



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CAPACIDAD DE ASIMILACIÓN DE CARBONO EN
TRES ESPECIES DE “ALGAS” QUE CRECEN EN LA
CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

P R E S E N T A:

JESÚS HUITZILÍHUITL TORRES HERNÁNDEZ



**TUTORA: DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA
COTUTORA: DRA. HILDA PATRICIA LEÓN TEJERA**

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1.- Datos del alumno

Apellido paterno
Apellido materno
Nombre(s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Número de cuenta

1.- Datos del alumno

Torres
Hernández
Jesús Huitzilíhuitl
(55) 5351 8291 ext. 220
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
302652879

2.- Datos del tutor

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

2.- Datos del tutor

Dra.
Margarita
Collazo
Ortega

3.- Datos del sinodal 1

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

3.- Datos del sinodal 1

Dr.
Eberto
Novelo
Maldonado

4.- Datos del sinodal 2

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

4.- Datos del sinodal 2

Dra.
Ana Laura
López
Escamilla

5.- Datos del sinodal 3

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

5.- Datos del sinodal 3

Dra.
Hilda Patricia
León
Tejera

6.- Datos del sinodal 4

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

6.- Datos del sinodal 4

Dr.
Javier
Carmona
Jiménez

7.- Datos del trabajo escrito

Título

7.- Datos del trabajo escrito

Capacidad de asimilación de carbono en tres especies de "algas" que crecen en la ciudad de México

Número de páginas

71

Año

2011

AGRADECIMIENTOS

La tesis que a continuación se expone es resultado del apoyo incondicional de las tutoras, Margarita Collazo Ortega e Hilda Patricia León Tejera. Esta obra no hubiera sido posible sin la ayuda de las siguientes instancias de la Facultad de Ciencias de la UNAM: Laboratorio de Desarrollo en Plantas, Laboratorio de Ficología y Cámaras de Ambientes Controlados.

Este trabajo se realizó en el Taller Biología del Desarrollo y Función de las Estructuras Reproductoras de Cactáceas, bajo la guía y supervisión de las maestras Judith Márquez Guzmán, Margarita Collazo Ortega, Sonia Vázquez Santana, Ana Laura López Escamilla, Laura Patricia Olguín Santos y Karina Jiménez Durán; y en la Sección de Ficología del Herbario de la Facultad de Ciencias.

Se agradece el apoyo de la Bióloga Laura Patricia Olguín Santos, por el mantenimiento en las Cámaras de Ambientes Controlados de los cultivos, y por su amable y profesional servicio.

También se agradece infinitamente las observaciones de los miembros del Jurado: Dr. Eberto Novelo Maldonado, Dr. Javier Carmona Jiménez y Dra. Ana Laura López Escamilla.

Se dedica este trabajo a todas aquellas personas que fomentaron en el autor una enorme pasión y dedicación por el trabajo y que le inculcaron un fuerte compromiso con la sociedad.

CONTENIDO

Hoja de Datos del Jurado	1
Agradecimientos	2
Contenido	3
Resumen	5
Planteamiento del problema	5
Antecedentes.....	5
Métodos para capturar carbono atmosférico	11
Algas como organismos para capturar carbono y generar biocombustibles ...	13
Cianobacterias y algas.....	15
Cianobacterias	15
Algas	17
Algas y cianobacterias subaéreas	18
Fotosíntesis	19
Justificación	21
Objetivo.....	22
Hipótesis	22
Zona de recolección.....	22
Método	23
Obtención del material biológico	23
Fotografías de los lugares de recolección	28
Identificación	29
Cultivos	30
Inoculación.....	31
Condiciones de cultivo	31
Resiembra	31
Aislamiento	31
Organismos aislados.....	32
Determinación de la asimilación de CO ₂ y biomasa.....	33
Asimilación de CO ₂	33
Medición de la biomasa (peso seco)	34
a) Fotótrofos cultivados en medio sólido.....	35
b) Fotótrofos cultivados en medio líquido.....	35
Análisis estadístico	35
Resultados.....	35
Organismos encontrados	35
Cianobacterias.....	36
Algas eucariontes	38
Organismos seleccionados para el estudio.....	40
Crecimiento en los medios de cultivo	41
Captura de CO ₂	42
Biomasa	43
Discusión	44

Conclusiones	48
Perspectivas	50
Propuesta de proyecto para capturar carbono con algas subaéreas	50
Captura de carbono en las ciudades	50
Cultivo de fotótrofos subaéreos microscópicos.....	51
Referencias.....	52
Apéndice I.....	64
Eficiencia de diferentes organismos para la producción de biodiesel	64
Apéndice II	65
Clima de la cuenca de México y de la zona de estudio.....	65
Subtipos climáticos de la cuenca de México de acuerdo a García (1968)...	66
Símbolos para los subtipos climáticos de la cuenca de México (García, 1968).....	66
Localización de los subtipos climáticos de la cuenca de México	68
Apéndice III.....	69
Formulaciones	69
Grenetina glicerizada sin fenol (comunicación personal Hilda León)	69
Formulación de los medios de cultivo	69
Medio BBM (Modificado de Bold)	69
Medio BG11 (para algas verde-azules de Allen)	70

RESUMEN

Se estudió la viabilidad de utilizar fotótrofos microscópicos con crecimiento subaéreo para contrarrestar las emisiones de CO₂ en la ciudad de México. Para esta investigación se recolectaron especies de algas y cianobacterias en distintos puntos de la ciudad de México. Los organismos se cultivaron y aislaron para su identificación; se trabajó con *Klebsormidium* sp., *Chlorococcum* sp. y *Pseudanabaena* sp. Para determinar su capacidad de captura de carbono a 364 y 400 ppm (partes por millón). *Klebsormidium* sp. resultó ser el organismo que más carbono absorbió, y, además, el de mayor producción de biomasa, por lo que se considera que de los tres estudiados, es el más adecuado para utilizarlo en la disminución del CO₂ atmosférico. Como resultado del trabajo se propone diseñar un proyecto que permita capturar CO₂ atmosférico en las ciudades a través de algas subaéreas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe un aumento en la concentración de CO₂ atmosférico atribuible a las actividades del hombre. Es necesario encontrar nuevos métodos para capturar el exceso de carbono emitido a la atmósfera. En las diversas edificaciones de las ciudades existe un área superficial muy amplia que podría utilizarse para cultivar fotótrofos, los cuales ayudarían a capturar parte del exceso de carbono mencionado. Por lo anterior, en este trabajo se estudió la capacidad de captura de carbono en una especie de cianobacteria y en dos especies de algas, y se plantea el uso de estos organismos para complementar la captura de CO₂ atmosférico en las ciudades.

ANTECEDENTES

La quema de carbón, petróleo y gas ha aumentado la concentración de CO₂ en la atmósfera a niveles más altos de lo que había habido de manera natural en los últimos millones de años (Schrag, 2007; Figura 1), lo cual ha provocado un

cambio climático (Karl y Trenberth, 2003) abrupto e inmenso (Alley *et al.*, 2003), trayendo como consecuencia graves trastornos en la civilización y en los ecosistemas, tal como ha sucedido por cambios en el clima en épocas pasadas (Scholze, 2003; Jenkins, 2003). El carbón y el petróleo utilizados como combustibles han aportado la mayor cantidad de carbono a la atmósfera históricamente (Figura 2).

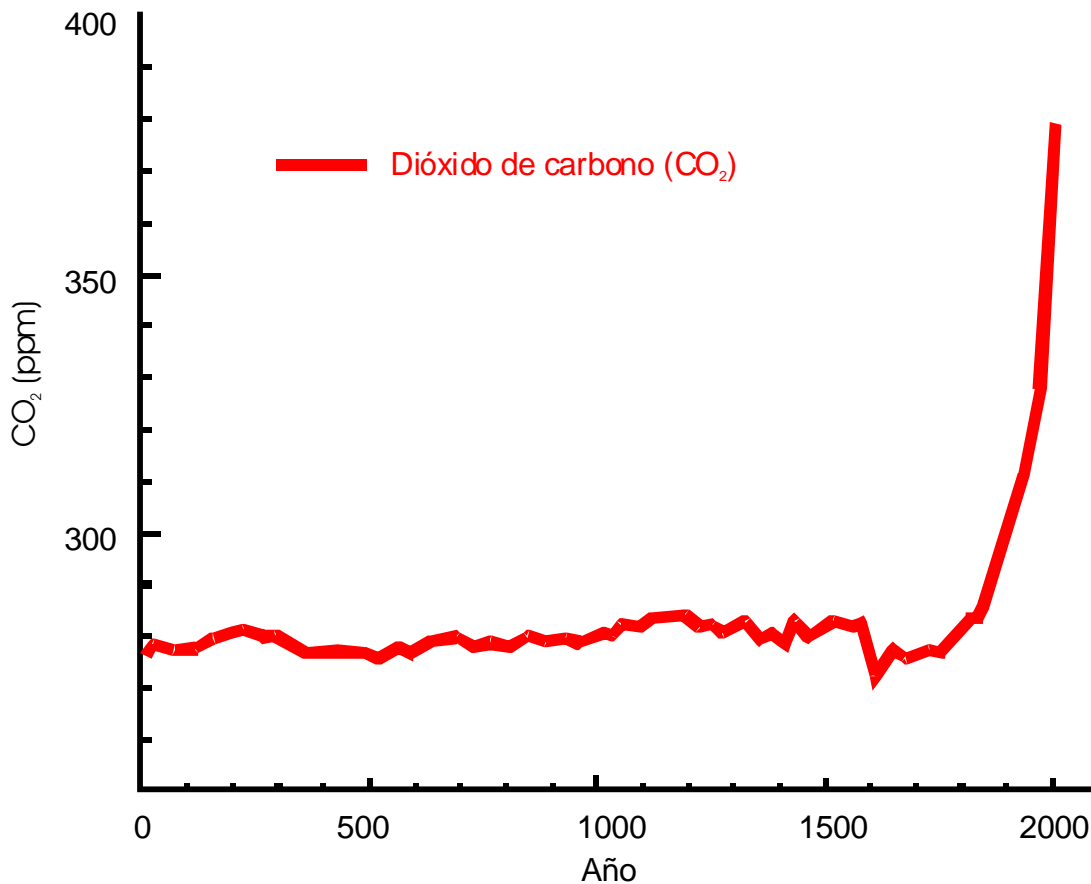


Figura 1. Concentración del CO₂ en la atmósfera desde el año 0 hasta el año 2000. Se observa un incremento constante a partir de la segunda mitad del siglo XVIII debido al inicio de la era industrial. La concentración de CO₂ antes de la era industrial era de alrededor de 280 ppm y continúa a la alza desde entonces. En nuestros días la concentración de CO₂ atmosférico ya es en promedio de 380 ppm. Gráfica adaptada de Forster *et al.*, 2007.

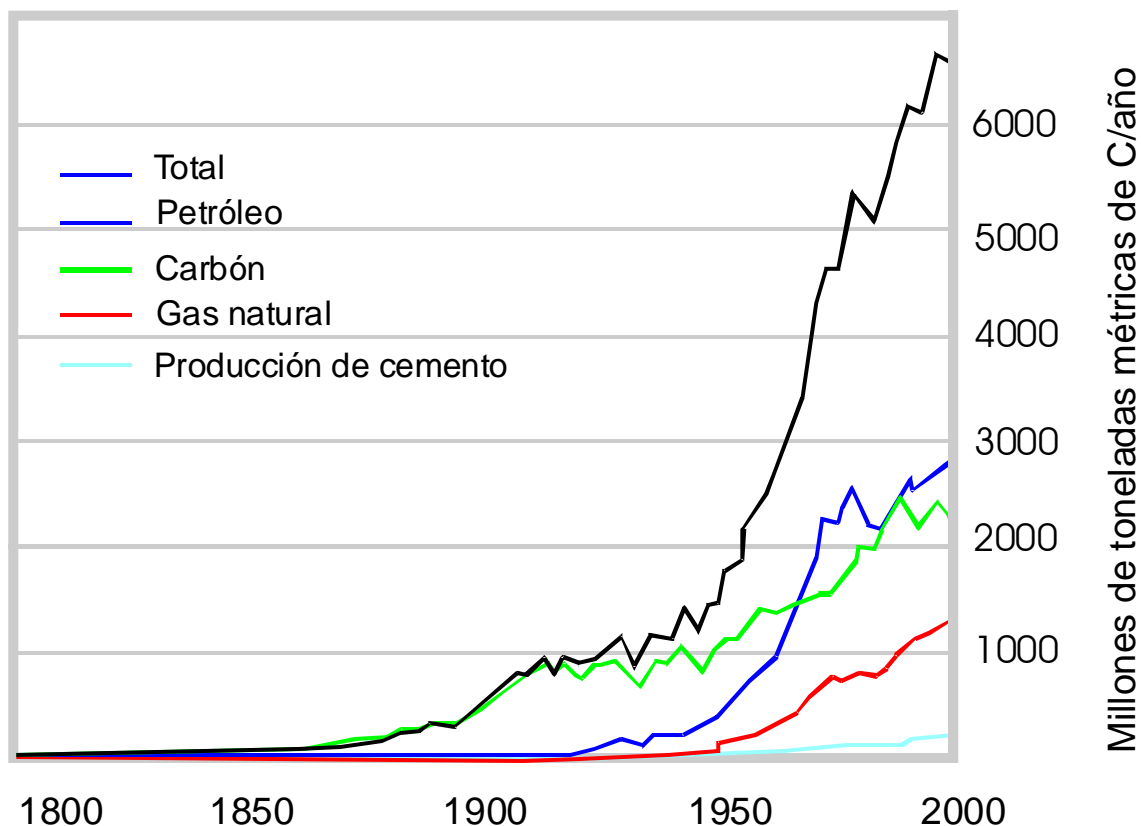


Figura 2. Emisión por compuestos de CO₂. El petróleo y el carbón son los que más aportan al total. (Tomado de Marland *et al.*, 2003).

El escenario actual es dramático y se ha visto que las emisiones de gases de efecto invernadero durante la primera década del siglo XXI son mayores que los de la década de 1990. Esto se suma a la posible disminución en la capacidad de los océanos para capturar carbono debido a que mientras más se acercan al punto de saturación, menor es su capacidad de captura (Canadell *et al.*, 2007; Schuster y Watson, 2007).

En el año 2009 se realizó en Copenhague la Conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático, donde se establecieron acuerdos en relación a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero para el período 2012-2020 (UNFCCC, 2009), los cuales deberán cumplirse por las naciones firmantes.

A pesar de la existencia del protocolo de Kyoto firmado en 1997 (Organización de las Naciones Unidas, 1998) y del interés por cumplirlo por parte de numerosas naciones, las medidas propuestas en este documento, que expira en 2012, son insuficientes para abordar el cambio climático de manera satisfactoria (Brook *et al.*, 2007). Además debemos considerar que se estima un aumento de 50% para el 2030, en relación al año 2000, en el consumo de energía (Hightower y Pierce, 2008), que seguramente repercutirá en el aumento de las emisiones de carbono. Hasta octubre de 2010, Estados Unidos de Norteamérica, uno de los principales países emisores de CO₂ (Figura 3) no ha ratificado e inclusive se ha manifestado en contra del protocolo de Kyoto (Figura 4).

Emisión de CO₂ por regiones

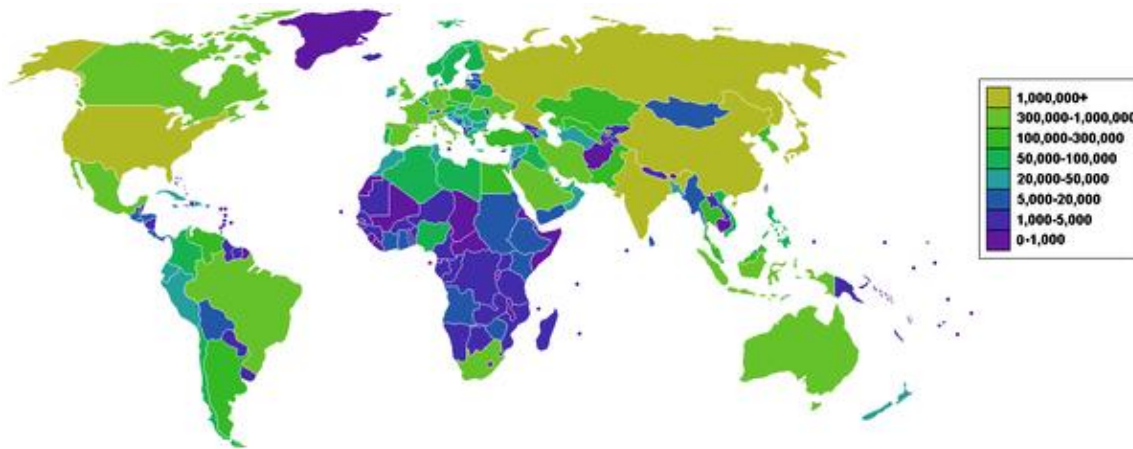


Figura 3. Nivel de emisión de CO₂ por países y regiones (con información de Boden *et al.*, 2011).



Figura 4. Estatus de firma y ratificación del Protocolo de Kyoto por los diferentes países (hasta octubre de 2010; UNFCCC, 2010).

A nivel mundial, las mayores fuentes de emisión de carbono antropogénico se concentran en las ciudades. Además, del total de la población, el 76% vive en zonas urbanas y el 24% en zonas rurales (UNData, 2011).

