

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



“POTENCIAL DE BIOMASA DE MICROALGAS POR EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA”

POR

SAUL ALAN ADAME ARELLANO

MONOGRAFÍA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN AGROECOLOGÍA

Torreón, Coahuila, México

Febrero de 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

"POTENCIAL DE BIOMASA DE MICROALGAS POR EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA"

MONOGRAFÍA QUE PRESENTA:

SAUL ALAN ADAME ARELLANO

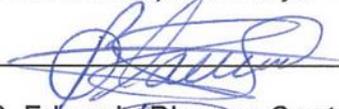
QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR:

PRESIDENTE:



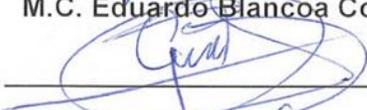
Dr. Jesús Vásquez Arroyo

VOCAL:



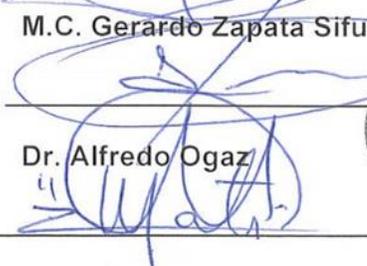
M.C. Eduardo Blanco Contreras

VOCAL:



M.C. Gerardo Zapata Sifuentes

VOCAL SUPLENTE:



Dr. Alfredo Ogaz



M.C. Víctor Martínez Cueto
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

FEBRERO DE 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

"POTENCIAL DE BIOMASA DE MICROALGAS POR EL TRATAMIENTO DE AGUA
RESIDUAL DOMÉSTICA"

MONOGRAFÍA QUE PRESENTA:

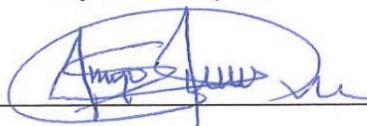
SAUL ALAN ADAME ARELLANO

ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN AGROECOLOGÍA

Aprobada por:

ASESOR PRINCIPAL:



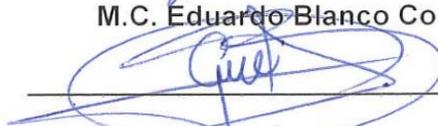
Dr. Jesús Vásquez Arroyo

ASESOR:



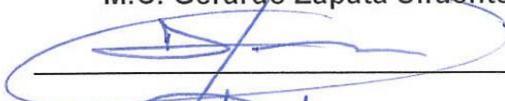
M.C. Eduardo Blanco Contreras

ASESOR:



M.C. Gerardo Zapata Sifuentes

ASESOR:



Dr. Alfredo Ogaz



M.C. Víctor Martínez Cueto

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO



AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de estar en este mundo, por llegar hasta estas instancias, permitiéndome cumplir cada objetivo personal que me he propuesto y dejarme crecer día a día como persona.

A mi madre que me dio la vida, por cuidar de mí, mostrarme que si deseas cumplir cada meta que te propones es necesario luchar día a día por ella sin importar que tan dura pueda parecer la vida, que no debes rendirte jamás bajo ninguna circunstancia, por confiar en mí, ser el gran pilar de mí vida, agradezco los valores que me inculco de pequeño, pues me han hecho la persona que soy ahora, por su amor, trabajo duro y apoyo incondicional, para mí es un gran honor y privilegio ser su hijo, compartir mi vida día a día al lado de ella.

A mi abuela que estuvo ahí para mí desde pequeño, a esa mujer que me dio su tiempo, espacio y apoyo siempre, quien a pesar de todos los problemas que surgieron a lo largo de mi vida jamás dudo de mí, nunca me abandono y me mostro que el trabajo duro forma el carácter, el cual te servirá toda la vida, pues aprenderás que no todo en la vida es gratis y que los mejores momentos vienen después de largos sufrimientos, me mostro que en la vida los momentos que pasas al lado de tus seres queridos son más importantes que las cosas materiales.

A mi hermano que siempre me apoyo, cuido, a-consejo sabiamente y protegió, agradezco que haya estado ahí para mí siempre, siendo una figura paterna, el cual me mostro que la dedicación a lo que te gusta siempre rinde frutos.

