Es el sistema menos eficiente aunque el más económico. Por otro lado puede realizarse bajo condiciones de invernadero, las ventajas de este sistema son un mejor control de la temperatura y una pérdida muy reducida de agua. Los materiales para la construcción del estanque dependen del tipo que se desea usar. En el caso de uno tipo pista requiere concreto, fibra de vidrio o materiales que garanticen la sostenibilidad en el tiempo y buena iluminación. También el plástico es una opción por su bajo costo. Las dimensiones típicas son de 30 cm de profundidad y entre 100 a 250 hectáreas [2].

Los tanques más usados son:

-**Tanque circular:** presenta un brazo de rotación, el cual puede ser operado en aguas de una profundidad de 10-20 cm con un sistema de mezclado para así prevenir sedimentación de células. (VEMA, *et al.* 2010).

- **Tanque circular con agitación:** de 45 m de diámetro y 30 a 70 cm de profundidad, en algunos casos son cubiertos con fibra de vidrio. Su diseño es menor a 10 hectáreas debido a la incapacidad del brazo de mezclar todo el cultivo uniformemente.

- **Tanques tipo pista solo o en grupo:** son poco profundos, entre 15 a 25 cm de profundidad y cubre cerca de 0,5 a 0,6 hectáreas. Hay sistemas para el mezclado como aspas y bombas de aire, lo que le proporciona una mayor productividad. Pueden estar forrados con plástico o cemento. (MOHEIMANI, 2005).

1.3.2 Sistemas de cultivo cerrados

Son sistemas de cultivo cerrados, donde los conductos transparentes son aislados de exterior. Los parámetros como nutrientes, luz, intercambio de gases entre otros están controlados técnicamente. Los costos

económicos y energéticos adicionales son altos, pero la contaminación es baja. Pueden ir situados dentro de invernaderos de plástico o de cristal, para disponer de una temperatura ambiente más elevada.

Hay diferentes tipos de fotobioreactores y se encuentran:

-**Tubos plásticos o de vidrio de forma triangular:** Se hacen fluir los gases de CO₂ y O₂ desde la parte baja de la hipotenusa y las microalgas con medio de cultivo fluyen en sentido opuesto.

-**Tubulares en forma horizontal:** son tubos hechos de acrílico, vidrio, plástico o teflón con aprox. 3-6 cm de diámetro y de 10-100 m de longitud. El cultivo pasa a través de estos tubos por medio de bombas. Los tubos pueden estar organizados vertical, horizontal o cónico helicoidal. La temperatura se controla con enfriamiento evaporativo o intercambio de calor.

-**Columna vertical de burbujas:** Se genera circulación del medio con microalgas en una columna vertical a través del flujo de gases como dióxido de carbono. Se ilumina a través de tubos de luz y su objetivo es disminuir el costo del cultivo a gran escala y hacerlo más simple.

-**Flat Panel Reactors (Reactores de paneles planos):** Consiste en una caja rectangular transparente con 1 a 5 cm de profundidad. Una capa fina de suspensión de células circula por una placa, lo cual permite que la luz pueda ser absorbida.

1.3.3 Mantenimiento de los sistemas de cultivo

Los biofilms que se forman en las paredes reduce la penetración de la luz. Este inconveniente se puede manejar manteniendo un alto flujo de turbulencia con bombas de aire y lavando con peróxido de hidrógeno para remover partículas pequeñas. La remoción del agua se debe realizar para evitar el estancamiento de la misma y así evitar adherencia de microalgas a las paredes de los estanques, dificultando la cosecha de estas, y aumentar el intercambio del agua con el oxígeno [2].

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 BIOFIJACIÓN DEL DIOXIDO DE CARBONO DE LOS GASES DE CHIMENEA

En diferentes grupos de investigación se ha estudiado la eficiencia de fijación de CO₂ por las microalgas por medio de la fotosíntesis. A escala de laboratorio Cheng *et al.* en 2006

encontró una eficiencia de 6,24 g CO₂/l/día, si se mantiene esta tasa en un bioreactor a gran escala, la captura sería de 26 Kg/h de dióxido de carbono en un reactor de 100.000l o 114 T/año asumiendo días lumínicos de 12 h. Kajiwara et al en 1997 encontró que la cepa *Synechococcus* alcanzó una tasa máxima de absorción de CO₂ de 0,025 g/l/h o 0,6 g/l/día en una concentración de masa celular de 0,286 g / l. Si se aplica una ampliación a escala, equivaldría a un biorreactor de tamaño de 4000 m³ con una tasa de fijación promedio de 1 tonelada de CO₂/h de las fuentes de emisión.