En la república mexicana la contaminación ha aumentado de manera paralela al incremento de la población. En los últimos sesenta años la población ha crecido cinco veces, en 1950 había 25.8 millones de personas y en 2010 112.3 millones. De 2000 a 2010, la población incrementó 9 millones de habitantes. De acuerdo al INEGI (2010), la zona más poblada del país corresponde al Distrito Federal y a varios municipios del Estado de México (Ecatepec, Naucalpan, Nezahualcóyotl, Tlalnepantla y Valle de Chalco) que, en conjunto, se les denomina Área Metropolitana del Valle de México. La mayor concentración de la población no tiene correspondencia con la distribución de las áreas arboladas, lo que conlleva a que no haya suficiente vegetación que capture carbono y otros contaminantes. El 20.4% del suelo urbano está cubierto por áreas verdes

públicas y privadas, de esta superficie el 55.9 % son zonas arboladas, el resto son zonas de pastos y/o arbustos (INEGI, 2005), lo cual representa una cantidad muy baja de áreas con árboles. En otros países se ha propuesto aumentar las áreas verdes para disminuir la contaminación en las ciudades y aumentar la captura de carbono.

Debido a que parte del Estado de México forma la zona conurbada del Distrito Federal, los problemas ambientales de éste se incrementan, ya que en el primero se ubican una gran cantidad de fábricas que emiten contaminantes a la atmósfera y que, debido a la dirección del viento, el aire contaminado llega a la capital, principalmente al sur de esta. A todo lo anterior, también se suma el aumento constante del parque vehicular.

Considerando la extensión territorial de la zona metropolitana del valle de México, ésta es una de las que más CO₂ emite a la atmósfera, con un 9.1% de las emisiones nacionales (Valle-Cárdenas, 2007). Afortunadamente, desde los años 90 del siglo pasado, se han hecho esfuerzos para que las actividades de la ciudad sean menos dañinas para el medio ambiente, poniendo especial atención en la calidad del aire (CAM *et al.*, 2003), y también se han dado los primeros pasos para disminuir el cambio climático en materia de transporte y uso de la energía solar, así como mediante la *naturación* de azoteas basándose en proyectos arquitectónicos de vanguardia como el de Rudolf (EAUE, 1997), así como los trabajos realizados por Jerónimo Reyes en la instalación de azoteas verdes (comunicación personal), y otros más recientes (Arellano *et al.*, 2010 a y b; Estrada *et al.*, 2010 a y b). Considerando que debe ser prioritario **revertir** el cambio climático y no conformarse únicamente con disminuirlo, es importante complementar las propuestas de los autores mencionados anteriormente con otros proyectos que también colaboren en la captura de carbono atmosférico.

MÉTODOS PARA CAPTURAR CARBONO ATMOSFÉRICO

En los últimos años se han propuesto varios métodos para capturar y almacenar carbono como una posible solución para mitigar las emisiones de CO₂, el cual, una vez capturado podría quedar almacenado y aislado de la atmósfera, por ejemplo:

- En formaciones geológicas (Benson *et al.*, 2005) o en el subsuelo (Friedmann, 2007) al inyectar los gases emitidos por chimeneas directamente en pozos (por ejemplo de gas natural o petróleo).
- En los océanos (Caldeira *et al.*, 2005) si se proporcionan nutrientes a fin de que la biomasa del fitoplancton aumente su número.
- A través de una planta de carbonatación, que convierta óxidos metálicos en carbonatos minerales, que pueden almacenarse en el subsuelo o en depósitos industriales para su uso posterior (Mazzotti *et al.*, 2005).

Los sistemas de captura mencionados son más eficientes si se instalan y operan junto a las fuentes emisoras de carbono, como chimeneas de plantas termoeléctricas y fábricas, donde existe una concentración de carbono mucho más alta de la que normalmente existe en la atmósfera. La Convención sobre la Diversidad Biológica (Convention on Biological Diversity, 2010) considera que estos métodos de captura no son adecuados ya que pueden conllevar a problemas muy graves que pondrían en peligro la habitabilidad de nuestro planeta

Seibel y Walsh (2001) alertan sobre los impactos negativos que podría ocasionar el almacenar artificialmente carbono en las profundidades de los océanos, como pérdida de biodiversidad en los ecosistemas abisales y la consecuente alteración en los ciclos biogeoquímicos.

En este mismo sentido se dirigieron algunas investigaciones que toman como referencia el funcionamiento de los sistemas biológicos, tal es el caso del proyecto de Cowan *et al.* (2003), quienes crearon un reactor (a base de una membrana de polipropileno) en el que utilizan la enzima anhidrasa carbónica bovina tipo II para capturar carbono a presión y temperatura ambiente a partir de una fuente emisora (400-100,000 ppm). De manera paralela, la compañía Greenfuel Technologies (Greenfuel Technologies Corporation, 2005) ha desarrollado tecnologías para capturar carbono y óxidos de nitrógeno mediante algas acuáticas, directamente de las chimeneas de fábricas y especialmente de plantas de producción de electricidad.

Kelly *et al.* (2005) indican que para la captura del carbono atmosférico (~380 ppm) resultan más eficientes los organismos autótrofos en relación a los mecanismos artificiales, lo cual se puede atribuir al perfeccionamiento de los mecanismos fotosintéticos a través de millones de años de evolución para poder trabajar con el CO₂ de la atmósfera. De esa manera es posible reducir la concentración de gases de efecto invernadero (GEIs) a niveles aceptables aprovechando organismos fotosintéticos subaéreos. En este sentido cabe mencionar que las ciudades emiten la mayor parte (85%) de los GEIs (Oke, 1993); sin embargo, gran parte de este carbono es capturado por los ecosistemas naturales, tales como las selvas y el mar. Para revertir el cambio climático se deberán eliminar de la atmósfera los GEIs emitidos por las actividades antropogénicas durante los dos últimos siglos, lo cual representa, quizás, el reto más grande para el hombre del siglo XXI, utilizando organismos que no sean exóticos (ajenos a la región de estudio), ni genéticamente modificados, para evitar la contaminación biológica y prevenir daños a la biodiversidad, y de acuerdo a Myers (1996), no disminuir los servicios ecosistémicos. Schrag (2007) señala que la mayoría de las predicciones climáticas subestiman el problema del cambio climático, y que para reducir los riesgos producidos por esta crisis ambiental será necesario utilizar la energía

más eficientemente, disminuir el uso de combustibles fósiles y capturar y almacenar el dióxido de carbono emitido por los combustibles fósiles que se han quemado, entre otras medidas.

ALGAS COMO ORGANISMOS PARA CAPTURAR CARBONO Y GENERAR BIOCOMBUSTIBLES

A raíz del déficit energético que se pronosticó desde mediados del siglo pasado, y el alarmante calentamiento global, en el último lustro se han iniciado varios proyectos con algas acuáticas con el propósito de capturar carbono (Rhodes y Keith, 2005; Stewart y Hessami, 2005), y a la vez generar biocombustibles baratos y de manera eficiente (Danielo, 2005). También se ha planteado que los biocombustibles derivados de microorganismos podrían resolver los problemas sociales que implican aquellos carburantes derivados de plantas superiores (Williams, 2007), aunque si no se implementan medidas adecuadas para evitar daños a los ecosistemas, poblaciones de microorganismos y otras especies, podrían generarse graves implicaciones ambientales tales como pérdida de biodiversidad y disminución de servicios ecosistémicos. Como señala Tollefson (2008), si se desea que los biocombustibles realmente ayuden a combatir el cambio climático, deberán producirse a partir de materiales más apropiados y de “otras maneras mejores”, refiriéndose y criticando a los biocombustibles producidos a partir de plantaciones de cereales y otros alimentos para consumo humano, pues la producción es poco eficiente e implica riesgos sociales como la disminución de la cantidad de alimento disponible para consumo.

Una alternativa a este problema es utilizar algas o cianobacterias para capturar carbono, pues, además de que pueden ser muy útiles para la captura de CO₂ y ser mucho más eficientes que las plantas (ver Apéndice I), según Isichei (1990) también pueden colaborar para resolver varias necesidades (como la producción de alimento para ganado y consumo humano). Además, juegan un papel muy importante en los ecosistemas áridos (por ejemplo protección del suelo, fijación

de nitrógeno, producción primaria) (Gray *et al.*, 2007), y ya se han utilizado para controlar la desertificación y rehabilitar zonas dañadas. Por todo esto, deben realizarse estudios con algas y cianobacterias, ya que pueden contribuir a resolver varios de los problemas que enfrenta la humanidad.

En términos generales, en los estudios donde se plantea el empleo de algas o cianobacterias para la generación de combustibles y captura de carbono, se ha puesto especial atención en los microorganismos de ambientes acuáticos y no en los subaéreos. Por esta razón, no se encontraron reportes específicos sobre la utilización de algas subaéreas para la captura de carbono atmosférico. Las subaéreas viven expuestas a la atmósfera en una interface aire-sustrato húmedo (como en la corteza de un árbol o el lodo), y también en el suelo, aún en las zonas áridas en los que aprovechan el rocío nocturno, y pueden crecer sobre éste o dentro del suelo y rocas (González, 1987).

Existen trabajos ficológicos enfocados al biodeterioro y que se refieren especialmente a algas y cianobacterias subaéreas que crecen sobre construcciones. En el trabajo de Gaylarde y Gaylarde (2000) se enlistan los microorganismos (algas, cianobacterias, protozoos, hongos, mixomicetes, actinomicetes y grupos de bacterias) que crecen en las superficies de construcciones pintadas en ciudades de Argentina, Bolivia, Brasil, México y Perú; detectaron 1363 morfotipos diferentes en 88 sitios y observaron que el 61.9% de los fotótrofos eran cianobacterias, y mencionan un método de recolección originalmente desarrollado por micólogos que no daña las construcciones y que fue utilizado en esta investigación. Crispim *et al.* (2004) analizaron las biopelículas de seis diferentes iglesias y encontraron algas y una diversidad de cianobacterias de 11 taxa. Nogueroles-Seoane y Rifon-Lastra (2000) registraron 12 cianobacterias y 14 algas, entre ellas *Klebsormidium flaccidum* (Kützing) P.C.Silva, K.R.Mattox y W.H.Blackwell en una iglesia del siglo XII.

CIANOBACTERIAS Y ALGAS.

Estos organismos tan heterogéneos se dividen en más de una docena de grupos basándose principalmente en su composición pigmentaria, sus materiales de reserva y detalles estructurales. Su diversidad se basa en su forma de crecimiento o alimentación y en su dependencia o no de la luz solar, y en diferencias morfológicas, desde la estructura celular, hasta los niveles de organización, pudiendo ser desde organismos microscópicos unicelulares, filamentosos o laminares y complejos agregados multicelulares pseudo-parenquimatosas y parenquimatosas sencillas. La diversidad de estos organismos también está dada por sus características bioquímicas y fisiológicas, así como por la organización de su material genético que se refleja tanto en las cianofíceas (procariotas), como en las especies de algas (del reino Eukaria). Esta diversidad genética y fenotípica se manifiesta más claramente en su diversidad ecológica, que es la que determina su distribución en la biosfera, ya que existen especies continentales, marinas y de ambientes intermedios como lagunas costeras, o extremos como los hielos polares, manantiales termales y desiertos, incluyendo las asociaciones con otros organismos como es el caso de los líquenes (Robledo, 1997) o los corales hermatípicos.

Las algas y las cianobacterias son organismos difíciles de clasificar, quizá por su posible origen polifilético, y las subaéreas no son una excepción (Crispim *et al.*, 2004). Actualmente la clasificación se refuerza analizando los tipos de ribosomas y las secuencias de sus nucleótidos.

CIANOBACTERIAS

El término cianobacteria fue acuñado por Stainer (1977), anteriormente se les conocía como algas verdeazules o cianofitas. Sin embargo, los especialistas en ficología han preferido denominarles cianoprocariotas para diferenciarlas del resto de las eubacterias, pues realizan fotosíntesis liberadora de oxígeno, presentan clorofila a (pero no b ni c), así como pigmentos accesorios azules

(ficocianina y aloficocianina) y ficoeritrina (pigmento rojo) y utilizan almidón cianofíceo como material de reserva (Hoek *et al.*, 1995). Su organización va desde seres unicelulares hasta organismos con un pseudoparénquima simple, pasando por coloniales y filamentosos. No obstante su enorme diversidad morfológica, se trata de un grupo monofilético (Tomitani *et al.*, 2006), a diferencia de las algas eucariontes que representan un grupo polifilético (Andersen, 1992).

Brock (1973) señala que las cianobacterias han logrado colonizar una gran diversidad de ambientes, aunque su distribución actual está más restringida que en épocas pasadas, como el precámbrico, debido a la competencia que les representan los eucariontes. El mismo autor también enlista las siguientes características: capacidad de fijar nitrógeno atmosférico; en algunas la facultad de formar vesículas de aire para la flotación y controlar la posición vertical en los cuerpos de agua; la presencia de pigmentos accesorios del tipo ficobilinas y la capacidad de crecer cuando las concentraciones de oxígeno son bajas. Otros autores señalan que gracias a estas particularidades, las cianobacterias ocupan en la actualidad una gran variedad de ambientes, que van desde amplias áreas en los océanos, suelos templados, lagos de agua dulce, hábitats extremos como desiertos áridos, lagos congelados y aguas termales (Herrero *et al.*, 2001). Capturan el CO₂ atmosférico a través del ciclo de Calvin Benson (Stainer y Cohen-Bazire, 1977), y algunas especies poseen mecanismos que les permiten contrarrestar características ambientales extremas como las siguientes:

- Físicas: altas y bajas temperaturas, baja o alta concentración de humedad así como cambios abruptos en dichas propiedades (Grossman *et al.*, 2001, Lüttge *et al.*, 1995 y Hershkovitz *et al.*, 1991).
- Químicas: acidez, alcalinidad, concentración de diversos minerales así como de sustancias dañinas como metales pesados e hidrocarburos (Fogg, 1956; Silver, 1996 y Turner y Robinson, 1995).

Las cianobacterias se encuentran entre los primeros organismos que

colonizaron la Tierra, son los ancestros fotosintéticos de los cloroplastos en los eucariontes, como las plantas y las algas. Pueden sobrevivir en ambientes extremos (por ejemplo a -60°C o 90°C), pueden formar simbiosis, algunas tienen heterocitos, por lo que son modelos ideales para estudiar procesos fundamentales como la fotosíntesis. Además, producen varios compuestos útiles en la industria y la medicina (Herrero y Flores, 2008).

Fuenmayor *et al.* (2009) descubrieron que el pH es un factor determinante que influye directamente en el crecimiento de las cianobacterias, desarrollándose mejor entre pH de 7-9. Inclusive Reddy (1984) registró que la fotosíntesis puede inhibirse si el pH es menor a 6.

Al representar un grupo de organismos fotosintéticos con una amplia capacidad adaptativa al medio y producir una gran cantidad de biomasa, son de los principales grupos que participan en la fijación de CO_2 (Florencio, 2009). Varias de las especies presentan características que puede tomarse en cuenta en proyectos para mejorar el ambiente (Botánica, 2011). Hasta la fecha, se utilizan como indicadores de contaminación acuática (Peinador, 1999, Rivera y Gómez, 2010), ya que su desarrollo puede señalar la presencia de metales pesados y compuestos orgánicos dañinos.

ALGAS

Las algas poseen una gran diversidad de especies. El papel que desempeñan en el mantenimiento y funcionamiento global de los ecosistemas se subestima y a veces hasta es sujeto de polémicas.

El concepto de biodiversidad aplicado a las algas comenzó a analizarse en la Reunión Internacional sobre Biodiversidad, celebrada en septiembre de 1994 durante la Asamblea General de la Unión Internacional de Ciencias Biológicas de la UNESCO (UNESCO, 1994). A la pregunta de cuál es el número de especies de algas, todavía no hay una respuesta, ya que existen diferentes

aproximaciones en función de la priorización de distintos criterios. De acuerdo con un análisis (Robledo, 1997), las 36,000 especies de algas conocidas apenas representan 17% de las especies que existen actualmente, lo que indica que el número total de especies de algas que existen en el mundo debe superar las 200,000. El conocimiento taxonómico de estos organismos en los distintos biotopos del planeta dependerá del esfuerzo individual o colectivo que se realice en cada país.

A pesar de que la comunidad ficológica es pequeña, si se compara con las de otras disciplinas, existen muchas razones por las cuales las algas son un grupo de interés, ya que juegan un papel fundamental en la producción primaria y de oxígeno atmosférico, especialmente en ambientes acuáticos, presentando una gran influencia en el ciclo de carbono (Robledo, 1997).

Se han estudiado mucho por su aplicación en la industria alimenticia, farmacéutica y química (González, 1987), así como por su utilidad como indicadoras de contaminación por metales pesados (Rai, 1981) y bioabsorción de estas sustancias (Cañizares-Villanueva, 2000). Pero, como ya se ha mencionado, no se encontraron investigaciones sobre la capacidad de captura de carbono en algas subaéreas. Como referencia, se pueden considerar algunos trabajos existentes que mencionan aspectos fotosintéticos y ecofisiológicos en aguas acuáticas (Kirst y Wiencke, 1995; Beach y Smith, 1996 a y b) y fotoecofisiología (Häder y Figueroa, 1997 y Copertino *et al.*, 2009).