A mi familia en general que creyeron siempre en mí, me apoyaron y me dieron ánimos para seguir siempre adelante.

A los amigos que me acompañaron durante este viaje, que al final de él se convirtieron en mis hermanos, nos mantuvimos unidos a pesar de los obstáculos.

A mi novia que estuvo en los buenos y malos momentos, procurando siempre mi felicidad, que me motivo para no rendirme y me acompañó en esta aventura y muchas más, mostrándome que el amor es un gran incentivo para lograr superarte y ser mejor día con día.

DEDICATORIA

A mi madre por todo el esfuerzo, sacrificio, bendiciones y apoyo, que a lo largo de mi vida han significado mucho, además de su gran amor, la confianza que deposito en mí, a esa mujer que a base de regaños y consejos, corrigió mi camino en aquellos momentos en los que me desviaba de este, por darme la vida y siempre apoyarme en cada paso que doy, le debo todo y en especial este gran logro que significara mucho en mi vida.

A mi hermano y abuela que siempre estuvieron apoyándome y guiándome a lo largo de este proceso, que inicio como un sueño que hoy se vuelve realidad, su comprensión, cariño y sobre todo sus consejos me sirvieron mucho para poder llegar hasta donde me encuentro hoy.

A mis primos, tía y sobrinos que de alguna u otra forma contribuyeron para que pudiera realizar este peldaño importante dentro de mi vida.

A la Universidad Autónoma Antonio Narro Unidad Laguna por haberme cobijado durante el tiempo que duro mi estancia dentro de esta institución tan prestigiosa, por la gran oportunidad de cumplir mis sueños al realizar mis estudios profesionales.

A mis asesores por el apoyo otorgado para lograr realizar este proyecto, por el vasto conocimiento que compartieron y que me permitió terminar con éxito mi estancia, por los consejos que me sirvieron de mucho y su dedicación.

Al Doctor Jesús Vásquez Arroyo por la paciencia, el conocimiento, consejos, apoyo y guía durante la estancia en la universidad y sobre todo, en el tiempo que fui su tutorado, su amistad a lo largo del tiempo en la universidad.

A mi novia que procuro siempre mi felicidad, que me motivo para no rendirme y me acompañó en esta aventura y muchas más, que estuvo en los buenos y malos momentos, me mostro que el amor es un gran incentivo para lograr superarte y ser mejor día con día.

RESUMEN

Anualmente, en el mundo se generan en promedio 330 Km³ de aguas residuales. En México se genera 6.7 Km³ de aguas residuales, con una cobertura nacional de tratamiento del 47.5%. El uso de las microalgas para el tratamiento de aguas residuales ha sido empleado por décadas, como un proceso de bajo costo, especialmente en áreas con alta temperatura ambiental, y adecuada radiación solar en el transcurso del año, se les considera responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta y contribuir con biomasa. La selección del tipo de sistema de cultivo es importante, y debe realizarse en base a factores biológicos, técnicos, ambientales y económicos. La cosecha de la biomasa algal es el procedimiento más complejo y costoso en el cultivo de microalgas, existiendo varias técnicas diferentes tanto en eficiencia como en complejidad. La producción de biomasa de microalgas ha proporcionado una amplia gama de productos biotecnológicos con usos en la industria alimenticia, salud y medicina humana, alimentación animal, compuestos orgánicos y biocombustibles. Todo esto adquiere una gran importancia debido a los problemas ambientales globales existentes en la actualidad.

Palabras Claves: Microalga, Biomasa, Aguas residuales, fotosíntesis, producción, nutrientes, cultivo.