Hirata et al en 1996 utilizó la cepa *Chlorella* sp. UK001. La tasa media de fijación de CO₂ fue de 0,0318 g CO₂/l/día. La eficiencia de conversión de energía a biomasa se estimó en 4,3%.

Murakami et al en 1997 utilizaron la cepa *Synechocystis* en un biorreactor de 5 litros con condiciones optimizadas, alcanzaron una velocidad máxima de fijación de CO₂ de 1,5 g CO₂/l/día. La cepa *Botryococcus braunii*, alcanzó una tasa de crecimiento de alrededor de 0,5 g / l / día. La biomasa de esta microalga en particular contenía más del 15% de su peso seco como hidrocarburos, y su tasa de fijación de CO₂ superó a 1 g / l / día [3].

Dentro de los estudios realizados se plantea la posibilidad de acoplar a las chimeneas de emisión de CO₂ de las fábricas a un cultivo de las microalgas aprovechando dicho gas como fuente de carbono para su crecimiento y desarrollo, en lugar de ser emitido a la atmósfera, donde colabora con el efecto invernadero (BENEMAN, 2003).

Cerca del 90% ó más del CO₂ inyectado en los estanques puede ser utilizado eficientemente por las microalgas [2]. Identificar las concentraciones de dióxido de carbono a las que las microalgas son tolerantes es importante, teniendo en cuenta que se tiene como fuente las emisiones de chimenea y asumiendo que presenta una concentración de CO₂ entre 15-20% v/v aproximadamente. Muchas especies han sido evaluadas en concentraciones por encima del 15%. Kodama et al en 1994, encontró que *Chlorococcum littorale* puede crecer a 60% de CO₂ usando técnicas de adaptación. Nakano et al en 1996, estudiaron a *Euglena gracilis*, la cual puede crecer entre 5-45% en presencia del gas, aunque su crecimiento es el mejor al 5%.

Hirata y Hanagata en sus respectivos grupos de investigación manifestaron que *Chlorella* sp puede desarrollarse con éxito bajo un 10% de dióxido de carbono y aún con un 40%.

Scenedesmus sp crece a un 80%, pero su máxima masa celular se observó entre 10-20% según Haganata et al en 1992. *Cyanidium caldarium* y otras especies puede crecer en CO₂ puro según estudios de Graham y Wilcox en 2000.

En algunas investigaciones se han encontrado microalgas tolerantes a ciertas concentraciones de gases ácidos como NO_x y SO₂, el caso de *Nannochloris* sp, *Dunaliella tertiolecta*, *Tetraselmis* sp y *Chlorella* teniendo en cuenta las condiciones de crecimiento. Las microalgas pueden asimilar concentraciones de CO₂ entre 0.04-100% v/v, seleccionando la especie adecuada y un rango de temperatura de 25 a 100 ° C utilizando tecnología apropiada (CUELLO y ONO, 2005).

Seambiotic es la primera empresa en el mundo que ha desarrollado el cultivo y procesamiento de las microalgas marinas usando gases de combustión de Plantas Eléctricas. Se encuentra ubicada en Israel y plantea un sistema que consiste en conductos de desulfurización llamados FGD (Conductos de Gas para Desulfurización), la cual es una tecnología encargada de retirar el dióxido de sulfuro de las emisiones de las chimeneas, para evitar alguna inhibición por estos gases y poder ser asimilado el CO₂ por las microalgas. A partir de ello la planta produce yeso como subproducto y es reciclado como tablas de yeso o cemento. El SO₂ (óxido de azufre) es un gas ácido que puede ser removido con un material absorbente o de tipo alcalino (BEN-AMOTZ, 2009).

2.2 CULTIVO DE LAS MICROALGAS

El inóculo de microalgas requerido para producción es pequeño, teniendo en cuenta el tamaño de los estanques o fotobioreactores. Es cerca del 1-2% de la biomasa total (BENEMAN, 2008).

Universidades y empresas dedicadas a su estudio han identificado el potencial de diferentes microalgas basándose en los subproductos que generan y sus condiciones de crecimiento. Dentro de la revisión bibliográfica realizada se elaboró una lista de las más importantes hasta el momento basándose en los estudios reportados. A

continuación la tabla 1 indica las microalgas más destacadas.