ALGAS Y CIANOBACTERIAS SUBAÉREAS

Se denomina subaéreos a los organismos que tienen la capacidad de crecer en una superficie (agua, rocas, suelo, madera, plantas) que se encuentra en contacto directo con el aire. Según Ettl y Gärtner (1995), las algas y cianobacterias subaéreas se dividen en aerofíticas facultativas ó aeroterrestres (euterrestres, hidroterrestres, aeroterrestres, hipolíticas) y terrestres facultativas (epilíticas, xilofíticas, litofíticas y ficobiontes). De acuerdo a Eberto Novelo

(comunicación personal) existen alrededor de 400 especies de algas y cianobacterias pertenecientes a diferentes grupos que pueden presentar este tipo de crecimiento.

FOTOSÍNTESIS

La fotosíntesis es el proceso mediante el cual algunos organismos capturan la energía del sol (fotones) y la convierten en formas estables de energía: ATP y NADPH⁺, que son utilizadas para reducir el bióxido de carbono inorgánico en carbono orgánico en forma de azúcares (Hopkins y Hüner, 2004; Taiz y Zeiger, 2010).

El tipo de fotosíntesis más extendida, y de la cual depende prácticamente toda la vida, es la oxigénica, la cual es responsable de la producción de oxígeno y de materia orgánica en nuestro planeta.

La fotosíntesis consiste de tres etapas: fotofísica, fotoquímica y bioquímica. En las primeras ocurre la captura de fotones, la transmisión de energía y electrones a la cadena de transporte de electrones para sintetizar NADPH⁺ y ATP. Estos compuestos son utilizados en la reducción del carbono para sintetizar carbohidratos. Este tipo de fotosíntesis es aquella donde el agua es la donadora de electrones y se produce oxígeno elemental (O₂) como residuo y es llevada a cabo por cianobacterias, algas y plantas (Nelson y Ben-Shem, 2004).

Es el proceso natural que mantiene la vida en la Tierra y el principal sistema de captura de carbono que existe, aproximadamente 105×10^{15} gramos de carbono cada año (Field *et al.*, 1998).

En las plantas y las clorofíceas, las reacciones que integran el proceso fotosintético ocurren dentro de los cloroplastos, organelos que tienen una estructura compartimentalizada. Contienen en su interior a los tilacoides y al estroma; en los primeros se llevan a cabo las reacciones fotofísica y fotoquímica (captura y transformación de energía), y en el segundo se realizan las

reacciones bioquímicas (fijación de CO_2 y la síntesis de carbohidratos) (Taiz y Zeiger, 2006). La diferencia entre algas y plantas superiores está en la forma en que adquieren el carbono para la fotosíntesis y en la composición de los pigmentos antena, particularmente diferente en algas rojas (rodofíceas) y cafés (feofíceas) (Moroney e Ynalvez, 2009). En un reporte de Coleman y Colman (1981), se señala que aunque la mayoría de la evidencia sugiere que la principal vía de fijación de carbono en las cianobacterias es la C_3 , la presencia de considerables cantidades de ácidos de la vía C_4 durante las fases iniciales de la fijación indica que en estos microorganismos puede ocurrir una alternancia $\text{C}_3\text{-C}_4$ como en algunas plantas superiores. Posteriormente Aizawa y Miyachi (1986), estudiando el efecto de la concentración de carbono en cianobacterias y clorofíceas acuáticas, reportan que los valores de $K_m(\text{CO}_2)$ en microalgas creciendo con aire atmosférico (baja concentración de CO_2) es similar al de plantas terrestre C_4 ; presentan bajos valores de fotorrespiración y de puntos de compensación de CO_2 , y poca o ninguna inhibición de la fotosíntesis por oxígeno, mientras que si se les somete un aire enriquecido con CO_2 pueden tener una $K_m(\text{CO}_2)$ semejante al de las plantas C_3 . Moroney e Ynalvez (2009) indican que en las dos últimas décadas se han obtenido evidencias de que en cianobacterias y en algas hay mecanismos concentradores de carbono, y que la RuBisCO no actúa como oxigenasa por la alta acumulación de CO_2 . Evidencias de estos mecanismos se encuentran reportados ampliamente por Giordano *et al.* (2005). En un estudio realizado en una feofíceas marina, se reportó el efecto combinado de bajas y altas concentraciones de CO_2 y nitrógeno en la fotosíntesis y respiración (Zou *et al.*, 2011), los resultados reportan que la fotosíntesis es más sensible a los cambios de temperatura que a los cambios de concentración de CO_2 o de nitrógeno.

Las cianobacterias (que también realizan fotosíntesis oxigénica) no tienen cloroplastos, y en su lugar tienen un sistema extenso de membranas arregladas alrededor de la periferia celular en capas paralelas (tilacoides); estas

membranas poseen unas partículas llamadas ficobilisomas alternando en cada lado de la membrana, por lo cual se forma un sistema continuo. Los ficobilisomas son complejos supramoleculares de pigmentos accesorios (aloficocianina al centro y ficoeritrina y ficocianina en la periferia), y son la principal antena que captura la luz en cianobacterias y algas rojas. Al igual que en las plantas y algas tiene los fotosistemas I y II, el primero está asociado al transporte de electrones, y el segundo a la oxidación del agua y al respectivo transporte de electrones (Lawlor, 2001).

Las reacciones bioquímicas que producen carbohidratos se llevan a cabo en el estroma de los tilacoides en los organismos que tienen cloroplastos; en el caso de las cianobacterias se efectúan en el citosol; en ambos casos la reducción del CO₂ utiliza el poder reductor (NADPH⁺) y el ATP generados gracias a las reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis (Nelson y Cox, 2008). En los diferentes grupos de algas el carbono es almacenado en diversos compuestos, por ejemplo las cianobacterias utilizan como material de reserva el almidón cianofíceo y las clorofíceas el almidón (John *et al.*, 2003).

JUSTIFICACIÓN

Considerando que, hasta la fecha, los problemas colaterales al calentamiento global son prácticamente irreversibles, se debe trabajar en la búsqueda de soluciones a este problema, de forma tal que las dificultades concernientes al cambio climático sean frenadas, y de ser posible, revertidas, eliminando y/o disminuyendo los GEIs directamente en las áreas urbanas para que en conjunto con los servicios ambientales de ecosistemas naturales se mejore la calidad del aire, y dar los primeros pasos para la sustentabilidad de las áreas urbanas. Por lo que es importante utilizar nuevas estrategias para la captura de CO₂ en la Ciudad de México, que es una de las regiones de nuestro país que más combustibles fósiles consume. Por ello es importante conocer la capacidad de captura de carbono de cianofíceas y algas eucariontes, ya que pueden tener la

capacidad de retener contaminantes y carbono del aire, y por lo tanto ser útiles para colaborar con la disminución de CO₂.

Este trabajo se enfoca a algas subaéreas del clima templado subhúmedo de la Ciudad de México como potenciales organismos captadores de CO₂.

OBJETIVO

Determinar la capacidad de captura de carbono en algas o cianobacterias que crecen en la ciudad de México para evaluar su posible uso en la disminución de la contaminación, específicamente la concentración de carbono.

HIPÓTESIS

H₀: La captura de carbono será igual en los fotótrofos estudiados.

H_A: La captura de carbono será diferente en al menos uno de los fotótrofos.

ZONA DE RECOLECCIÓN

Se ubica en la parte sur de la cuenca de México, la cual presenta clima templado subhúmedo con lluvias en verano. De acuerdo con la clasificación de Köppen, en la Cuenca el clima es templado en el centro y sur, y seco estepario en la parte norte y oriente donde hay una menor precipitación (Jáuregui, 2000). Aunque García (1968) distingue una gran diversidad de tipos y subtipos climáticos en esta zona, debido a la fuerte influencia de la orografía en la temperatura y la precipitación (Apéndice II).

En este trabajo se propone que se utilicen algas subaéreas en la zona metropolitana de la cuenca de México para capturar carbono atmosférico y para este estudio se seleccionó como zona de recolección el sur de la cuenca (Figura 5), correspondiente a los subtipos climáticos C(w₂)(w)b(i') y C(w₀)(w)b(i').



Figura 5. Puntos de recolección. 1.- Ciudad Universitaria. 2.- Coyoacán. 3.- Colonia del Valle. 4.- Ixtapaluca.

En la zona metropolitana de la cuenca de México, pueden presentarse lluvias ácidas, islas de calor urbano y generalmente el aire presenta numerosos contaminantes como hidrocarburos y metales pesados (Arellano *et al.*, 2011). Dichos factores, junto con la distribución de la precipitación y la variación en la temperatura a lo largo del día y de las estaciones, pueden influir en el desarrollo de los organismos de estudio.

MÉTODO

OBTENCIÓN DEL MATERIAL BIOLÓGICO

Se hicieron recolecciones de material biológico que claramente contenía fotótrofos microscópicos en septiembre y octubre de 2006, así como en febrero

de 2007, en diversas áreas verdes del sur de la ciudad de México (Delegaciones Benito Juárez y Coyoacán). Solamente tres se realizaron en Ixtapaluca, Estado de México. Se recolectaron aquellos crecimientos de organismos que a simple vista estaban compuestas por fotótrofos que no tenían apariencia de líquenes en árboles, rocas y construcciones antropogénicas. Se tomaron fotografías de los sitios de recolección para futura referencia, se registraron datos como características generales del sustrato, el color del crecimiento, fecha y lugar de recolección, así como la orientación cardinal del crecimiento y las condiciones de luz y sombra en los sitios.

La recolección del material biológico se realizó de la siguiente manera: los organismos que estaban ligeramente adheridos al sustrato se tomaron utilizando pinzas de relojero o cinta para cubrir (*masking tape*); los organismos que presentaban una alta adhesión al sustrato, fueron extraídos con una espátula para removerlo junto con el fotótrofo (por ejemplo cortezas de árboles y costras de pintura); aquellos organismos que crecían en rocas fueron recolectados removiendo una pequeña porción de la roca con cincel y martillo (Figura 6).



Figura 6. Instrumentos utilizados para la recolección. De izquierda a derecha: pinzas de relojero, espátula, martillo y cincel para extraer fotótrofos ligeramente adheridos al sustrato, fuertemente adheridos y en rocas, respectivamente.

Cada muestra obtenida fue dividida en dos partes para las siguientes acciones:

- a) Su identificación, para lo cual se fijaron en una solución de formol comercial diluida en agua 4% (v/v).
- b) Realizar cultivos en medios específicos (BBM y BG11) líquidos y sólidos.

En la Figura 7 se presenta un resumen del proceso de trabajo.

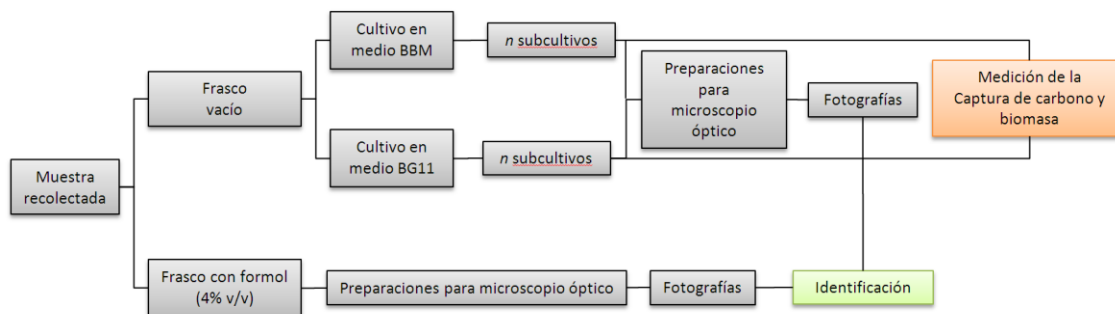


Figura 7. Diagrama que resume el proceso que se aplicó en cada muestra desde su recolección hasta llegar a la medición de captura de carbono.

En la Tabla 1 se presentan las características del sustrato, color de la colonia, sitio y fecha de recolección, orientación de la colonia, iluminación, así como la referencia de la fotografía de cada sitio de muestreo. En la Figura 8 se presentan las imágenes de los sitios de recolección indicados.

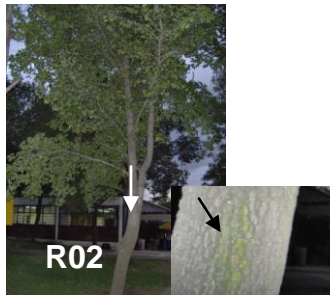
Tabla 1. Características generales de los sitios de recolección del material biológico.

Muestra	Sustrato	Color de colonia	Lugar de recolección	Fecha de recolección	Posición u orientación, e iluminación de la colonia	Referencia fotográfica del lugar de recolección
001	Pintura impermeable para concreto	Verde limón	Facultad de Economía, UNAM, CU.	2006, 09-15	Posición: superior. Luz de sol directa durante el medio día y tarde.	R01
002	Árbol vivo	Verde limón	Entrada principal de la UNAM, CU (lado norte).	2006, 09-15	Orientación: sur. Iluminación indirecta: todo el día bajo la sombra tenue del árbol.	R02
003	Suelo (rocas y concreto) y vainas dehiscentes de <i>Jacaranda</i> sp. en el suelo	Verde limón	Facultad de Economía, UNAM, CU.	2006, 09-15	Posición: superior. Iluminación indirecta bajo la sombra de las jacarandas.	R03
004	Roca basáltica	Verde limón	Explanada frente al metro CU, UNAM.	2006, 09-15	Orientación: superior y sureste. Bajo un árbol poco frondoso. Sombra tenue durante la mañana y hasta el medio día. Sol directo 16:00 a 18:00 hrs.	R04a

Muestra	Sustrato	Color de colonia	Lugar de recolección	Fecha de recolección	Posición u orientación, e iluminación de la colonia	Referencia fotográfica del lugar de recolección
005	Roca caliza húmeda	Verde limón	Explanada frente al metro CU, UNAM.	2006, 09-13	Orientación: superior y sureste. Bajo un árbol poco frondoso. Sombra tenue durante todo el día.	R04b
006	Tierra húmeda (entre grieta de piso de mosaico)	Verde muy oscuro	Grieta en el piso de la Alberca de CU.	2006, 09-18	Posición: superior. Sol directo durante el medio día y por la mañana. Sombra después de las 16:00 h.	R05
007	Pintura para concreto (guarnición)	Verde limón	Guarnición del paso peatonal frente a la entrada de los Edificios D y E de la Facultad de Química de la UNAM en CU.	2006, 09-22	Orientación: este y oeste. Sombra tenue todo el día (bajo árboles).	R06
008	Capa de tierra húmeda (de unos 5-9 mm de espesor) que se encuentra sobre concreto.	Verde muy oscuro	Lado oriente de la jardinera central del edificio Tlahuizcalpan en la Facultad de Ciencias en CU.	2006, 09-22	Orientación: Oriente Posición: superior Sombra todo el día.	R07
009	Pintura naranja para concreto	Verde muy oscuro	Pared humedecida por gotera de la cafetería de la Facultad de Ciencias en CU.	2006, 09-22	Orientación: oeste. Sombra durante la mañana y el medio día. Breves períodos de incidencia directa del sol durante la tarde (15:00-17:00 hrs).	R08
010	Pintura para metal (tanque de gas estacionario)	Verde muy oscuro	Gotera sobre tanque abandonado de gas estacionario en la Facultad de Ciencias, CU.	2006, 09-22	Orientación: sur. Sombra todo el día.	R09
011	Árbol vivo	Verde limón con zonas verde oscuro	Parque Vida Silvestre (Ixtapaluca, Edo. Mex)	2006, 03-23	Orientación: norte, sur, este, oeste (alrededor del tronco de un árbol). Sombra tenue durante todo el día.	R10
012	Árbol vivo	Verde limón	Parque Vida Silvestre (Ixtapaluca, Edo. Mex)	2006, 03-23	Orientación: norte, sur, este, oeste (alrededor del tronco de un árbol). Sombra tenue durante todo el día.	R11
013	Árbol vivo	Verde azulado	Parque Vida Silvestre (Ixtapaluca, Edo. Mex)	2006, 03-23	Orientación: norte, sur, este, oeste (alrededor del tronco de un árbol). Sombra tenue durante todo el día.	R12
014	Pintura para concreto en gotera	Verde muy oscuro, casi negro.	Parte inferior de las gradas de la Alberca CU.	2006, 09-27	Orientación: inferior. Luz de sol directa durante las primeras horas de la mañana (7-10 am). Sombra el resto del día.	R13