ABSTRACT

Every year, an average of 330 km³ of wastewater is generated in the world. In Mexico, 6.7 km³ of wastewater is generated, with a national treatment coverage of 47.5%. The use of microalgae for the treatment of wastewater has been used for decades, as a low-cost process, especially in areas with high environmental temperature, and adequate solar radiation during the year, they are considered responsible for the production of the 50% of the oxygen and the fixation of 50% of the carbon in the planet and contribute with biomass. The selection of the type of farming system is important, and must be made based on biological, technical, environmental and economic factors. The harvesting of algal biomass is the most complex and costly procedure in the cultivation of microalgae, there are several different techniques both in efficiency and complexity. The production of microalgae biomass has provided a wide range of biotechnological products with uses in the food industry, health and human medicine, animal feed, organic compounds and biofuels. All this acquires a great importance due to the global environmental problems existing today.

Key words: Microalgae, Biomass, Wastewater, photosynthesis, production, nutrients, culture.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
I. INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1 La célula de microalgas.....	7
2.2. Fundamentos del cultivo de microalgas.....	8
2.2.1. Fotosíntesis en Microalgas.....	9
2.2.2 Iluminación.....	9
2.2.3. Fuentes de carbono.....	10
2.2.4 Acumulación de oxígeno.....	12
2.2.5. Suministro de nutrimentos.....	12
2.2.6. Nutrición algal mineral.....	12
2.2.7. Nutrición de carbón heterotrófico.....	13
2.3. Principios del cultivo en masa.....	15
2.4. Métodos de cultivo.....	15
2.5. Sistemas de cultivo.....	16
2.6. Producción en masa de microalgas: Uso de canales (raceway) contra fotobiorreactores.....	17
2.7. Producción de biomasa algal a gran escala: Fotobiorreactores.....	19
2.7.1. Ingeniería de boirreactores y reglas de escalamiento.....	22
2.8. Cosecha de biomasa de microalgas.....	23
2.9. Aplicación de microalgas al tratamiento de aguas residuales.....	25
2.9.1. Ficorremediación.....	27

2.10. Producción industrial y subproductos de valor	28
2.11.1 <i>Chlorella</i>	29
2.11.2 <i>Arthrospira (Spirulina) platensis</i>	29
2.11.3 <i>Dunaliella</i>	30
2.11.4 <i>Haematococcus</i>	31
2.11.5 <i>Nostoc</i>	32
2.12. Microalgas en la nutrición animal y humana.....	32
2.12.1. Uso Animal.....	32
2.12.2. Uso Humano.....	33
2.13. Producción de metano e hidrógeno por microalgas.	33
2.14. Biorremediación por microalgas. Purificación del agua	35
2.15. Compuestos bioactivos en microalgas.	35
2.16 Consideraciones.....	36
Conclusiones	36
Referencias	37

ÍNDICE DE TABLAS

Título	Pág.
Especies de algas comercialmente importantes y se pueden cultivar heterotróficamente.	11
Distintos tipos de biomasa	16
Distintos tipos de fotobiorreactores y sus usos	17
Clasificación de métodos de escalamiento primera clasificación	21
Clasificación métodos de escalamiento segunda clasificación	21
Microalgas empleadas en la degradación de diversos contaminantes de aguas residuales	24

ÍNDICE DE FIGURAS.

Título	Pág.
Representación esquemática simplificada del modelo integrado conceptual que muestra las principales interacciones alga-bacteria en un estanque de alta producción de algas, durante el día (izquierda) y la noche (derecha). Los componentes que entran en los estanques con el afluente están marcados con un * y los procesos están indicados por flechas. COD= demanda química de oxígeno	7
Consumo de dióxido de carbono (mg L/d) para diversas especies de microalgas	8
Diversas posibilidades tróficas para algas, cuando el crecimiento auto y heterotrófico son de los más importantes.	10
Diagrama esquemático del fotobiorreactor flotante. a. Diagrama tridimensional esquemático del FBR flotante rotatorio. b. sección transversal de la representación esquemática del FBR. c. Vista lateral del FBR flotante lleno con cultivo. d. Vista frontal de FBR lleno de cultivo	20

INTRODUCCIÓN

Anualmente, en el mundo se generan en promedio 330 Km³ de aguas residuales, de las cuales entre un 25-35% es tratada, siendo utilizada para irrigar entre otras las regiones áridas y semiáridas, generando con ello un mejor aprovechamiento del recurso, evitando en menor medida la sobre explotación de mantos acuíferos (Mateo-Sagasta *et al.* 2015). En México se genera 6.7 Km³ de aguas residuales, con una cobertura nacional de tratamiento del 47.5% (SEMARNAT, 2015).