Tabla 1. Biofijación de dióxido de carbono por microalgas según investigadores

Fuente: Autor

Microalga	Fuente
<i>Botryococcus braunii</i>	HENNEBERG, 2009 PRIBALDI, 2009 ATEHORTUA, 2008
<i>Chlorella sp</i>	
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	
<i>Cylindrotheca sp</i>	
<i>Dunaliella primolecta</i>	
<i>Euglena gracilis</i>	
<i>Isochrysis sp</i>	
<i>Monallanthus salina</i>	
<i>Nannochloris sp</i>	
<i>Nannochloropsis sp</i>	
<i>Neochloris oleoabundans</i>	
<i>Nitzschia sp</i>	
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	
<i>Schizochytrium sp</i>	
<i>Spirulina sp</i>	
<i>Tetraselmis sueica</i>	
<i>Scenedesmus sP</i>	QUEVEDO, 2006

La producción de microalgas y la obtención de sus productos es uno de los campos menos explorados en Colombia, falta investigar las cepas silvestres y determinar su posible aplicación a nivel industrial. La Universidad de Antioquia a través de un grupo de investigadores del Instituto de Microbiología ha desarrollado estudios para la aplicación de las microalgas en la producción de biocombustible y así llegar a establecer un prototipo de cultivo [4]. En el Grupo de Bioprocesos del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad ya mencionada, se realizó pruebas con la microalga *Scenedesmus sp*, debido a que posee niveles de lisina superiores al patrón de la FAO, proporcionando una aplicación potencial en la industria de alimentos balanceados para animales [5]. Por otro lado, un estudio científico de la Universidad Nacional desde hace dos años se concentro en hallar microalgas colombianas capaces de producir biocombustible, investigando los géneros *Chlorella* y *Botryococcus* para agua dulce, y *Nannochloropsis* e *Isochrysis* para agua salada. En el país las pocas investigaciones realizadas no han tenido gran alcance, falta inversión y apoyo por parte del Estado, impidiendo la elaboración de

estudios más profundos sobre estos microorganismos para obtener mayores beneficios [6]. El clima en el país es tropical, manteniendo una temperatura uniforme la mayor parte del año. Está determinado por aspectos geográficos y atmosféricos que desarrollan un amplio mosaico de climas que van desde 30°C (nivel del mar) hasta temperaturas bajo 0°C (alta montaña en nieves perpetuas) [7]. El potencial energético solar en todo el territorio tiene un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m², en la península de La Guajira tiene un valor de 6,0 kWh/m² [8]. La intensidad media de radiación medida fuera de la atmósfera en un plano normal es aproximadamente de 2.26 kW/m² [9].

2.3 COSECHA DEL SISTEMA DE CULTIVO

En la producción de microalgas se conocen diferentes técnicas para la cosecha como son:

-Filtración: Separa el cultivo en una fase líquida y en una sólida, la cual contiene los microorganismos o biomasa.

-Centrifugación: Se basa en la diferencia de densidad entre las microalgas y el medio líquido, extrae el 80-90% con un aceleración de 500 a 1000 rpm. Se aplica a cultivos pequeños debido a su alto costo energético, por lo que a gran escala resulta muy costoso.

-Biofloculación: Es un proceso espontaneo de floculación- sedimentación de las células en el cual se conoce poco las causas de este fenómeno. Otra técnica es interrumpir el flujo de CO₂ ocasionando auto-floculación. (BENEMAN, 2008).

-Floculación química: Se usa aluminio, cloruro férrico y Chitosin, el cual es un producto comercial. Su aplicación es costosa, teniendo en cuenta que la cosecha se realiza en sistemas a amplia escala (ROSCH, 2009). Los técnica para realizar la cosecha del cultivo se pueden combinar entre si, como filtración seguida de sedimentación o la centrifugación y posterior floculación química (ROSCH, 2009).

El 20 a 40% del volumen del tanque puede ser cosechado diariamente, teniendo en cuenta la época del año y otros factores. En el momento no se ha encontrado una tecnología para la cosecha a bajo costo y práctica, debido a que las características de los métodos anteriormente expuestos dificultan su aplicación industrial (BENEMAN, 2008).

2.4 APLICACIONES DE LAS MICROALGAS

Las aplicaciones productivas y comerciales de las microalgas son numerosas, van desde la producción de suplementos alimenticios y nutricionales de consumo humano y animal hasta la obtención de productos activos para la industria farmacéutica y cosmética.

Las microalgas pueden llegar a ser una fuente renovable de bio-combustible produciendo, biodiesel, bioetanol, metanol e hidrogeno, además de servicios medio ambientales como tratamiento de aguas residuales. Los restos de biomasa pueden utilizarse para compost y fertilizantes (BENEMAN, 2003).