Muestra	Sustrato	Color de colonia	Lugar de recolección	Fecha de recolección	Posición u orientación, e iluminación de la colonia	Referencia fotográfica del lugar de recolección
015	Roca volcánica	Verde limón	Rocas bajo el edificio B de Biología. Facultad de Ciencias, CU.	2006, 09-26	Orientación: sur. Sombra toda la mañana y parte de la tarde. Sol directo durante el medio día (12:00-14:30).	R14
016	Roca volcánica	Verde oscuro	Rocas bajo el edificio B de Biología. Facultad de Ciencias, CU.	2006, 09-26	Orientación: superior y sur. Sombra todo el día (bajo un árbol y protegido por construcciones).	R14
017	Concreto sin pintar (guarnición de banquetta).	Verde limón	Banqueta frente a construcción en la colonia del valle	2007, 02-18	Orientación: oeste. Luz directa de sol por la tarde. Sombra durante la mañana.	R15
018	Pared de roca	Verde limón	Pared construida a base de roca volcánica en la Colonia del Valle	2007, 02-18	Orientación: norte. Sombra tenue todo el día.	R16
019	Caja metálica cubierta en zonas con papel y moteada con lodo	Verde limón	Caja telefónica en Colonia del Valle	2007, 02-18	Orientación: norte y superior. Luz solar directa durante la tarde. Sombra el resto del día.	R17
020	Árbol vivo	Verde claro	Viveros de Coyoacán	2007, 02-18	Orientación: norte. Sombra tenue durante todo el día.	R18
021	Árbol vivo	Verde limón	Viveros de Coyoacán	2007, 02-18	Orientación: norte. Sombra tenue durante todo el día.	R19
022	Árbol vivo	Verde limón	Viveros de Coyoacán	2007, 02-18	Orientación: poniente. Sombra tenue durante la mañana y el medio día. Sol directo por las tardes gracias a un claro.	R20

FOTOGRAFÍAS DE LOS LUGARES DE RECOLECCIÓN



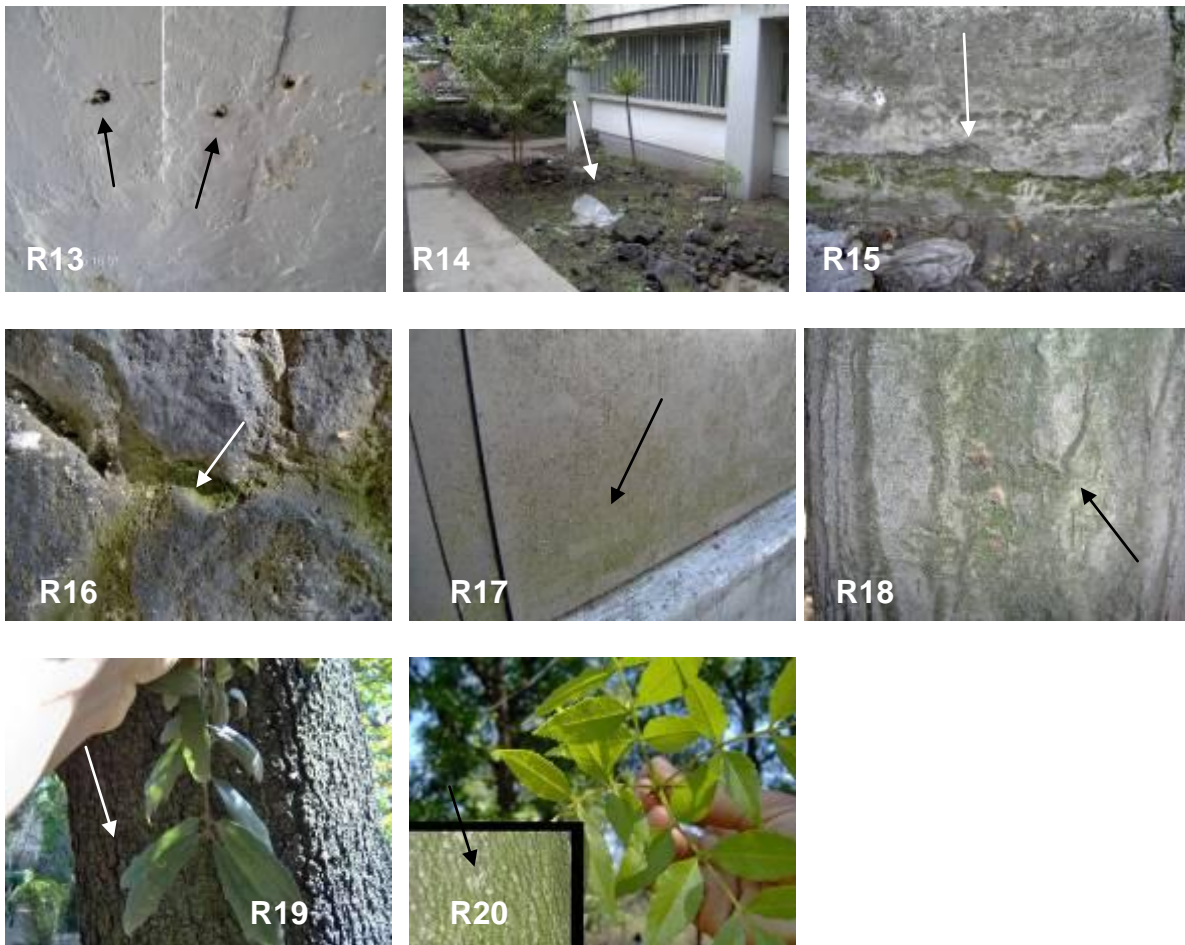


Figura 8. Imágenes de los sitios de recolección indicados en la Tabla 1.

IDENTIFICACIÓN

Para la identificación se utilizaron preparaciones *in vivo* y semipermanentes utilizando grenetina glicerizada sin fenol (Apéndice I); se tomaron microfotografías para apoyar su identificación, y como complemento se realizaron tinciones con lugol para resaltar el almidón (azul oscuro), y tinta india negra para detectar capas de mucílago. Se utilizó una cámara fotográfica digital Olympus® DP-12 para microscopio óptico. Se emplearon las claves de identificación de Bourrely (1972), Ettl y Gärtner (1988), John *et al.* (2003) y Wehr y Sheath (2003),

Desafortunadamente la clasificación a nivel de especie del tipo de organismos que aquí se trabajaron fue problemática ya que las especies tienden a variar su morfología de acuerdo a las condiciones ambientales (John *et al.*, 2003), por lo que en este trabajo únicamente se identificó hasta el nivel de género.

CULTIVOS

Se realizaron cultivos con la finalidad de:

- a) Aislar los fotótrofos,
- b) Obtener suficiente material biológico de cada especie para realizar las mediciones de captura de carbono,
- c) Identificar los organismos.

Para disminuir la contaminación por hongos o bacterias, todos los trabajos que involucraron la manipulación de cultivos se realizaron en una campana de flujo laminar, y los instrumentos de trabajo fueron previamente esterilizados en una autoclave o directamente a la flama del mechero de alcohol. No se utilizó un método de desinfección del material biológico, por ello, la contaminación por hongos fue frecuente en los primeros cultivos, pero las hifas fueron removidas con ayuda de un asa bacteriológica, y después de tres o cuatro subcultivos, se obtuvieron crecimientos de fotótrofos libres de hongos.

Se utilizaron los medios de cultivo BBM y BG11, tanto sólidos como líquidos para todas las muestras, de acuerdo a las formulaciones descritas por Andersen (2005) (Apéndice III). Para evitar la desecación del agar en los medios sólidos, se inyectó agua destilada esterilizada (a temperatura ambiente) en los cultivos cada dos o tres semanas. Los medios BBM y BG11 son utilizados ampliamente para cultivar algas y cianobacterias. Ambos contienen macronutrientes, micronutrientes esenciales y algunos metales; carecen de vitaminas, proteínas y hormonas. El medio BG11 es utilizado principalmente para el cultivo de cianobacterias.

INOCULACIÓN

Una pequeña porción de cada muestra recolectada ($\sim 1 \text{ mm}^2$) fue inoculado en medio BBM y BG11, tanto líquidos como sólidos.

CONDICIONES DE CULTIVO

Los cultivos y subcultivos se mantuvieron en condiciones controladas de luz ($38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{seg}^{-1}$), temperatura ($25 \pm 2^\circ \text{C}$) y con un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 de oscuridad en las Cámaras de Ambientes Controlados.

RESIEMBRA

Se realizaron resiembras cuando:

- El crecimiento algal cubría aproximadamente el 80% de la superficie del medio de cultivo de la caja de Petri,
- Se observaba crecimiento fúngico,
- Se distinguía una deshidratación del agar.

AISLAMIENTO

Para la obtención de cultivos puros, tanto de cianobacterias como de algas eucariontes, se siguieron algunas de las propuestas de Skinner (1932):

- 1) Para eliminar bacterias y hongos se realizaron subcultivos múltiples y consecutivos en medios inorgánicos y tan pronto el crecimiento de los fotótrofos se hacía evidente se volvían a realizar subcultivos hasta obtener cultivos con organismos fotosintéticos únicamente. Para descartar la existencia de hongos y bacterias, después de varios subcultivos se agrega una solución estéril de carbohidratos (sacarosa en nuestro caso) para verificar la ausencia de hongos y bacterias.
- 2) Para aislar las diferentes especies de fotótrofos se realizaron múltiples subcultivos consecutivos tanto en medios líquidos como sólidos hasta lograr obtener colonias puras.

ORGANISMOS AISLADOS

Las poblaciones de *Chlorococcum* sp. fueron aisladas a partir de una placa en la que también crecían cianobacterias unicelulares y otras del orden Nostocales. El aislamiento se logró porque a partir de 1 mL de medio BBM líquido (en el cual crecían los grupos de organismos mencionados), se hizo un subcultivo en medio BBM sólido. A los 15 días *Chlorococcum* sp. formó numerosas colonias redondas que se distinguían claramente de las formadas por los demás organismos, de las cuales se obtuvo la muestra para obtener cultivos puros (Figura 9).

Klebsormidium sp. y *Pseudanabaena* sp. se aislaron satisfactoriamente después de realizar múltiples y repetidos subcultivos hasta que se logró obtener el organismo puro.

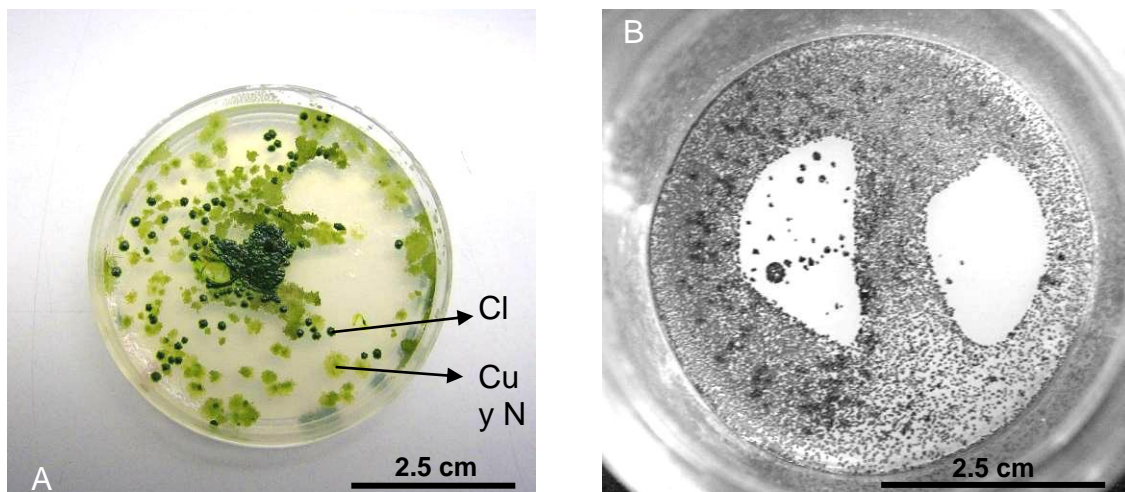


Figura 9. A: cultivo donde crecen tres tipos de fotótrofos, las colonias redondas color verde oscuro son formadas por *Chlorococcum* sp (Cl) y las colonias amorfas y de un verde menos intenso son formadas por cianobacterias tanto unicelulares (Cu) como Nostocales (N). B: cultivo puro donde *Chlorococcum* sp. forma colonias redondas de diversos tamaños.

DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CO₂ Y BIOMASA

ASIMILACIÓN DE CO₂

Se utilizó el método propuesto por Rodés-García y Collazo-Ortega (2006), se realizaron evaluaciones a los 20 días de edad de los cultivos con un IRGA (Analizador infrarrojo de gases, Qubit Systems, 1999) y se realizaron de 4 a 5 repeticiones dependiendo de la cantidad de material disponible.

1. Se utilizaron dos concentraciones de CO₂. Una de aire ambiental (aire basal) y otra a 400 ppm de CO₂. En el primer caso se midió la concentración de CO₂ en el aire basal (CO₂ AB) en partes por millón (ppm) durante 20 minutos en un frasco vacío (sin fotótrofos) y se obtuvo el promedio de CO₂, para ello se siguió el esquema mostrado en la Figura 10. En el segundo caso se utilizó aire de un tanque de CO₂ de 400 ppm. Cada día que se realizó la medición se midió el promedio de CO₂ del aire basal.

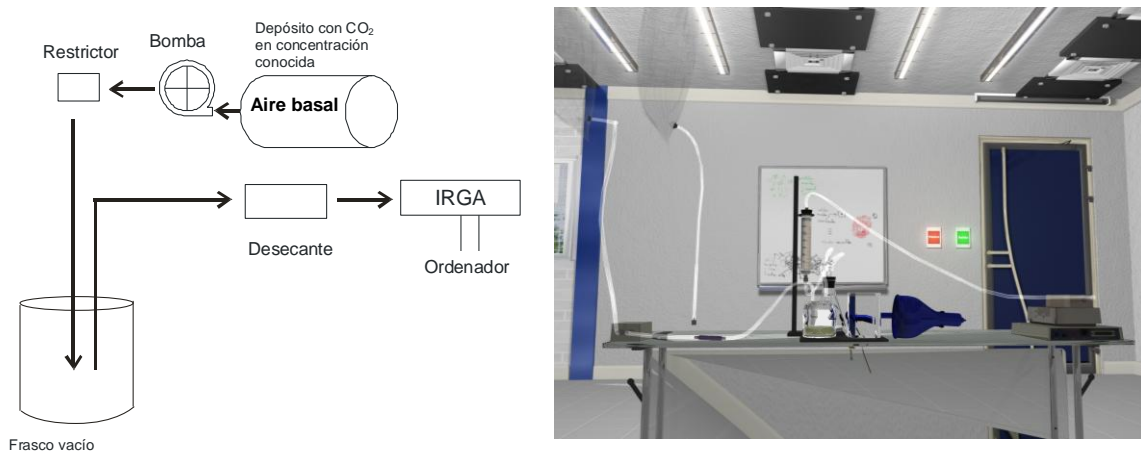


Figura 10. Representación esquemática del dispositivo experimental para la medición de la concentración de carbono en el aire. El aire es bombeado hacia un frasco sin fotótrofos y pasa por un restrictor que permite el paso de una cantidad constante de aire (0.004 L min^{-1}). Antes de llegar al IRGA la corriente de aire pasa por un baño de condensación y después por el desecante (perclorato de magnesio anhídrido), para eliminar partículas de agua o vapor de ésta y así evitar daños al IRGA.

- Se procedió a medir el carbono capturado por el fotótrofo (CO_2_{ft}) dentro de un frasco durante 20 minutos de acuerdo al dispositivo experimental mostrado en la Figura 11.

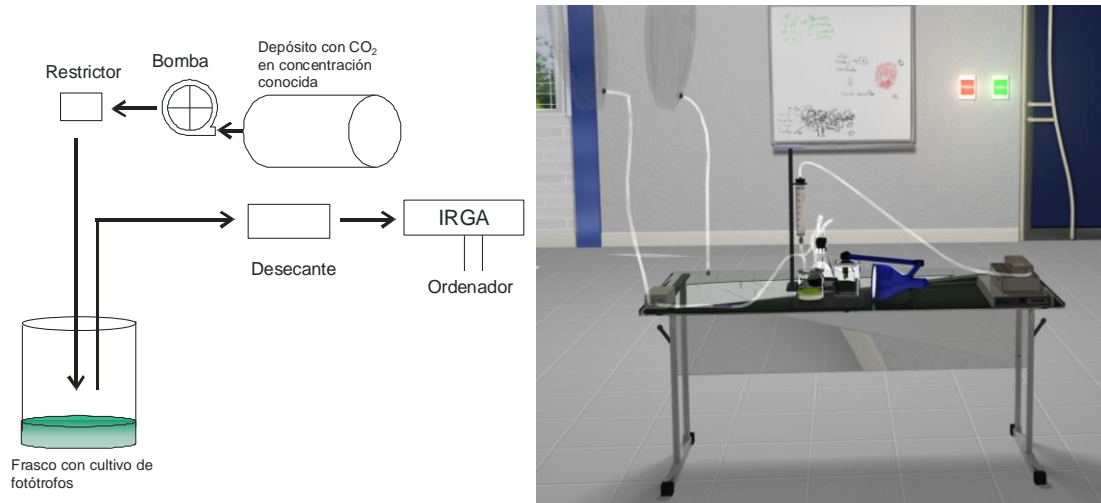


Figura 11. Representación esquemática del dispositivo experimental para la medición de la captura de CO_2 . La diferencia respecto a la Figura 10 es que el frasco contiene un cultivo de fotótrofos.

- Se obtuvo el promedio de CO_2 en el aire basal ($\text{CO}_{2\text{AB}}$) y el del aire con el fotótrofo ($\text{CO}_{2\text{ft}}$). Para determinar la cantidad de carbono capturado se hizo la resta $\text{CO}_{2\text{AB}} - \text{CO}_{2\text{ft}}$. Este valor se consideró como el control.
- Se realizó el mismo procedimiento descrito en el paso anterior, pero con aire con una concentración de CO_2 de 400 ppm.