Los recursos hídricos en México, al igual que en el resto del mundo, se encuentran bajo una creciente presión (CONAGUA, 2014). El cambio climático, el crecimiento demográfico, la urbanización y el aumento en el consumo de agua en los hogares, agricultura e industria; han aumentado significativamente su uso, conduciendo a la escasez del mismo (Hernández *et al.*, 2015).

Al 2016 se tenía en México, 2,477 plantas de tratamiento para centros de población, colectando 212.0 m³/s, tratando el 57.2% y 2,832 plantas para las aguas residuales industriales. La industria genera 214.6 m³/s, de aguas residuales, se trata solo el 32.8 % (Numeragua, 2016). Un porcentaje importante del agua que se trata se realiza de manera deficiente, siendo poca el agua disponible para reutilizarse y resulta de baja calidad, por lo que son poco aprovechadas (López-Hernandez *et al.*, 2016).

El uso de las microalgas para el tratamiento de aguas residuales ha sido empleado por décadas, como un proceso de bajo costo, especialmente en áreas con alta temperatura ambiental, y adecuada radiación solar en el transcurso del año. Éstas, contienen altas concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo), y una variedad de elementos traza (K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn), los cuales son nutrientes esenciales para el metabolismo y crecimiento de las microalgas (Li, *et al* 2013). Su aplicación se centra en la remoción de nutrientes, ya que las algas pueden considerarse como agentes eficientes para remover nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros; como sustrato para la producción de biogás y como un medio selectivo para la remoción de metales pesados (cadmio, plomo y cromo) (Mahapatra, *et al.*, 2013).

Las microalgas son un conjunto heterogéneo de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes (cianobacterias) y eucariontes, que se localizan en hábitats diversos, se les considera responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta y para crear biomasa (Hernández et al., 2009). Debido a que las células crecen en suspensión acuosa, éstas, debe tener acceso eficiente al agua, CO₂, y otros nutrientes (Widjaja et al., 2009). Las algas son las plantas de más rápido crecimiento en el mundo, además de una fuente importante de biomasa, serán en corto plazo, una fuente competitiva como biocombustible, pueden cultivarse en casi cualquier lugar, incluso en aguas residuales o agua salada, y no requiere de cultivos de tierras fértiles o alimento (Demirbas and Dermibas, 2011). La remoción de 1 Kg de DBO por oxigenación fotosintética, no requiere de entrada de energía y generará suficiente biomasa algal para generar metano, mismo que producirá 1 KWh de energía eléctrica (Oswald, 2003).

La cosecha de biomasa de microalgas es una etapa crucial desde un punto de vista tecnológico y económico (Sukenik et al., 1988; Grima et al., 2003), un proceso eficiente es esencial para la producción sustentable a gran escala (Mennaa *et al.*, 2017). Un método de cosecha universal no existe (Demirbas, 2009; Richmond, 2013), Se ha reportado que la selección de un método depende de las propiedades de la microalga tales como: densidad, tamaño y valor del producto deseado. Las mejores técnicas de cosecha son la centrifugación, filtración (Grima *et al.*, 2003), sedimentación gravitacional y floculación (Lee *et al.*, 1998).

Los metabolitos de las microalgas son extremadamente variados y tienen aplicaciones comerciales en una gran cantidad de áreas que incluyen: suplementos para la nutrición humana y animal, acuicultura, productos farmacéuticos y cosméticos, e industrias de combustibles (reviewed in: Borowitzka, 2013; Markous and Nerantzis, 2013).

Otro de los beneficios de las algas es su tendencia a incrementar el pH del agua y por tanto la eliminación de agentes patógenos (Munoz & Guieysse, 2006). Un pH de 9.3 por 24 horas puede eliminar el 100% de la *Escherichia coli* y gran cantidad de bacterias patógenas (CONAGUA, 2007). Si el agua tratada se va a utilizar para riego, no es necesario remover las algas pero el tanque de sedimentación o almacenamiento debe ser capaz de alcanzar un valor de coliformes fecales a 10^3 de NMP, que es suficiente para cumplir con la normatividad Mexicana (NMX-AA-102-SCFI-1987, 1987).