Las microalgas deben competir con la industria de síntesis química y petroquímica, así como con la agricultura para crear un interés en la economía e industria contemporánea. Algunos productos que representan ganancia son carotenoides, ácidos grasos poliinsaturados y polisacáridos, debido a su uso en el campo farmacéutico y alimenticio [10].

2.5. COSTOS DE LA PRODUCCIÓN

Calcular los costos de un sistema de cultivo de microalgas es complejo debido a que se deben tener en cuenta diferentes puntos del proceso. Según Rosch, en su artículo estima la producción de biomasa en 4.785 a 11.964 dólares por kilogramo, y el tipo de cosecha empleado influye en la variación del valor (ROSCH, 2009).

Por otro lado un análisis de viabilidad económica y de ingeniería realizado por una empresa privada manifiesta que trabajando con un tanque abierto sencillo, el sistema en general puede tener un costo de por lo menos \$100,000 dólares por hectárea. Además habría que sumar los costos de operación, la locación que debe tener un clima favorable, disponibilidad de agua (puede ser salina, salobre o agua residual), fuente de CO₂ y en una zona plana (BENEMAN, 2008).

Para hacer rentable su aplicación se deben obtener productos que representen un valor adicional como alimentos para animal, fertilizantes, biocombustibles, es decir multipropósito (ROSCH, 2009).

3. CONCLUSIÓN

Desde comienzos del siglo pasado se han estudiado las microalgas y su potencial productivo. Grupos de investigación de

universidades y empresas privadas han trabajado en obtener una producción a escala industrial económicamente factible, para lo que sería necesario superar obstáculos biotécnicos, medio ambientales y de costos. Es necesario desarrollar un cultivo, cosecha y sistemas de extracción de nutrientes con una alta productividad.

La rentabilidad del cultivo de microalgas es posible aplicándolas como biofijadores de dióxido de carbono de gases de chimenea y en el tratamiento de aguas residuales, así como la producción de suplementos alimenticios para humanos y animales.

En Colombia no se han realizado investigaciones acerca de las microalgas como fijadoras de CO₂ presente en los gases de chimenea de equipos industriales, lo cual sería una alternativa ambiental a la contaminación generada.

Las condiciones climáticas del país lo hacen apto para su producción, lo cual hace posible estudiar las microalgas en el medio, determinando así la viabilidad del proceso. La aplicación del sistema de cultivo depende más de la capacidad de inversión, debido a que los fotobioreactores cuentan con tecnología más avanzada, controlada y por ende representa un mayor costo. Los tanques abiertos son más económicos, se pueden mantener al aire libre controlando algunos parámetros de importancia, pero son menos eficientes.

La aplicación de esta tecnología por las industrias nacionales les permitiría implementar proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), creando un bien ambiental viable, una asistencia financiera para la promoción del desarrollo sostenible y beneficios adicionales según los protocolos de Kioto y Copenhague. Por otro lado se pueden obtener subproductos como fertilizantes, alimento para animales, bio-combustible, dependiendo del microorganismo empleado.

A medida que una nueva tecnología se da a conocer los costos van disminuyendo. Según información recopilada durante la revisión bibliográfica, su aplicación arroja altos valores de inversión y mantenimiento del sistema de cultivo, debido al desconocimiento e inexperiencia en el campo.

Según un estudio realizado por Krishnahadi Pribaldi en el 2009 en Indonesia, el desarrollo de este tipo de tecnología debe establecer un

plan a mediano y largo plazo, realizando una inversión paulatina y teniendo en cuenta el progreso de cada una de las etapas del proceso.

4. BIBLIOGRAFÍA

- BEN-AMOTZ, Ami. Bio-fuel and CO₂ capture by algae. En: Third generation Biofuels; 2009 Feb 5; Paris. <http://newbusiness.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/2008/12/benamotz-nasa-nov-2008.pdf> . [Consulta: 22 marzo de 2010].

- BENEMAN, Jhon. Algae Biofuels-a brief introduction. [artículo de Internet]. www.adelaide.edu.au/biogas/renewable/biofuels_introduction.pdf [Consulta: 23 marzo de 2010].

- BENEMAN, Jhon, *et al.* Technology Roadmap for Biofixation of CO₂ and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae. [artículo en Internet]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs>. [Consulta: 16 febrero de 2010].