MEDICIÓN DE LA BIOMASA (PESO SECO)

Después de hacer las mediciones de captura de carbono con el IRGA, se procedió a medir el peso seco de los crecimientos para obtener la relación entre captura de carbono y biomasa. Para ello, los organismos fueron depositados en un papel filtro Whatman 40 y posteriormente desecados en una estufa a 55°C durante 72 horas, tiempo en el cual se obtuvo un peso constante. En cada tipo de cultivo se procedió de la siguiente manera:

A) FOTÓTROFOS CULTIVADOS EN MEDIO SÓLIDO

El crecimiento algal fue removido cuidadosamente del medio sólido (evitando despedazar el agar) con una lámina de plástico flexible y se depositó en un papel filtro de peso seco conocido para posteriormente transferirlo a la estufa de secado y finalmente se midió la masa seca en una balanza analítica.

B) FOTÓTROFOS CULTIVADOS EN MEDIO LÍQUIDO

El cultivo en medio líquido fue traspasado a través del papel filtro de peso seco conocido que retenía a los fotótrofos para después dejarlo en la estufa de secado y finalmente medir la masa seca mediante una balanza analítica.

Considerando la idea inicial del proyecto, la cual consiste en utilizar algas que crecen en condiciones subaéreas, y con el objetivo de reproducir parcialmente el sustrato, únicamente se trabajó con fotótrofos cultivados en medio sólido ya que el cultivo en medios líquidos se empleó solamente para asegurar la obtención de cultivos.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para determinar si existían diferencias en la captura de carbono entre las especies y las dos concentraciones de CO₂, se realizó un ANOVA. En el caso de existir diferencias, se aplicó la prueba de Duncan. Para ello se utilizó el programa informático Statgraphics 16.1.

RESULTADOS

ORGANISMOS ENCONTRADOS

En las muestras recolectadas se encontraron organismos autótrofos y heterótrofos: dentro de los primeros hubo cianobacterias y algas eucariontes (Tabla 2); también se detectó la presencia de bacterias, hongos, protozoarios y diversos tipos de helmintos y anélidos. Las características del sustrato, color de la colonia, sitio de recolección, orientación de la colonia e iluminación, así como

la referencia de la fotografía de cada sitio de muestreo se indican en la Tabla 1 y en la Figura 8 se presentan las imágenes de los sitios de recolección indicados en dicha Tabla.

Tabla 2. Organismos encontrados en los sitios de recolección. Los rectángulos de colores corresponden a: Cianobacterias *Pseudanabaena* sp., Nostocales, *Anabaena* sp., cianobacterias unicelulares; Clorofitas *Klebsormidium* sp., *Chlorococcum* sp.

Muestra	Referencia fotográfica del lugar de recolección	Organismos encontrados y trabajados
001	R01	
002	R02	
003	R03	
004	R04	
005	R04	
006	R05	
007	R06	
008	R07	
009	R08	
010	R09	
011	R10	
012	R11	
013	R12	
014	R13	
015	R14	
016	R14	
017	R15	
018	R16	
019	R17	
020	R18	
021	R19	
022	R20	

CIANOBACTERIAS

Se encontraron cianobacterias filamentosas pertenecientes al orden Oscillatoriales en suelo de mosaico expuesto al sol (Figura 12). Representantes

de los órdenes Chroococcales o Pleurocapsales y Nostocales se encontraron en goteras de techo, posiblemente del género *Anabaena* y *Nostoc* (Figura 13). Dentro de las Oscillatoriales se encontraron organismos de células cortas y de células alargadas y de diferentes tamaños (Figura 12). También se encontraron cianobacterias unicelulares pero que no pudieron ser aisladas ni identificadas (Figura 13). Los cultivos de Nostocales se perdieron debido a que no se hidrataron a tiempo y no soportaron la desecación dentro de la caja de Petri.

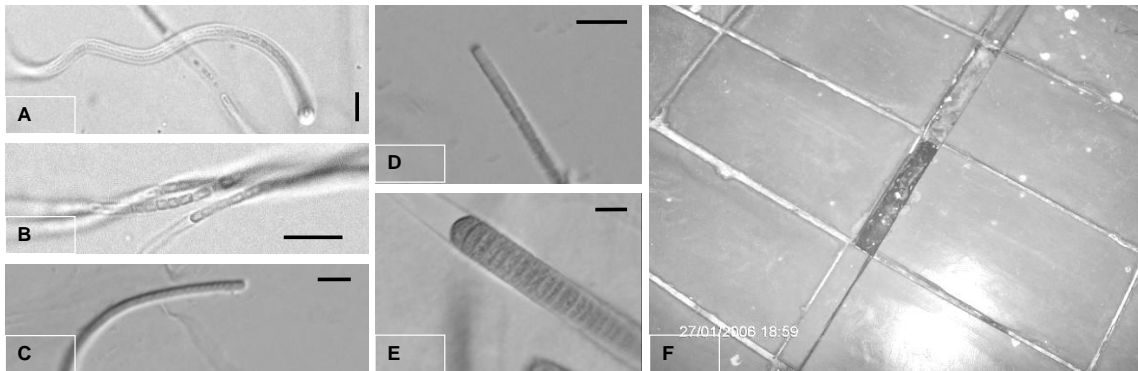


Figura 12. A: Microfotografías (800x) de especies de *Pseudanabaena*; B: ampliación de la figura anterior (barra = 6 μm); C y D: diferentes especies encontradas del orden Oscillatoriales (barra = 7 μm); E: posiblemente un miembro del género *Lyngbya* (barra = 7 μm). F: grieta de un piso de mosaico expuesto al sol, donde se hizo la recolección de las cianoprocariotas anteriores.

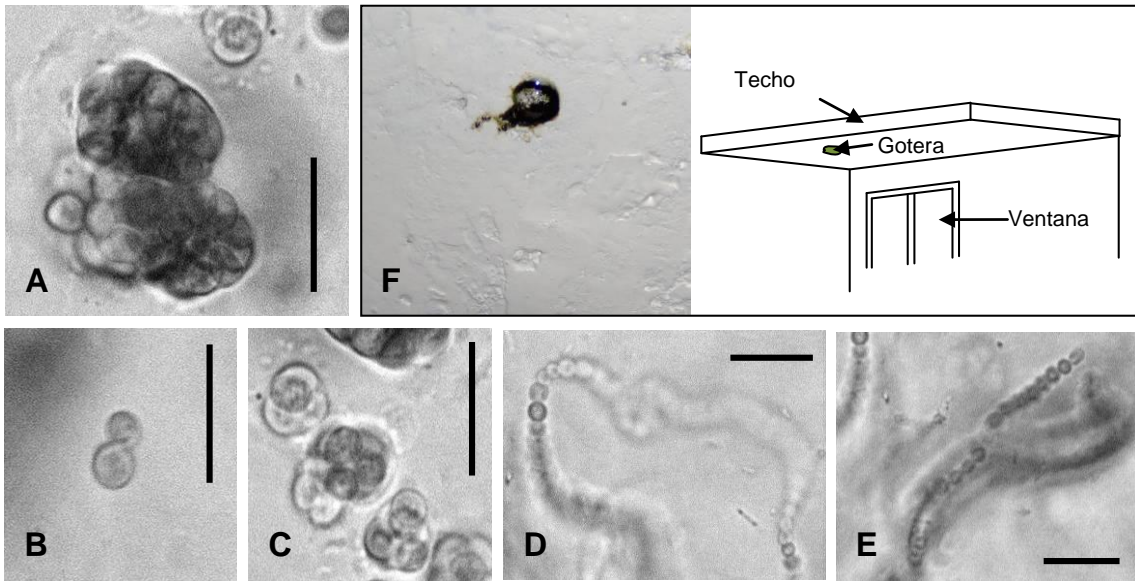


Figura 13. A, B, C: Microfotografías de cianobacterias unicelulares (orden Chroococcales o Pleurocapsales), D y E: cianobacterias filamentosas del orden Nostocales (posiblemente del género *Anabaena*) (800X). F: Fotografía y representación esquemática del lugar de recolección de ambas cianobacterias (gotera en un techo pintado, expuesto a la luz solar directa desde el amanecer hasta las 10:00 AM [horario de verano]). La barra mide 6 μm .

ALGAS

Se encontraron algas filamentosas y unicelulares en distintos sitios, principalmente clorofíceas. Se identificaron dos géneros de Chlorophyta: *Klebsormidium* sp. (Figuras 14, 15 y 16) que es un género cosmopolita, y *Chlorococcum* sp. (Figura 17) que es también un género muy distribuido a nivel global (Algae Base, 2004) de algas unicelulares.

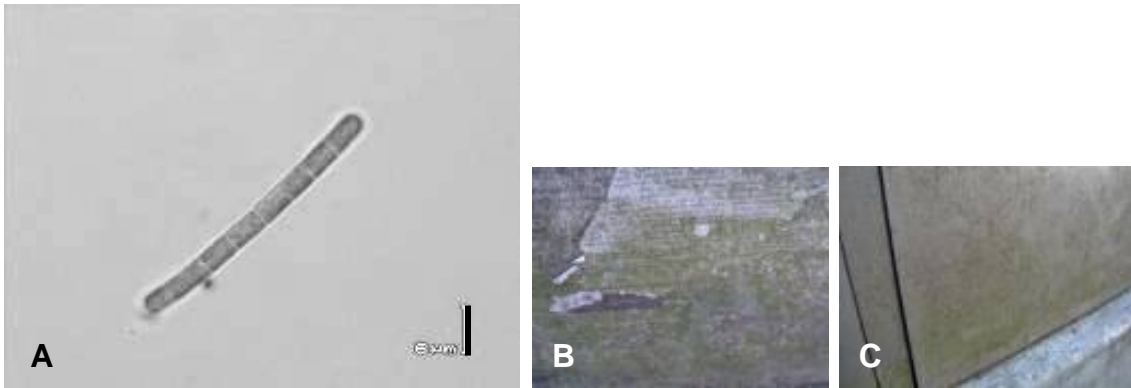


Figura 14. A: Microfotografía de *Klebsormidium* sp. (800X). La microfotografía procede de una muestra que se recolectó en un anuncio de papel viejo y terregoso pegado en una caja metálica perteneciente a una compañía de telecomunicaciones; B y C: lugar de recolección (caja telefónica en Colonia del Valle). La barra mide 6 µm.

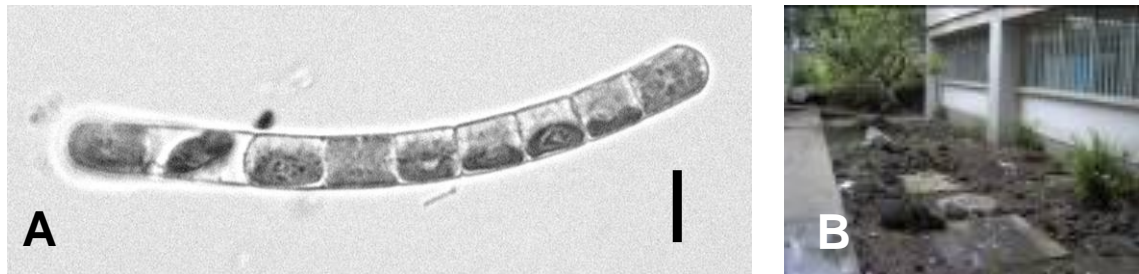


Figura 15. A: Microfotografía (800X) de *Klebsormidium* sp. que se obtuvo de una roca basáltica (B) en la Facultad de Ciencias en Ciudad Universitaria. La barra mide 7 µm.



Figura 16. A: Microfotografía (400X) de Clorofíceas no identificadas (probablemente del género *Klebsormidium*). La barra representa 40 µm.

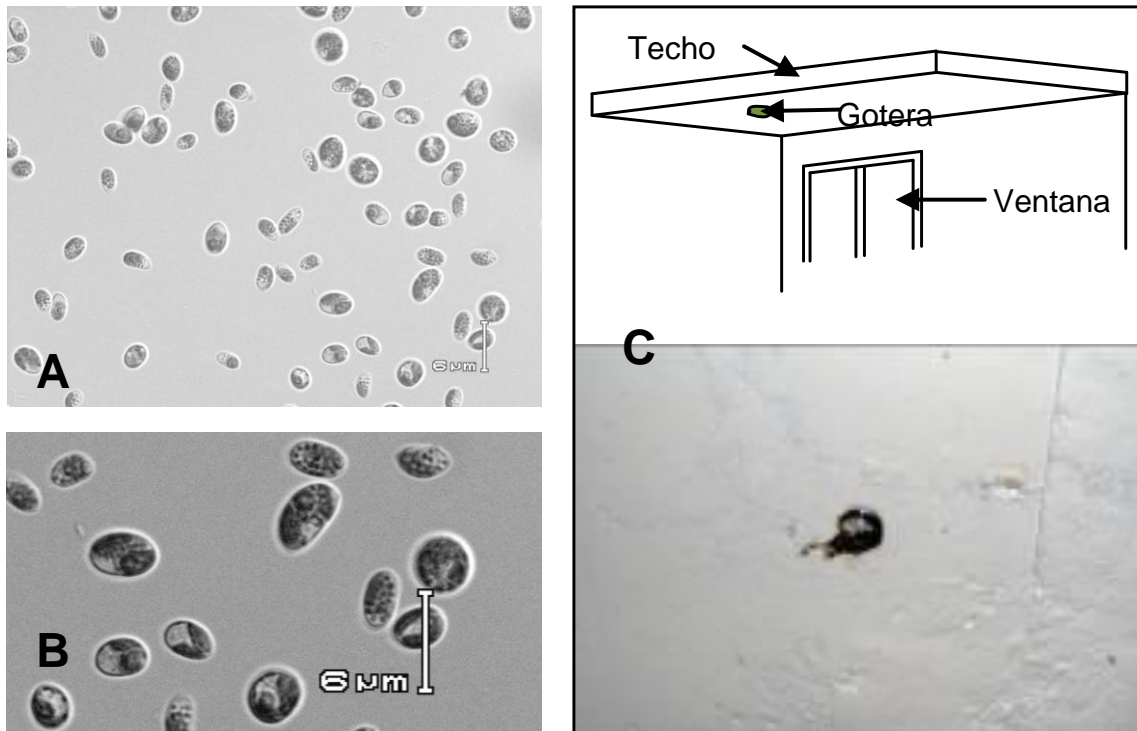


Figura 17. A: Microfotografía (800X) de *Chlorococcum* sp.; B: ampliación de A; C: representación esquemática y fotografía del lugar de recolección. Este género se aisló satisfactoriamente a partir de una comunidad que también contenía cianobacterias (Figura 13).

ORGANISMOS SELECCIONADOS PARA EL ESTUDIO

A pesar de que se encontraron varias especies de algas y cianobacterias, únicamente tres especies crecieron vigorosamente y con facilidad en los medios de cultivo utilizados (Figura 18): *Klebsormidium* sp., *Chlorococcum* sp. y *Pseudanabaena* sp., que son las que se sometieron a los tratamientos de CO₂.

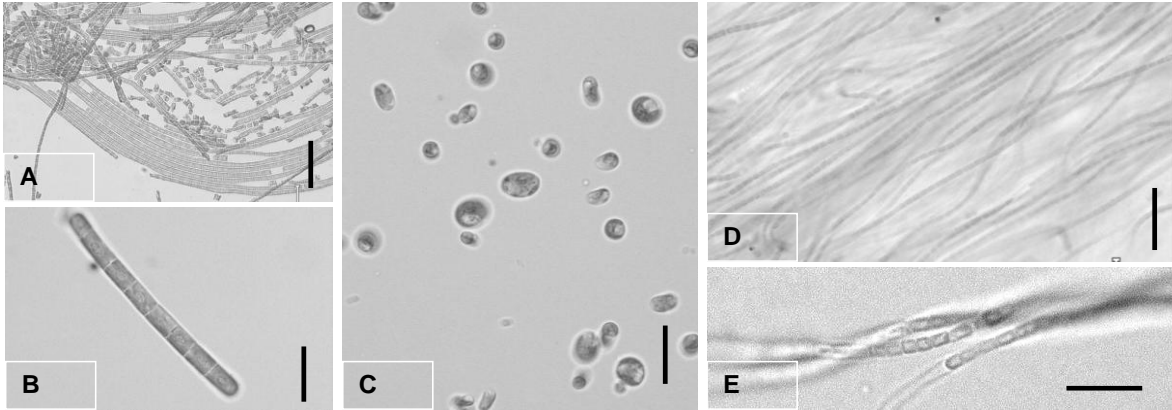


Figura 18. Microfotografías de los organismos estudiados. A y B: *Klebsormidium* sp. C: *Chlorococcum* sp. D y E: *Pseudanabaena* sp. (A y D, barra = 20 μm ; en B, C y E barra = 7 μm).

Klebsormidium sp. se encontró en 19 de las 20 muestras recolectadas procedentes de rocas, construcciones y árboles. Únicamente no se encontró en la muestra 006 procedente de una grieta con tierra mojada.

Pseudanabaena sp. fue aislada de muestras con alta concentración de humedad, en las dos muestras de tierra obtenidas, en una roca caliza húmeda, en una guarnición húmeda y en la gotera de un techo.

Chlorococcum sp. también fue encontrado en muestras donde el sustrato estaba mojado: en una roca caliza mojada, en una pared pintada mojada por una gotera, en un tanque de gas estacionario mojado y en la gotera de un techo.