La presente monografía pretende presentar el estado del arte del cultivo de las microalgas en aguas residuales urbanas como fuente de biomasa para su óptima utilización en zonas áridas.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La célula de microalgas

Las microalgas son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos capaces de transformar la energía luminosa en energía química con una eficiencia cuatro veces superior a la de las plantas. Su importancia radica en su papel como productores primarios de la cadena trófica, que las constituyen en las primeras formadoras de materia orgánica, se localizan en hábitats diversos tales como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes; se les considera responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta (Hernández *et al.*, 2009; Abalde y Herrero, 2004).

Estas pueden tener diferentes tipos de organización celular: unicelulares, coloniales y filamentosas. La mayoría de las cianobacterias unicelulares no son móviles, pero el deslizamiento y motilidad de natación pueden ocurrir (Tomaselli, 2004). Un cúmulo producen morfologías diferentes, por ejemplo, flagelada, cocoide y etapa de quiste. Muchas especies son capaces de reproducción sexual, algunas, aparentemente únicamente tienen reproducción asexual (p. ej. *Chlorella*, *Nannochloropsis*) (Andersen, 2013).

Las condiciones apropiadas para un crecimiento algal vigoroso son: (i) suministro de nutrimentos y CO₂ en concentraciones adecuadas; (ii) iluminación adecuada, (iii) mantenimiento favorable de la temperatura y (iv) adecuada agitación, para evitar la precipitación de las células y asegurar una distribución homogénea de los componentes y luz (Tamiya, 1957).

El cultivo de microalgas en sistemas abiertos se desarrolla bien, pero solamente algunas especies se pueden mantener, en virtud del control del pH alcalino y un ambiente

selectivo. Los fotobiorreactores cerrados ofrecen una opción para el manejo mono-específico de una diversidad de algas en comparación con los sistemas abiertos (Molina *et al.*, 2001).

Las cepas típicas empleada para estos propósitos son: *Chlorella*, *Arthrospira*, *Dunaliella* y *Haematococcus* (Bajpai *et al.*, 2014). El potencial de expansión del cultivo comercial de microalgas con una diversidad de aplicaciones, incluyendo a los biocombustibles, alimento y fármacos (Carney y Lane, 2014).

2.2. Fundamentos del cultivo de microalgas.

Las microalgas, son primordialmente organismos fotosintéticos liberadores de oxígeno y con un cuerpo simple y plano, no tiene raíces, tallo, hojas y por lo general son acuáticos (Andersen, 2013), poseen un gran potencial como fuente de diversos productos químicos tales como polisacáridos, lípidos y pigmentos que sirven de base a la industria química y, se constituyen en fuente directa de alimento, medicamentos, forraje, fertilizantes y combustible.

Hoy es indiscutible la importancia económica de las microalgas, que a diferencia de las plantas, contienen relativamente pequeñas cantidades de material estructural y muchos de los componentes celulares son de reconocido valor económico (Herrera *et al.*, 2010). Contienen una gran cantidad de pigmentos esenciales que bajo la acción de la fotosíntesis y otras sustancias inorgánicas son transformados en compuestos orgánicos complejos como carbohidratos, lípidos, proteínas, etc., que posteriormente se acumulan en las células y en los tejidos de los organismos. Mediante este proceso también regulan el contenido de oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera, colaborando en el control del efecto invernadero, las lluvias ácidas y el adelgazamiento de la capa de ozono (Travieso and Benitez-Echegoyen, 1988).