- CUELLO, Joel y ONO, Eiichi. Selection of optimal microalgae species for CO₂ sequestration. [artículo de Internet]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbonseq/PDFs/158.pdf>. [Consulta: 29 mayo de 2010]

-GARIBAY, Adriana, *et al.* Biodiesel a partir de microalgas. BioTecnología 2009; 13 (3): 38-61. http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Biodiesel.pdf. [Consulta: 20 mayo de 2009].

-HENNENBERG, Klaus, *et al.* Aquatic Biomass: Sustainable Bio-energy from algae? [artículo en Internet] http://www.bioenergywiki.net/International_Workshop_on_Sustainable_Bioenergy_from_Algae. [Consulta: 18 abril de 2010].

-KORN, Patricio. El boom de las algas para biocombustible. [artículo en Internet]. <http://www.ingenierosagronomos.cl/2009/sept/htm/boom.html>. [Consulta: 8 abril de 2010].

-MOHEIMANI, Navid. The culture of Coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation [Tesis de Doctorado]. Australia: Murdoch University. 2005. 35-41p. <http://wwwlib.murdoch.edu.au/adt/pubfiles/adt-MU20050901.140745/02Whole.pdf>. [Consulta: 22 marzo de 2009].

-QUEVEDO, Catalina. Selección de un medio de cultivo para la producción de proteína microalgal a partir de *Scenedesmus* sp [Tesis

de pregrado]. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería; 2006. 23 p.

-RAMOS, Carlos, *et al.* Maximization of *Scenedesmus dimorphus* lipid yield for the production of biodiesel [Tesis de pregrado]. San Juan: Universidad Politécnica de Puerto Rico. Facultad de Ingeniería; 2010. <http://www.slideshare.net/kabronic/maximization-of-scenedesmus-dimorphus-lipid-yield-for-the-production-of-biodiesel>. [Consulta: 1 abril de 2010].

-ROSCH, Christine; SKARKA, Johannes y PATYK, Andreas. Microalgae-Opportunities and challenges of an innovative energy source. En: 17th European Biomass Conference and Exhibition; 2009 Jun 29-Jul 3; Alemania. <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2009/roua09b.pdf> f. [Consulta: 16 febrero de 2010].

-VEMA, Narendra, *et al.* Prospective of biodiesel production utilizing microalgae as the cell factories: A comprehensive discussion. African Journal of Biotechnology. 2010; 9 (10):1402-1411. <http://www.academicjournals.org/AJB>. [Consulta: 29 mayo de 2010].

- Direcciones de internet citadas en el texto:
 - [1]. La concentración de CO₂ en la atmósfera alcanza niveles récord. [artículo de internet]. [http://www.cambio-climatico.com/la-concentracion-de-CO₂-en-la-atmosfera-alcanza-niveles-record](http://www.cambio-climatico.com/la-concentracion-de-CO2-en-la-atmosfera-alcanza-niveles-record). [Consulta: 20 febrero de 2010].
 - [2]. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Producción de biodiesel a partir de microalgas: Introducción a la Ingeniería Bioquímica. 2009; 1-20p. www.monografias.com/...microalgas/produccion-biodiesel-microalgas. [Consulta: 26 abril de 2010].
 - [3]. Mitigación de dióxido de carbono en algas. [artículo de internet]. <http://www.ficoespectro.com/category/soluciones/>. [Consulta: 18 mayo de 2010].
 - [4]. Microalgas una maravilla para biodiesel. [artículo en internet]. <http://biodiesel.com.ar/444/microalgas-una-maravilla-para-biodiesel>. [Consulta: 8 julio de 2010].
 - [5]. Crecimiento de *Scenedesmus* sp en diferentes medios de cultivo para la producción de proteína microalgal. [artículo en internet]. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?>. [Consulta: 8 julio de 2010].

- [6]. Microalgas otra opción para producir biocombustible. [artículo en internet]. <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-429.htm>. [Consulta: 8 julio de 2010].
- [7]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. [artículo en internet]. <http://www2.ideam.gov.co/biblio/bol17/bol17a.htm>. [Consulta: 29 mayo de 2010].
- [8]. Atlas de Radiación Solar de Colombia. [artículo en internet]. http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/0-Primera_Parte.pdf. [Consulta: 16 julio de 2010].
- [9]. Energía Solar. [artículo en internet]. <http://www.ecotec2000.de/espanol/sun1.htm>. [Consulta: 16 julio de 2010].
- [10]. Composición nutritiva de las microalgas. [artículo en Internet]. <http://www.ual.es/~jlguil/Investigacion/Composicion.htm> [Consulta 5 de mayo 2010].