CRECIMIENTO EN LOS MEDIOS DE CULTIVO

Todos los fotótrofos recolectados crecieron con mayor velocidad y más vigorosamente en el medio BBM que en el BG11. Aunque en el medio BBM los hongos también pueden proliferar con mayor facilidad en relación al medio BG11 si no se toman las precauciones adecuadas. Todos los organismos con los que se trabajó pudieron sobrevivir y reproducirse indistintamente en los dos tipos de medios de cultivo utilizados (sólidos y líquidos).

En la Figura 19 se observan cultivos en medio BBM líquido de *Chlorococcum* sp. y de *Klebsormidium* sp.

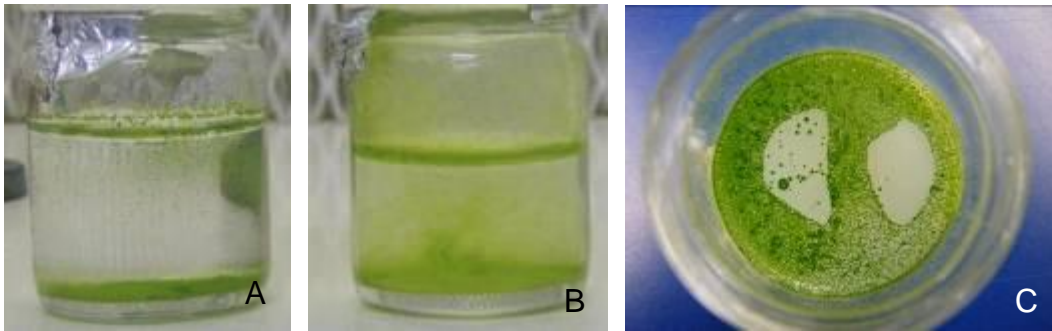


Figura 19. A: cultivo en medio BBM líquido de una especie de *Chlorococcum* sp. B cultivo en medio BBM líquido de *Klebsormidium* sp. C: Cultivo en medio BBM sólido de *Chlorococcum* sp.

Cabe mencionar que todos los cultivos soportaron cambios abruptos de temperatura (de 14° a 30° C) por fallas en la cámara en el ambiente controlado, lo cual demuestra que los organismos subaéreos pueden soportar cambios drásticos de temperatura, y posiblemente de humedad.

CAPTURA DE CO₂

En la Tabla 3 se presentan los valores de absorción de carbono en los 3 géneros, a las concentraciones de 368.8 y 400 ppm de CO₂.

Tabla 3. Captura de carbono (ppm) en las especies de estudio en las concentraciones de CO₂: atmosférica (AA: 368.8+/- 4.56 ppm) y con 400 ppm de CO₂. También se presenta el error experimental.

[CO ₂]	<i>Klebsormidium</i> sp,	<i>Chlorococcum</i> sp.	<i>Pseudanabaena</i> sp.
Aire atmosférico (~368 ppm CO ₂)	54.73 +/- 5.10 n=15	23.33 +/- 4.37 n=5	13.87 +/- 2.04 n=4
Aire con 400 ppm de CO ₂	60.10 +/- 5.3 n=15	21.88 +/- 3.20 n=5	14.85 +/- 1.21 n=4

La mayor captura de carbono la presentó *Klebsormidium* sp. en ambas concentraciones de CO₂ y *Pseudanabaena* sp. la menor. Tanto *Klebsormidium* sp como *Pseudanabaena* sp. tuvieron un incremento en la captación de carbono

a 400 ppm de CO₂, contrariamente a lo que ocurrió con la clorofita unicelular *Chlorococcum* sp., que tuvo una mayor captura en el aire atmosférico.

BIOMASA

Klebsormidium sp. fue la especie que produjo una mayor biomasa, seguido de *Chlorococcum* sp.; la cianobacteria *Pseudanabaena* sp. fue la que tuvo una producción menor (Figura 20). *Klebsormidium* sp. y *Chlorococcum* sp. se diferenciaron significativamente de *Pseudanabaena* sp. (F=6.62, p=0.0003).

Aunque no se realizó un estudio sobre el crecimiento de los organismos, se observó que *Klebsormidium* sp. creció a mayor velocidad durante los primeros 10 días en relación a las otras dos especies. Esta especie ocupó en 10 días cerca del 80% de la superficie de cultivo (19.6 cm²), y a los 20 días entre el 95 y 100% de la misma.

Biomasa acumulada

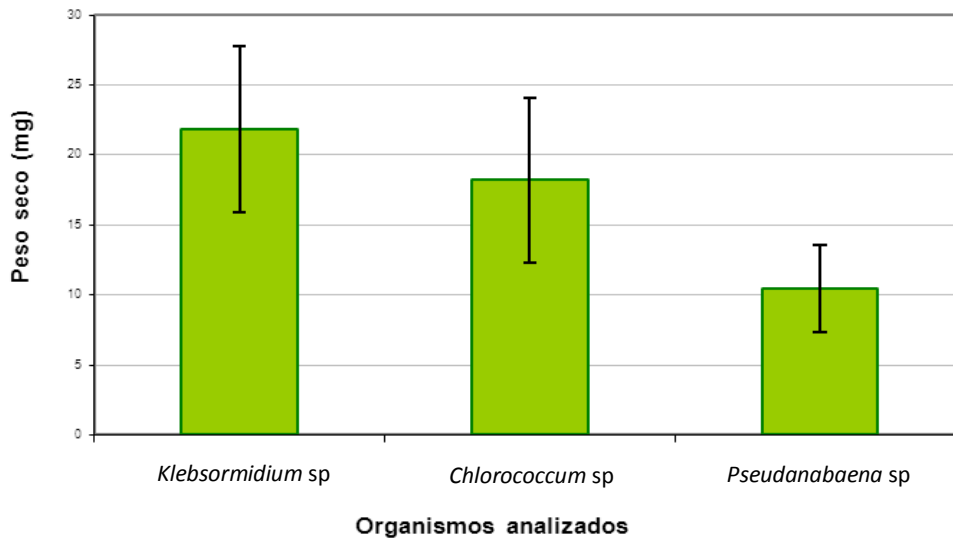


Figura 20. Acumulación de biomasa (peso seco, mg) a los 20 días de edad del cultivo. Los valores de n (repeticiones) son iguales a los de la Tabla 3.

Se observó en cada especie una relación directamente proporcional entre la biomasa y la captura de carbono, es decir, mientras más biomasa produjo el cultivo, más carbono capturó.

Pseudanabaena sp. fue el organismo más eficiente, es decir, que capturó más carbono por cada miligramo de biomasa. Sin embargo, al ser de más lento crecimiento la cantidad de carbono que puede capturar en el mismo tiempo es menor.

La captura de carbono en *Klebsormidium* sp. fue significativamente diferente en relación a las otras especies. Sin embargo, no fue significativa la diferencia de captura entre tratamientos en ninguna de las especies ($F=20.85$, $p<0.0001$).

Tabla 4. Captura de carbono (ppm) por miligramo de biomasa en los diferentes tratamientos (AA y aire con una concentración de 400 ppm de CO₂). Los valores de n (repeticiones) son iguales a los de la Tabla 3.

	<i>Klebsormidium</i> sp	<i>Chlorococcum</i> sp	<i>Pseudanabaena</i> sp
AA (368.8 ppm)	2.59 +/- 0.25	1.28 +/- 0.13	1.38 +/- 0.25
400 ppm	2.78 +/- 0.19	1.20 +/- 0.07	1.47 +/- 0.14

DISCUSIÓN

Durante mucho tiempo los ecosistemas naturales como océanos, bosques y selvas, han capturado gran parte del carbono producido por las actividades humanas, sin embargo, debido a que los ecosistemas están desapareciendo o están siendo gravemente alterados, se espera que esta captura disminuya, por lo que es necesario tomar medidas tanto para evitar la pérdida de ecosistemas como para reforzar los servicios ambientales que los sistemas naturales prestan, por ejemplo la captura de carbono. Por lo anterior, en este trabajo se propone utilizar, entre otros organismos como plantas, fotótrofos microscópicos

subaéreos para capturar carbono atmosférico, a reserva de analizar su papel ecosistémico y los posibles inconvenientes para el hombre y los demás organismos, debidos a la producción de alérgenos y toxinas (Rivera y Gómez, 2010).

En las zonas donde se realizó la recolección fueron más abundantes las clorofíceas, probablemente debido a las condiciones húmedas propias de la zona y época donde se hizo la recolección. La temperatura de los sustratos subaéreos es muy variable entre el día y la noche, por lo que es importante que los organismos utilizados puedan soportar sin problema la diferencia de temperatura que existe entre dichos períodos. Durante este trabajo se observó que los organismos estudiados pueden soportar cambios de al menos 16° C en la temperatura, por lo que pueden resultar muy útiles para el propósito planteado. Es probable que dichos organismos posean características morfofisiológicas para poder soportar las altas temperaturas que pueden alcanzar los sustratos subaéreos (rocas, construcciones, árboles, etc.) durante el día y, a la vez, poder soportar las bajas temperaturas que se registran durante la noche y la mañana.

En el trabajo de Kelly *et al.* (2005) se indica que para la captura del carbono atmosférico (~380 ppm) son más eficientes los sistemas biológicos. La capacidad de captura de carbono en *Klebsormidium* sp. y *Pseudanabaena* sp. fue ligeramente mayor a 400 ppm de CO₂, por lo que se espera que estos organismos sean viables para capturar el CO₂ atmosférico tanto en la actualidad como en el futuro, pues en el presente la concentración de CO₂ en la atmósfera es de 380 ppm en el hemisferio norte, y según las proyecciones del IPCC (Randall, 2007) esta concentración seguirá aumentando.

El hecho de que *Chlorococcum* sp. haya tenido una menor captura de CO₂ en una concentración de 400 ppm, implica que no forzosamente todos los organismos capturarán mayor carbono si la concentración de CO₂ atmosférico

aumenta, por lo que es importante escoger bien la especie adecuada y tomar en cuenta que no debe permitirse que la concentración de CO₂ siga en aumento. Esto puede deberse a los mecanismos biológicos propios del organismo, por ejemplo, que el sistema fotosintético se satura a una concentración de CO₂ en el aire menor a 400 ppm. Existen reportes en los que se menciona que esta especie es útil para captar carbono disuelto en agua en altas concentraciones (Satoh *et al.*, 2002; Sasaki *et al.*, 1998), por lo que se puede proponer que es mejor cultivar esta especie en medios líquidos para la captura de carbono.

Riebesell *et al.* (2007) sugieren que los océanos aumentarán su captura de carbono conforme la concentración de CO₂ atmosférico crezca, pues los organismos fotosintéticos tendrán más carbono a su disposición para la realización de este proceso, siempre y cuando otros factores como la intensidad lumínica y temperatura no lo afecten. Esta posibilidad podría, en principio, no ser adecuada, al implicar trastornos en los océanos (Arrigo, 2007) y en el planeta como daños a la biodiversidad y alteraciones en los ciclos biogeoquímicos, pues los fotótrofos aumentarían su biomasa y por tanto la cantidad de materia orgánica en los mares. Además, no debemos considerar la hipótesis de estos autores como verdadera, pues se conoce que un aumento en la concentración de CO₂ atmosférico puede acidificar los océanos, por lo que el proceso de fotosíntesis de las cianobacterias podría disminuirse, ya que éstas crecen mejor en ambientes básicos (Fuenmayor *et al.*, 2009; Reddy, 1984). En los dos casos mencionados en este párrafo, las consecuencias son poco alentadoras, por lo que se sugiere que es necesario disminuir la cantidad de CO₂ presente en la atmósfera.

Dentro de los sistemas biológicos, Schenk *et al.* (2008) describen que las algas son los organismos más eficientes en términos de energía producida por unidad de área de cultivo, siendo hasta cientos de veces más eficientes que muchas plantas superiores como el algodón (*Gossypium* sp.), la soya (*Glycine max*), el girasol (*Helianthus* sp.) y la colza (*Brassica* sp.) (Apéndice I), por lo que debe

tomarse muy en cuenta a este grupo de organismos para capturar el exceso de CO₂ que se ha enviado a la atmósfera por las actividades antropogénicas.

Los resultados obtenidos no pueden ser comparados con otras algas subaéreas debido a que no se encontró esta información. Sin embargo, Zou *et al.* (2011) reportaron que una feofíceas marina puede captar mayor carbono al aumentar la concentración de este gas.

La especie de *Klebsormidium* estudiada está muy distribuida en la zona sur de la cuenca de México, al encontrarse en 19 de los 20 sitios de recolección, por lo que en caso de utilizarse para su cultivo, se estaría trabajando con un organismo ya de por sí, ampliamente distribuido en la región.

Klebsormidium sp. es una clorofíceas filamentosa que se desarrolla semejando el crecimiento de una enredadera (Figura 21), mientras que *Chlorococcum* sp. al dividirse constituye colonias en forma de una protuberancia (Figura 21). *Pseudanabaena* sp. también es un organismo filamentoso y presenta un crecimiento semejante al de *Klebsormidium*, sin embargo produce menos biomasa y captura una menor cantidad de CO₂ atmosférico.

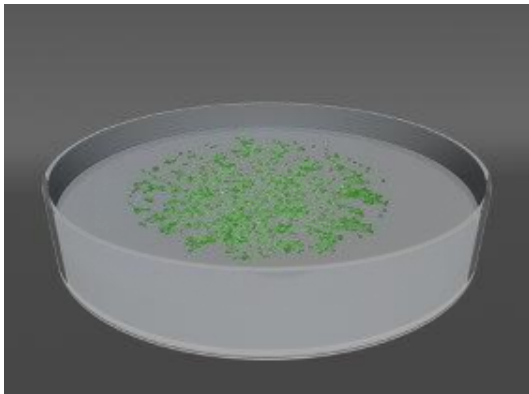


Figura 21. Representación esquemática del crecimiento de un cultivo de *Klebsormidium* sp. que asemeja una enredadera por tratarse de una clorofíceas filamentosa

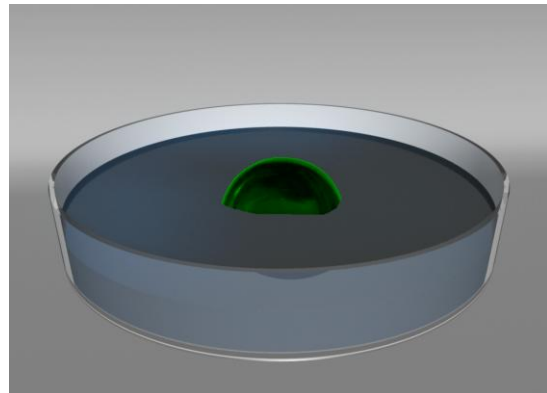


Figura 22. Representación esquemática del crecimiento de *Chlorococcum* sp. La colonia formada tiene forma de protuberancia.

El modo de crecimiento de *Klebsormidium* sp. resulta crucial para la eficiencia fotosintética, pues cubre un área extensa permitiendo que el fotótrofo aproveche mejor la luz. *Chlorococcum* sp. forma colonias voluminosas debido al apilamiento de las células nuevas.

Es probable que los organismos unicelulares sean más apropiados para capturar carbono en ambientes acuáticos tal como lo ha estado desarrollado Greenfuel Technologies Corporation (2005), mientras que los filamentosos (por ejemplo *Klebsormidium* sp.) lo sean para cultivarse en superficies como techos y paredes.

Según Isichei (1990) los proyectos que involucren el cultivo de algas son viables en países como México debido a que varias de sus regiones reciben fuerte irradiación solar durante todo el año, por lo que en nuestro país debe impulsarse la investigación y desarrollo de proyectos que involucren a este tipo de organismos. Los fotótrofos subaéreos pueden ser de gran utilidad para capturar carbono tanto en los climas templados como en las regiones tropicales de nuestro país, por lo que es conveniente mencionar que este tipo de trabajo puede ser de gran importancia para todo el territorio nacional y para los países tropicales y subtropicales.

Debe considerarse que los organismos se trabajaron en condiciones de laboratorio, y que los resultados probablemente difieran en condiciones naturales, donde se esperaría que los valores de captura de carbono sean aún mayores ya que no están aislados.

CONCLUSIONES

1. Se encontraron varias especies de algas y cianobacterias, en los distintos sitios muestreados tanto unicelulares como filamentosas.
2. Las que crecieron mejor en los medios de cultivo sólidos y se pudieron identificar fueron dos géneros de algas (*Klebsormidium* y *Chlorococcum*)

- y una especie de cianobacteria del género *Pseudanabaena*.
3. *Klebsormidium* sp. creció más y a mayor velocidad que las otras especies.
 4. *Klebsormidium* sp. fue el organismo que se reprodujo más rápidamente y supera por mucho a las otras dos especies en cuanto a producción de biomasa y captura de carbono.
 5. Debido a su forma de crecimiento, *Klebsormidium* sp. es un alga que se desarrolla bien en medios sólidos expuestos al aire. En condiciones de laboratorio cubrió en 20 días 19 cm² a partir de la siembra de un punto de aproximadamente 1 mm², y fue la especie que tuvo mayor captura de CO₂ atmosférico. Por las características anteriores, además de ser un género ampliamente distribuido a nivel mundial, puede resultar útil para capturar carbono de manera complementaria a otros proyectos, aprovechando aquellas superficies no utilizadas que se encuentran en las ciudades, por ejemplo paredes, azoteas, banquetas, postes, etc.