2.2.1. Fotosíntesis en Microalgas

La fotosíntesis es un proceso único de conversión de la luz solar, en la cual los compuestos inorgánicos y la energía luminosa, son convertidos a materia orgánica por autótrofos. La parte aérea de las plantas, las cuales llevan a cabo la fotosíntesis y están por lo general en fase de crecimiento suele denominarse biomasa verde (Schönicke *et al.*, 2015). Prácticamente todas las formas de vida sobre la tierra dependen directa o indirectamente de la fotosíntesis, como fuente de materia orgánica y energía para el metabolismo (Masojídek *et al.*, 2013).

Cianobacterias (algas verde-azules) con frecuencia son unicelulares, algunas especies forman agregados o filamentos. La organización interna de una celda cianobacterias procariontas, donde una región central (núcleo-plasma) es rico en ADN y una región periférica (cromoplasto) contiene las membranas fotosintéticas. Los pliegos de las membranas fotosintéticas están normalmente dispuestos en paralelo, cercanas a la superficie de la célula (Masojídek *et al.*, 2004).

2.2.2. Iluminación

La intensidad lumínica es uno de los principales parámetros a considerar en un cultivo (Contreras-Flores *et al.* 2003). En ausencia de limitación por nutrientes, la fotosíntesis se incrementa con el aumento de la intensidad lumínica, hasta alcanzar la máxima tasa de crecimiento específica para cada especie en el punto de saturación por luz (Park *et al.* 2011a). Pasado este punto, se alcanza el punto de fotoinhibición, con resultados perjudiciales para la misma célula e incluso la muerte, implicando pérdida de eficiencia fotosintética y productividad del cultivo (Contreras-Flores *et al.* 2003, Richmond 2004, Martínez 2008, Park *et al.* 2011a).

El crecimiento microalgal resulta fuertemente influenciado por el factor de luz fL (I), disminuyendo las concentraciones de microalgas en un 40% a 60%. Por otra parte, la reducción de la concentración de materia orgánica en el influente del 50% y 70%, los predicciones de los modelos indican que la producción aumentó de 8.7 g sólidos solubles

totales (TSS) m^3d^{-1} a $13.5 \text{ TSS m}^3\text{d}^{-1}$, debido a la nueva distribución de partículas componentes Figura 1 (Solimeno *et al.*, 2017).

2.2.3. Fuentes de carbono

El carbono constituye el principal macronutriente para el crecimiento y productividad de las microalgas (Bermúdez *et al* 2003).

Las microalgas pueden emplear como fuente de carbono el CO_2 presente en la atmósfera, así como los iones bicarbonato (HCO_3^-) con la ayuda de la enzima anhidrasa carbónica. En promedio, son capaces de tolerar hasta unas 150.000 partes por millón de volumen (ppmv) de CO_2 en aire, aunque hay especies, como *Chlorella*, que han demostrado que toleran hasta 400.000 ppmv (Figura 2) (Ho *et al.*, 2011). Algunos sistemas de cultivo inyectan aire enriquecido en dióxido de carbono en el reactor. Cuando se provee a las algas de carbonato, se hace generalmente en forma de Na_2CO_3 y NaHCO_3 (Ruiz 2011).

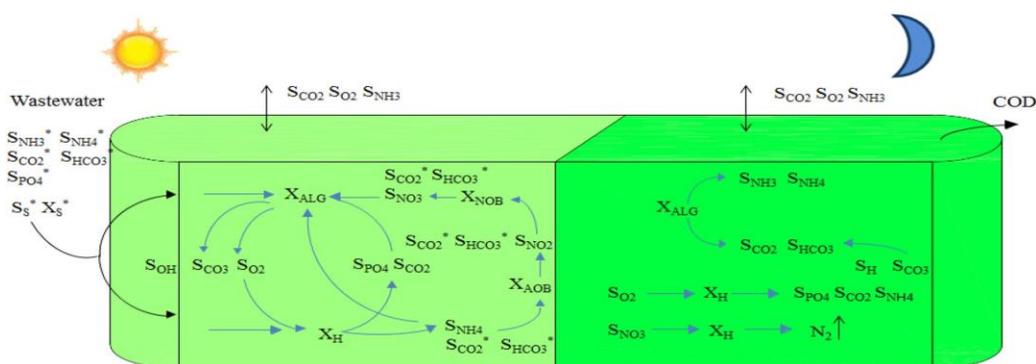
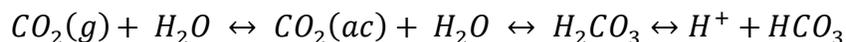


Fig. 1. Representación esquemática simplificada del modelo integrado conceptual que muestra las principales interacciones alga-bacteria en un estanque de alta producción de algas, durante el día (izquierda) y la noche (derecha). Los componentes que entran en los estanques con el afluente están marcados con un * y los procesos están indicados por flechas. COD= demanda química de oxígeno (Alessandro Solimeno *et al.*, 2017).