A reserva de que se realicen más investigaciones, los resultados de este trabajo permiten dar un esbozo para el planteamiento de un proyecto para capturar carbono atmosférico dentro de las ciudades (ver Perspectivas), de tal forma que se complementen otros proyectos y se puedan lograr los propósitos en relación a la reducción de las emisiones de carbono a los niveles que diversas ciudades y países han acordado. Además de que los fotótrofos pueden ayudar a capturar CO₂ atmosférico, también pueden ser útiles para capturar otros contaminantes.

Para futuros experimentos, es conveniente conocer la captura de carbono de las diferentes especies a lo largo del día en función de la temperatura, la luminosidad y la humedad. Además de la captura de carbono, también es conveniente medir las variables mencionadas durante 24 horas y tomar fotografías a lo largo del día para documentar la velocidad de crecimiento del

cultivo (área). También se sugiere hacer el estudio con concentraciones de CO₂ mayores a 400 ppm, por ejemplo 420, 450 y 500 ppm.

PERSPECTIVAS

La información aportada en este trabajo puede ser útil para realizar un megaproyecto para capturar el carbono atmosférico en las ciudades por medio de algas subaéreas, en conjunto con otros organismos, como las plantas utilizadas en azoteas verdes. Se propone crear un programa que ayude a consolidar ciudades más verdes y con un aire más limpio. Además, puede contribuir con la generación de empleos.

PROPUESTA DE PROYECTO PARA CAPTURAR CARBONO CON ALGAS SUBAÉREAS

CAPTURA DE CARBONO EN LAS CIUDADES

A continuación se plantean las bases para la creación de un proyecto con el objeto de aumentar por medios biológicos la captura de CO₂ en las ciudades. Este proyecto debe involucrar un sinnúmero de especialistas como urbanistas, constructores, ingenieros, arquitectos, botánicos, fisiólogos, ecólogos, etc.

Es necesario capturar el exceso de CO₂ que las actividades del hombre han enviado a la atmósfera. En las ciudades es posible capturar el carbono directamente en las fuentes emisoras como fábricas, centrales eléctricas, etc., pero también es viable capturar el carbono que se encuentra disuelto en el aire. Los medios más eficientes para capturar el CO₂ del aire cuya concentración aproximada es de 380 ppm son aquellos que aprovechan sistemas biológicos como plantas y algas, por lo que en cada ciudad deben desarrollarse programas para capturar carbono atmosférico mediante la plantación de árboles, la naturación de construcciones, así como el cultivo de fotótrofos subaéreos microscópicos.

CULTIVO DE FOTÓTROFOS SUBAÉREOS MICROSCÓPICOS

En las ciudades existe mucho espacio que puede ser aprovechado para cultivar fotótrofos microscópicos que ayuden a capturar CO₂. Estos espacios se encuentran en las superficies de las construcciones como paredes y fachadas. Considerando que *Klebsormidium* sp. y *Chlorococcum* sp. son organismos cosmopolitas pueden tomarse en cuenta para proyectos en todas aquellas ciudades donde estas especies se desarrollan naturalmente.

Tomando en cuenta los resultados de este trabajo, se plantea cultivar algas del género *Klebsormidium* en las superficies de construcciones donde la iluminación sea adecuada, por ejemplo paredes y fachadas de construcciones.

Para desarrollar un proyecto de esta naturaleza es necesario resolver algunos aspectos, por ejemplo:

- Saber cómo evitar el biodeterioro que los fotótrofos pueden ocasionar a las construcciones.
- Cómo inocular y cuidar los cultivos de los fotótrofos.
- En qué momento y de qué manera se recolectan los fotótrofos.
- Saber cómo evitar que los cultivos sean contaminados por hongos.
- Determinar el tipo de superficie ideal para los cultivos (vidrio, pintura, metal, etc.) y la forma de aportar nutrientes al cultivo.
- Conocer el nivel de toxicidad de estos organismos para otros seres vivos, incluyendo el hombre.

El mantenimiento de un proyecto como el que aquí se plantea conllevaría a la generación de empleos: desde los especialistas hasta los *jardineros* y demás trabajadores encargados de mantener en buen estado a los cultivos de fotótrofos.

REFERENCIAS

- Aizawa K. y S. Miyachi. 1986. Carbonic anhydrase and CO₂ concentrating mechanisms in microalgae and cyanobacteria. *FEMS Microbiology Reviews* 39: 215-233
- Alley R. B., J. Marotzke, W. D. Nordhaus, J. T. Overpeck D. M. Peteet, R. A. Pielke Jr., R. T. Pierrehumbert, P. B. Rhines, T. F. Stocker, L. D. Talley y J. M. Wallace. 2003. Abrupt Climate Change. *Science* 299:2005-2010
- Andersen R. A. 1992. Diversity of eukaryotic algae. *Biodiversity Conserv.* 1(4):267-292
- Andersen R. A. (Ed). 2005. Algal Culturing Techniques. Elsevier Academic Press. Ámsterdam. 578 pp.
- Arellano L. E., J. Reyes y M. Collazo-Ortega. 2010 a. Capacidad de retención de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados de la lluvia en una azotea verde extensiva. Congreso Mundial de Azoteas Verdes. 7 al 9 de octubre. Hotel Hilton. Distrito Federal. México.
- Arellano L. E., J. Reyes y M. Collazo-Ortega. 2010 b. Retención de hidrocarburos en azoteas verdes extensivas. Una estrategia de mitigación de la contaminación urbana. XVIII Congreso Mexicano de Botánica. 21 al 27 de noviembre. Guadalajara. Jalisco.
- Arrigo K. R. 2007. Marine manipulations. *Nature* 450:491
- Beach S. K. y C. S. Smith. 1996a. Ecophysiology of tropical Rhodophytes. I Microscale acclimation in pigmentation. *J. Phycol* 32(5):701-710
- Beach S. K. y C. S. Smith. 1996b. Ecophysiology of tropical Rhodophytes. II Microscale acclimation in photosynthesis. *J. Phycol* 32(5):710-718

Benson S., P. Cook, J. Anderson, S. Bachu, H. B. Nimir, B. Basu, J. Bradshaw, G. Deguchi, J. Gale, G. von Goerne, W. Heidug, S. Holloway, R. Kamal, D. Keith, P. Lloyd, P. Rocha, B. Senior, J. Thomson, T. Torp, T. Wildenborg, M. Wilson, F. Zarlenga y D. Zhou. 2005. Underground geological storage. En: Metz B., O. Davidson, H. de Conick, M. Loos y L. Meyer (Eds.). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide and Storage*. Cambridge University Press. Cambridge. p: 195-276

Boden, T. A. G. Marland, y R.J. Andres. 2011. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

Bourrelly P. 1972. Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome I: Les Algues Vertes. Éditions N. Boubée & Cie. Paris. 572 pp.

Brock, T. 1973. Evolutionary and ecological aspects of the cyanophytes. En: Carr N. y B. Whitton (Eds.). *The biology of blue-green algae*. University of California Press. Berkeley. p: 487-500

Brook B. W., N. Rowley y T. F. Flannery. 2007. Kyoto: doing our best is no longer enough. *Nature* 450:478

Caldeira K., M. Akai, P. Brewer, B. Chen, P. Haugan, T. Iwama, P. Johnston, H. Kheshgi, Q. Li, T. Ohsumi, H. Pörtner, C. Sabine, Y. Shirayama y J. Thomson. 2005. Ocean Storage. En: Metz B., O. Davidson, H. de Conick, M. Loos y L. Meyer (Eds.). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide and Storage*. Cambridge University Press. Cambridge. p: 277-318

CAM (Comisión Ambiental Metropolitana), SEGEM (Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México), SMA GDF (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal), SEMARNAT (Secretaría del

Medio Ambiente y Recursos Naturales) y SSA (Secretaría de Salud y Asistencia). 2003. Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. México DF

Canadell J. G., C. Le Quéré, M. R. Raupach, C. B. Field, E. T. Buitenhuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton y G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104(47):18866-18870

Cañizares-Villanueva R. 2000. Bioabsorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42: 141-132

Coleman J. R y B. Colman. 1981. Photosynthetic carbon assimilation in the bluegreen alga *Coccochloris penicocystis*. *Plant, Cell and Environment* 4:285-290

Convention on Biological Diversity, 2010. Página en red: <http://www.cbd.int>

Copertino M., A. Cheshire y T. Kildea. 2009. Photophysiology of a tuf algal community: integrated responses to ambient light and standing biomass. *J. Phycol.* 45(2):324-336

Cowan R. M., J. –J. GE, Y. –J. Qin, M. L. McGregor y M. C. Trachtenberg. 2003. CO₂ Capture by Means of an Enzyme-Based Reactor. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 984:453-469

Crispim C. A., C. C. Gaylarde y P. M. Gaylarde. 2004. Biofilms on church walls in Porto Alegre, RS, Brazil, with special attention to cyanobacteria. *Int. Biodeter. Biodegr.* 54: 121-124

Danielo O. 2005. Un carburant á base d'huile d'algue. *Biofutur* 255: 33-37

Del Valle-Cárdenas B. 2007. Políticas de Cambio Climático de la Ciudad de México. Página en red: http://www.sma.df.gob.mx/cclimatico/descargas/publicaciones/06_politicas_cc_ciudad_mexico.pdf. Consultada en octubre de 2007.

EAUE (European Academy of the Urban Environment). 1997. Madrid: Improving ecological urban development by naturation of large building surfaces. Página en red: <http://www.eaue.de/winuwd/97.htm>. Consultada en octubre de 2007.

Estrada S. O., G. González-Sánchez, J. Reyes-Santiago y M. Collazo-Ortega. 2010 a. Capacidad de captura de carbono y crecimiento de especies utilizadas en azoteas verdes extensivas. Congreso Mundial de Azoteas Verdes. 7 al 9 de octubre. Hotel Hilton, Distrito Federal. México.

Estrada S. O., G. González-Sánchez, J. Reyes-Santiago y M. Collazo-Ortega. 2010 b. Beneficios ecosistémicos de especies en azoteas verdes. Una estrategia de mitigación de la contaminación urbana. XVIII Congreso Mexicano de Botánica. 21 al 27 de noviembre. Guadalajara. Jalisco.

Ettl H. y G. Gärtner. 1988. Chlorophyta II. En: Ettl H., J. Gerloff, H. Heynig y D. Mollenhauer. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 426 pp.

Field, C. B., M. J. Behrenfeld, J. T. Randerson y P. Falkowski. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*. 281:237-240

Florencio F. J. Las cianobacterias y su percepción del medio. Adaptación a la fuente de nitrógeno, cambios redox y metales pesados. 2009. En: Dorado P. G., J. V. Jarrín, M. Tena y E. Fernández (Eds.) Biotecnología. III Jornadas de Divulgación de la Investigación en Biología Molecular, Celular

y Biotecnología. Capítulo 2. Universidad de Córdoba. Córdoba.p:6-9

- Fogg, G. E. 1956. The Comparative Physiology and Biochemistry of the Blue--Green Algae. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 20: 148 – 165
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz y R. Van Dorland. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. En: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (Eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. Cambridge. p: 129-234
- Friedmann S. J. 2007. Geological Carbon Dioxide Sequestration. *Elements* 3(3):179-184
- Fuenmayor G., L. Jonte, N. Rosales-Loaiza y E. Morales. 2009. Crecimiento de la cianobacteria marina *Oscillatoria* sp. MOF-06 en relación al pH en cultivos discontinuos. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*. 29:21-25
- Ettl H. y G. Gärtner. 1995. *Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen*. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart.
- García E. 1968. Los climas del Valle de México. Colegio de Postgraduados. México. 59 pp.
- Gaylarde P. M. y C. C. Gaylarde. 2000. Algae and cyanobacteria on painted buildings in Latin America. *Int. Biodeter. Biodegr.* 46: 93-97
- Giordano M., J. Beardall y J. A. Raven. 2005. CO₂ concentrating mechanisms in Algae: mechanisms, environmental modulations, and evolution. *Annu. Ev. Plant Biol.* 56:99-131

- Greenfuel Technologies Corporation. 2005. Greenfuel CEO to give technology briefing on 'emissions-to-biofuels' process. Página en red: http://www.greenfuelonline.com/gf_files/GFTCUSEA.pdf. Consultada en marzo de 2007.
- González J. 1987. Las algas de México. Ciencias. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. p: 16-25
- Gray D. W., L. A. Lewis y Z- G-Cardon. 2007. Photosynthetic recovery following dessication of desert green algae (Chlorophyta) and their relatives. *Plant, Cell and Environment* 30:1240-1255
- Grossman A. R., D. Bhaya y Q. He. 2001. Tracking the Light Environment by Cyanobacteria and the Dynamic Nature of Light Harvesting. *J. Biol. Chem.* 276:11449-11452
- Häder D-P y F.L. Figueroa. 1997. Photoecophysiology of marine macroalgae. *Photochemistry and Photobiology* 66(1):1-14
- Herrero A. y E. Flores. 2008. The Cianobacteria: molecular biology, genomics and evolution. Caister Academic Press. Norkfold. U.K. 484 pp
- Herrero A., A. M. Muro-Pastor y E. Flores. 2001. Nitrogen Control in Cyanobacteria. *J. Bacteriol.* 183(2):411-425
- Herskovitz N., A. Oren y Y. Cohen. 1991. Accumulation of Trehalose and Sucrose in Cyanobacteria Exposed to Matric Water Stress. *Appl. Environ. Microbiol.* 57(3):645-648
- Hightower M. y Suzanne A. Pierce. 2008. The energy challenge. *Nature* 452:285-286
- Hoek C., D. Mann y H. Jahns. 1995. Algae: an introduction to phycology. Cambridge University Press. Nueva York. p: 16-41

- Hopkins W. G. y N. P. A. Hüner. 2004. Introduction to Plant Physiology. 3ra Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA. 560 pp
- Isichei A. 1990. The role of algae and cyanobacteria in arid lands. A review. *Arid Land Res Manag.* 4(1):1-17
- INEGI. 2005. II Contenido de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F.
- INEGI. 2010. Indicadores de demografía y población. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Página en red: <http://www.inegi.gob.mx>
- Jáuregui E. 2000. El clima de la Ciudad de México. Instituto de geografía y Plaza y Valdés S. A. de C. V. México, D. F. 131 pp.
- Jenkins M. 2003. Prospects for Biodiversity. *Science* 302:1175-1177
- John D. M., B. A. Whitton y A.J. Brook (Eds). 2003. The Freshwater Algal Flora of the British Isles: An Identification Guide to Freshwater and Terrestrial Algae. Cambridge University Press. Cambridge. p: 21-22
- Karl T. R. y K. E. Trenberth. 2003. Modern Global Climate Change. *Science* 302:1719-1723
- Kelly Thambiumuthu, M. Soltanieh, J. C. Abanades, R. Allam, O. Bolland, J. Davison, P. Feron, F. Goede, A. Herrera, M. Iijima, D. Jansen, I. Leites, P. Mathieu, E. Rubin, D. Simbeck, K. Warmuzinski, M. Wilkinson y R. Williams. 2005. Capture of CO₂. En: Metz B., O. Davidson, H. de Conick, M. Loos y L. Meyer (Eds.). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide and Storage*. Cambridge University Press. Cambridge. p: 105-178
- Kirst G. O. y C, Wienke. 1995. Ecophysiology of polar algae, *J. Phycol.* 31:181-199

- Lawlor D. W. 2001. Photosynthesis. 3ra ed. Springer-Verlag. Nueva York. 396 pp
- Lüttge U., B. Büdel, E. Ball, F. Strube y P. Weber. 1995. Photosynthesis of terrestrial cyanobacteria under light and desiccation stress as expressed by chlorophyll fluorescence and gas exchange. *J. Exp. Bot.* 46(3): 309-319
- Marland G., T.A. Boden, R. J. Andres, A. L. Brenkert y C. A. Johnson. 2003. Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions : Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Mazzotti M., J. C. Abanades, R. Allam, K. S. Lackner, F. Meunier, E. Rubin, J. C. Sanchez, K. Yogo y R. Zevenhoven. 2005. Mineral carbonation and industrial use of carbon dioxide. En: Metz B., O. Davidson, H. de Conick, M. Loos y L. Meyer (Eds.). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide and Storage*. Cambridge University Press. Cambridge. p: 319-338
- Moroney J. V. y R. A Ynalvez. 2009. Algal Photosynthesis. En: Enciclopedia of Life Sciences (ELS). John Wiley and Sons, LTD. Chichester.
- Myers N. 1996. Environmental services of biodiversity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 93: 2764-2769
- Nelson N. y A. Ben-Shem. 2004. The complex architecture of oxygenic photosynthesis. *Nat. Rev. Mol. Cell Bio.* 5:1-12
- Nelson D. L. y M. M. Cox. 2008. Lehninger, Principles of biochemistry. W. H. Freeman and Co. Nueva York. P: 773-804
- Noguerol-Seoane A. y A. Rifon-Lastra. 2000. Estudio de la ficoflora epilítica de las paredes graníticas exteriores de la iglesia románica de Sta María de Fisterra (A Coruña, N.O. España). *Portugaliae Acta Biol.* 19:91-96

Oke T. 1993. Global change and urban climates. En: Libro de resúmenes del XIII Congreso Internacional sobre Biometeorología, del 12 al 18 de septiembre de 1993, Calgary, Canadá. p:123-134

Organización de las Naciones Unidas. 1998. Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1998. Página en red: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Peinador M. 1999. Las cianobacterias como indicadores de contaminación orgánica. Rev. Biol. Trop. 47:381-391

Algae Base. 2004. Página en red: http://www.algaebase.org/search/genus/detail?genus_id=37477.