El CO_2 , al disolverse en agua, forma moléculas de ácido carbónico (H_2CO_3). Este ácido se encuentra en una fracción 10^3 veces menor que el CO_2 disuelto, debido a que en el

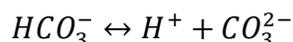
agua se disocia con gran facilidad en protones H^+ y iones bicarbonato HCO_3^- , como se muestra en la ecuación (1):

Ecuación 1:



A su vez, el ion bicarbonato, en presencia de agua, se disocia en iones H^+ e iones carbonato CO_3^{2-} (ecuación (2)):

Ecuación 2:



De este modo, cuando un cultivo de microalgas se encuentra en fase exponencial de crecimiento, el consumo de carbono inorgánico disuelto (bien en forma de CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- o CO_3^{2-}) provoca un desplazamiento de los equilibrios, indicados en las ecuaciones (1) y (2), hacia una reducción de la concentración de protones H^+ y, por ende, un incremento del pH (García-Gozalbes *et al.*, 2015).

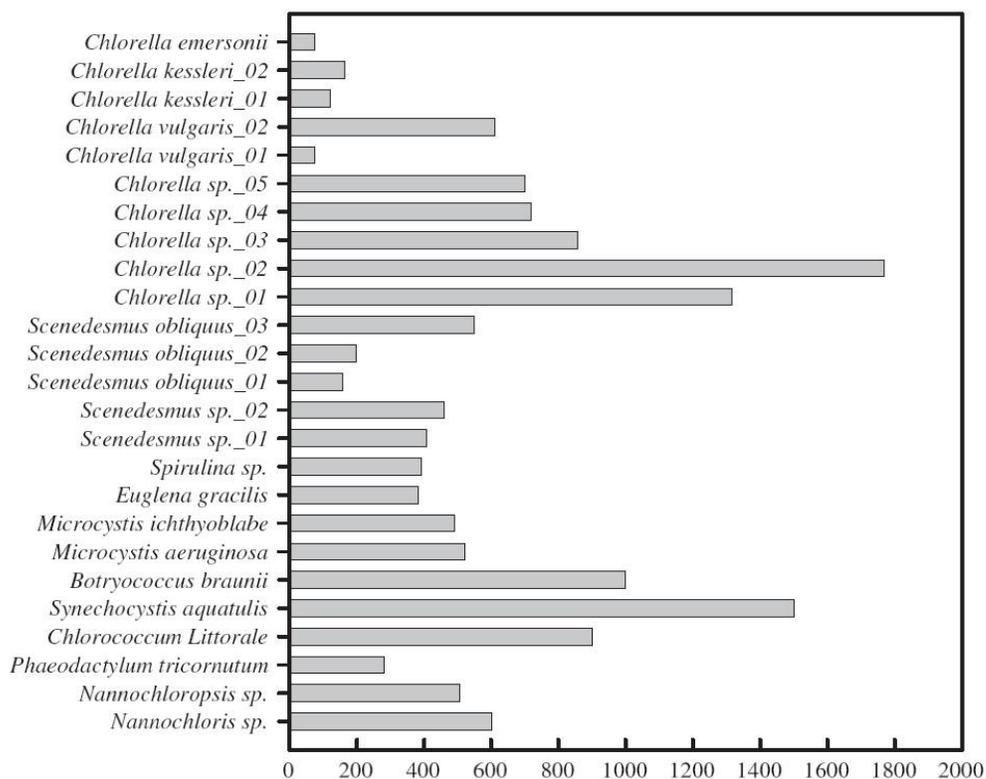


Fig. 2: Consumo de dióxido de carbono (mg L/d) para diversas especies de microalgas (Ho *et al.*, 2011).