Consultada en noviembre de 2007.

Qubit systems. 1999. CO₂ Analysis Package – Logger Pro Version: Instructor's Manual. Qubit Systems, Inc. Canada. 32 pp

Rai L. C., G. P. Gaur y H. D. Kumar. 1981. Phycology and heavy-metal pollution. Biol. Rev. 56:99-151

Randall, D. A., R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi y K.E. Taylor. 2007. Climate Models and Their Evaluation. En: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (Eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. p:589-662

Reddy P. 1984. Influence of pH on sporulation, spore germination and germling survival in blue-green algae. Acta Hydrochim Hydrobiol. 12(4): 411-417

Rhodes J. S. y D. W. Keight. 2005. Engineering economic analysis of biomass

IGCC with carbon capture and storage. *Biomass and Bioenergy* 29:440-450

Riebesell U., K. G. Schulz, R. G. J. Bellerby, M. Botros, P. Fritsche, M. Meyerhöfer, C. Neill, G. Nondal, A. Oschlies, J. Wohlers y E. Zöllner. 2007. Enhanced biological carbon consumption in a high CO₂ ocean. *Nature* 450:545-548

Rivera G. M. Y L. Gómez. 2010. Identificación de cianobacterias potencialmente productoras de cianotoxinas en la Curva de Salguero del Río Cesar. *Revista Luna Azul*. 31:17-25

Robledo D. 1997. Las algas y la biodiversidad. *CONABIO: Biodiversitas*. 13:2-4

Rodés-García R. y M. Collazo-Ortega. 2006. Manual de prácticas de fotosíntesis. Facultad de Ciencias, UNAM. México, D. F. 160 pp.

Sasaki T., N. Kurano y S. Miyachi. 1998. Induction of Ferric Reductase Activity and of Iron Uptake Capacity in *Chlorococcum littorale* Cells under Extremely High-CO₂ and Iron-Deficient Conditions. *Plant Cell Physiol.* 39(4):405-410

Satoh A., N. Kurano, H. Senger y S. Miyachi. 2002. Regulation of Energy Balance in Response to Changes in CO₂ Concentrations and Light Intensities during Growth in Extremely-High-CO₂-Tolerante Green Microalgae. *Plant Cell Physiol.* 43(4):440-451

Schenk, P., S. R. Thomas-Hall, E. Stephens, U. C. Marx, J. H. Mussgnug, C. Posten, O. Kruse y B. Hankamer. 2008. *Bioenerg. Res.* 1:20-43

Schrag D. P. 2007. Confronting the Climate-Energy Challenge. *Science* 3(3):171-178

Scholze M. 2003. Modelling terrestrial vegetation dynamics and carbon cycling for an abrupt climate change event. *The Holocene* 13(3):327-333.

- Schuster U. y A. J. Watson. 2007. A variable and decreasing sink for atmospheric CO₂ in the North Atlantic. *J. Geophys. Res.* 112:1-10
- Seibel B. A. y P. J. Walsh. 2001. Potential Impacts of CO₂ Injection on Deep-Sea Biota. *Science* 294:319-320
- Silver S. 1996. BACTERIAL HEAVY METAL RESISTANCE: New Surprises. *Annu. Rev. Microbiol.* 50: 753-789
- Skinner C. 1932. Isolation in pure culture of green algae from soil by a simple technique. *Plant Physiol.* 7:533-537
- Stainer R.Y. 1977. The position of the Cyanobacteria in the world of phototrophs. *Carlsberg Res. Comm.* 42: 77-98
- Stainer R. Y. y G. Cohe-Bazire. 1977. Phototrophic Prokaryotes: The Cyanobacteria. *Ann. Rev. Microbiol.* 31:225-274
- Stewart C. y M.A. Hessami. 2005. A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration – the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach. *Energy Conversión and Management* 46:403-420
- Taiz L. y Zeiger E. 2010. *Plant Physiology*. 5^a Ed. Sinaeur Associates, Inc. Sunderland, Massachusetss. U.S.A. 782 pp
- Tomitani A., A. H. Knoll, C. M. Cavanaugh y T. Ohno. 2006. The evolutionary diversification of cyanobacteria: Molecular–phylogenetic and paleontological perspectives. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 103(14):5442-5447
- Tollefson J. 2008. Energy: Not your father’s biofuels. *Nature* 451:880-883
- Turner J. S. y N. J. Robinson. 1995. Cyanobacterial metallothioneins: biochemistry and molecular genetics. *J. Ind. Microbiol.* 14(2):119-125

- UNdata. 2011. Population by age, sex and urban/rural residence Página en RED.
United Nations Statistics Division. <http://data.un.org/>
- UNESCO. 1994. Reunión Internacional sobre Biodiversidad; Asamblea General de la Unión Internacional de Ciencias Biológicas. Página en red: <http://www.unesco.org>
- UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Página en red: <http://www.unfccc.int> Consultada en septiembre de 2011.
- Wehr, J. D. y R. G. Sheath. 2003. Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification. Academic Press, San Diego, CA. 950 pp.
- Whitton B. y M. Potts. 2000. Introduction to Cyanobacteria. En: Whitton B. y M. Potts (Eds.). The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space. Kluwer Academic Publishers. Holanda. p:1-11
- Williams P. 2007. Biofuel: microalgae cut the social and ecological costs. *Nature* 450:478
- Zou D., K. Gao y H. Luo. 2011. Short-and long-effects of elevated CO₂ on photosynthesis and respiration in the marine macroalga *Hizikia fusiformis* (Sargassaceae, Phaeophyta) grown at low and high N supplies. *J. Phycol.* 47: 87-97

APÉNDICE I

EFICIENCIA DE DIFERENTES ORGANISMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Tabla 5. Comparación de la eficiencia en diferentes organismos para producir biodiesel (adaptado de Schenk *et al.*, 2008). Se observa que las algas son mucho más eficientes en relación a otros organismos.

Organismo	Área (en millones de hectáreas) necesaria para producir la cantidad de combustibles requeridos actualmente*	Área (porcentaje de la superficie terrestre) necesaria para producir la cantidad de combustibles requeridos actualmente*	Área (porcentaje de la superficie terrestre cultivable) necesaria para producir la cantidad de combustibles requeridos actualmente*
Algodón	15,002	100.7%	756.9%
Soya	10932	73.4%	551.6%
Mostaza	8524	57.2%	430.1%
Girasol	5121	34.4%	258.4%
Colza/	4097	27.5%	206.7%
Jatrofa	2577	17.3%	130%
Palma aceitera	819	5.5%	41.3%
Algas poco productivas	406	2.7%	0-20.5% **
Algas altamente productivas	49	3.3%	0-2.5%

* Para los datos de la tabla anterior se considera satisfacer la demanda actual de combustibles fósiles.

APÉNDICE II

CLIMAS DE LA CUENCA DE MÉXICO



Figura 23. Climas de la cuenca de México según la clasificación de Köppen (basado en Jáuregui, 2000). En el Distrito Federal es Cw, así como en las zonas norte y oeste colindantes del Estado de México, y hacia el noreste del mismo es BS. La zona de estudio y las de recolección se ubican al sur del Distrito Federal con clima Cw.

SUBTIPOS CLIMÁTICOS DE LA CUENCA DE MÉXICO DE ACUERDO A GARCÍA (1968)

Tabla 6. Subtipos climáticos de la cuenca de México.

Subtipo climático	Localización
BS ₁ kw(w)(i')	Parte central de la región de Texcoco y México abarcando la mitad noreste de la capital.
BS ₁ k'w(w)(i')	Porción nororiental de la región de Zumpango y Xaltocan.
C(w ₀)(w)b(i')	Parte del lecho de la cuenca de México no ocupada por los climas BS.
C(w₁)(w)b(i')	Parte baja de las montañas que rodean a la Cuenca.
C(w ₂)(w)b(i')	Laderas montañosas de altitud comprendida aproximadamente entre 2,400 y 2,800 msnm.
C(w ₂)(w)bi	Laderas montañosas de altitud superior a los 2,800 msnm.
C(w ₂)(w)b'i	Laderas montañosas de altitud superior a los 2,800 msnm.
C(w ₂)(w)ci	Se localiza hacia arriba del C(w ₂)(w)b'i hasta una altitud inferior a los 4,000 msnm.
E(T)Chi	Parte de la Sierra Nevada entre los 4,000 y 5,272 msnm.
EFHi	Picos más altos del Popocatepetl e Ixtaccíhuatl de altitud superior a los 5,272 msnm.

SÍMBOLOS PARA LOS SUBTIPOS CLIMÁTICOS DE LA CUENCA DE MÉXICO (GARCÍA, 1968).

BS₁: Semiseco, es decir, el menos seco de los BS. El cociente P/T es mayor de 22.9.

k: Templado con verano cálido, temperatura media anual entre 12° y 18° C, temperatura media del mes más frío entre -3° y 18° C y temperatura media del mes más caliente superior a 18° C.

k': Templado con verano fresco, temperatura media anual entre 12° y 18° C, temperatura media del mes más frío entre -3° y 18° C y temperatura del mes más caliente inferior a 18° C.

w: Con régimen de lluvias de verano, es decir, por lo menos 10 veces mayor precipitación en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el mes más seco.

(w): Con porcentaje de lluvia invernal menor de 5% de la total anual.

(i'): Casi isotermal, es decir, con poca oscilación anual de las temperaturas medias

mensuales (entre 5° y 7° C).

C(w₀): El más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano y cociente (P/T) menor que 43.2, donde P=Presión y T=Temperatura.

C(w₁): Subhúmedo, con lluvias en verano, intermedio entre el C(w₀) y el C(w₂), con cociente P/T entre 43.2 y 55.0.

C(w₂): El más húmedo de los subhúmedos, con lluvia en verano y cociente (P/T) mayor que 55.0.

b: Templado con verano fresco y largo, temperatura media anual entre 12° y 18° C, temperatura media del mes más frío entre -3° y 18° C y temperatura media del mes más caliente entre 6.5° y 22° C.

(b'): Semifrío con verano fresco y largo, temperatura media anual entre 5° y 12° C, temperatura media del mes más frío entre -3° y 18° C y temperatura media del mes más caliente entre 6.5° y 22° C.

c: Semifrío con verano fresco corto, temperatura media anual entre 5° y 12° C, temperatura media del mes más frío entre -3° y 18° C y temperatura media del mes más caliente entre 6.5° y 22° C, y menos de cuatro meses con temperatura mayor de 10° C.

E(T)C: Frío con temperatura media anual entre -2° y 5° C, temperatura media del mes más frío mayor a 0° C y temperatura media del mes más caliente entre 0° y 6.5° C.

E(T): Frío, con temperatura media anual entre -2° y 5° C, temperatura media del mes más frío inferior a 0° C y temperatura media del mes más caliente entre 0° y 6.5° C.

EF: Muy frío, con temperatura media anual menor de -2° C y temperatura media del mes más caliente menor de 0° C.

H: Con altitud superior a 1,500 msnm.

i: Isotermal, con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales menor de 5° C.

LOCALIZACIÓN DE LOS SUBTIPOS CLIMÁTICOS DE LA CUENCA DE MÉXICO



Figura 24. Mapa de localización de los subtipos climáticos de la cuenca de México según el sistema de clasificación climática adaptada para México. Basado en García (1968).

APÉNDICE III

FORMULACIONES

GRENETINA GLICERINADA SIN FENOL (COMUNICACIÓN PERSONAL HILDA LEÓN)

Fórmula para preparar 150 mL de grenetina glicerizada sin fenol.

Sustancia	Cantidad
Agua destilada	105 mL
Glicerina	50 mL
Grenetina bacteriológica	50 G
Listerine ® como antiséptico	5 mL

FORMULACIÓN DE LOS MEDIOS DE CULTIVO

En el caso de los medios sólidos, se vertieron 10 mL de medio en cajas de Petri desechables de 60 mm de diámetro, y para los medios líquidos, se vertieron 50 mL de medio en frascos de vidrio transparentes de 100 mL.

MEDIO BBM (MODIFICADO DE BOLD)

(Andersen, 2005).

Es útil para muchos tipos de algas incluyendo cianobacterias. En 936 mL de agua destilada (dH₂O), agregar 10 mL de las seis primeras soluciones madre de macronutrientes, agregar 1 mL de la solución alcalina de EDTA, de la solución de hierro acidificado, de boro y de metales traza. Esterilizar en autoclave. El pH final debe ser 6.6.

Si se desea obtener un medio sólido, medir el pH (que debe ser 6.6 a temperatura ambiente) antes de agregar 7.5 g·L⁻¹ de agar, finalmente esterilizar en autoclave.

Componentes del medio BBM.

Componente	Solución madre (g L ⁻¹ dH ₂ O)	Cantidad utilizada (mL)	Concentración final en el medio (M)
<i>Macronutrientes</i>			
NaNO ₃	25.00	10 mL	2.94 x 10 ⁻³
CaCl ₂ 2H ₂ O	2.50	10 mL	1.70 x 10 ⁻⁴
MgSO ₄ 7H ₂ O	7.50	10 mL	3.04 x 10 ⁻⁴
K ₂ HPO ₄	7.50	10 mL	4.31 x 10 ⁻⁴
KH ₂ PO ₄	17.50	10 mL	1.29 x 10 ⁻³
NaCl	2.50	10 mL	4.28 x 10 ⁻⁴
<i>Solución alcalina de EDTA</i>		1 mL	
EDTA	50.00		1.71 x 10 ⁻⁴
KOH	31.00		5.53 x 10 ⁻⁴
<i>Solución de hierro acidificado</i>		1 mL	
FeSO ₄ 7H ₂ O	4.98		1.79 x 10 ⁻⁵
H ₂ SO ₄	—	1 mL	
<i>Solución de Boro</i>		1 mL	
H ₃ BO ₃	11.42		1.85 x 10 ⁻⁴
<i>Solución de metales traza</i>		1 mL	
ZnSO ₄ 7H ₂ O	8.82		3.07 x 10 ⁻⁵
MnCl ₂ 4H ₂ O	1.44		7.28 x 10 ⁻⁶
MoO ₃	0.71		4.93 x 10 ⁻⁶
CuSO ₄ 5H ₂ O	1.57		6.29 x 10 ⁻⁶
Co(NO ₃) ₂ 6 H ₂ O	0.49		1.68 x 10 ⁻⁶

MEDIO BG11 (PARA ALGAS VERDE-AZULES DE ALLEN)

(Andersen, 2005)

Este medio se utiliza para cultivar cianobacterias de muchos tipos de ambientes (de agua dulce, terrestres, termales y marinas).

El MgNa₂EDTA H₂O puede ser reemplazado por el equivalente molar de Na₂EDTA 2H₂O (1.04 g en lugar de 1 g en este caso).

Preparar las soluciones madre de hierro-citrato, nitrato de sodio, fosfato ácido de potasio, sulfato de magnesio, cloruro de calcio, carbonato de sodio, MgNa₂EDTA H₂O y de metales traza.

En 900 mL de agua destilada (dH₂O) primero agregar 1 mL de la solución de fierro-citrato, y luego el resto de los componentes. Esterilizar en autoclave. El pH final debe ser 7.4 después del enfriamiento y del equilibrio de CO₂.

Si se desea un medio sólido, preparar el medio en una concentración 2x y una solución de agar (7.5 g L⁻¹) también en una concentración de 2x, esterilizar en autoclave por separado y mezclar ambas soluciones en condiciones asépticas a ~58° C.

Formulación general para la preparación de medio BG11

Componente	Solución madre (g L ⁻¹ dH ₂ O)	Cantidad necesaria	Concentración final en el medio (M)
<i>Solución de Fierro-Citrato</i>		1 mL	
Ácido cítrico	6	1 mL	3.12 x 10 ⁻⁵
Citrato férrico de amonio	6	1 mL	~3 x 10 ⁻⁵
NaNO ₃	—	1.5 g	1.76 x 10 ⁻²
K ₂ HPO ₄ 3H ₂ O	40	1 mL	1.75 x 10 ⁻⁴
MgSO ₄ 7H ₂ O	75	1 mL	3.04 x 10 ⁻⁴
CaCl ₂ 2H ₂ O	36	1 mL	2.45 x 10 ⁻⁴
Na ₂ CO ₃	20	1 mL	1.89 x 10 ⁻⁴
MgNa ₂ EDTA 2 H ₂ O	1,0	1 mL	2.79 x 10 ⁻⁶
Solución de metales traza		1 mL	—

Formulación para la preparación de la solución madre de metales traza para el medio BG11.

Componente	Solución madre (g L ⁻¹ dH ₂ O)	Cantidad utilizada	Concentración final en el medio (M)
H ₃ BO ₃	—	2.860 g	4.63 x 10 ⁻⁵
MnCl ₂ 4H ₂ O	—	1.810 g	9.15 x 10 ⁻⁶
ZnSO ₄ 7H ₂ O	—	0.220 g	7.65 x 10 ⁻⁷
CuSO ₄ 5H ₂ O	79.0	1 mL	3.16 x 10 ⁻⁷
Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O	—	0.391 g	1.61 x 10 ⁻⁶
Co(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	49.4	1 mL	1.70 x 10 ⁻⁷