2.2.4. Acumulación de oxígeno

El nivel de oxígeno disuelto debe ser controlado, ya que altas concentraciones pueden inhibir la fijación de carbono por parte del enzima ribulosa 1,5 bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCo). Esta inhibición se ve favorecida por alta radiación y temperatura, así como en el caso de déficit de CO₂. Muchas especies de microalgas no son capaces de sobrevivir en un medio sobresaturado de oxígeno más de 2 o 3 horas (para algunas el 120% de saturación en el aire, para otras el 200%). Además, la producción fotosintética de oxígeno en cultivos de alta densidad puede alcanzar hasta 40 mg/L de modo que mediante la radiación adecuada pueden llegar a desarrollarse radicales de oxígeno. Estos radicales libres serían tóxicos para las células y causarían daños en sus membranas. La presión parcial del oxígeno en el cultivo puede disminuirse mediante aumento de la turbulencia y remoción del aire (Ruiz, 2011).

2.2.5. Suministro de nutrimentos

Los requerimientos de nutrientes varían de forma específica entre las diferentes especies; pero, de forma general, la materia orgánica es utilizada de manera colectiva, ya que contiene C, H, O, N, P, trazas de vitaminas y otros elementos necesarios para mantener la vida. Para conocer cuánto de estos elementos necesitan los productores primarios, se puede recurrir a un análisis elemental, donde la proporción arroja, aproximadamente los siguientes datos: 110 C: 230 H: 75 O: 16 N: 1 P (Gómez, 2007). Además de estos elementos (macronutrientes), se necesitan trazas (micronutrientes) de hierro, manganeso, cobalto, zinc y cobre, entre otros.

2.2.6. Nutrición algal mineral.

La absorción de nutrientes depende de todos los factores que influyen en el crecimiento de algas como la luz, la temperatura y la turbulencia. La tasa de absorción de nutrientes, realizará el seguimiento de la tasa de crecimiento que depende de la luz como empíricamente se establece para el proceso de la relación fotosíntesis- irradiancia (P/I) (Harris, 1978). Durante la fotosíntesis, la absorción de nutrientes dependerá de la

disponibilidad de la luz, mientras que la intensidad de luz se satura, la absorción de nutrientes será constante. Las posibles rutas nutricionales para las algas se muestran en la **Fig 3**. Organismos autotróficos obtienen su energía a través de la absorción de la energía de la luz para la reducción de las emisiones de CO₂ por la oxidación de sustratos, principalmente de agua, con la liberación de O₂. Los Organismos Fotoautotróficos sólo requieren iones minerales inorgánicos y los organismos Fotoautotrofos son aquellos que no pueden crecer en la oscuridad ya que necesitan de la luz para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis.

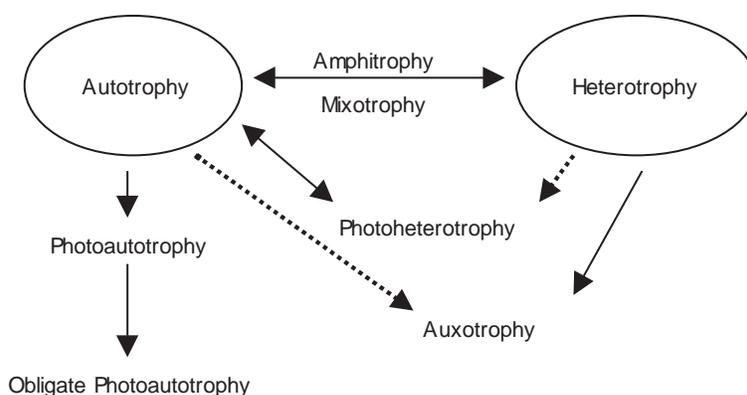


Figura 3. Diversas posibilidades tróficas para algas, cuando el crecimiento auto y heterotrófico son de los más importantes (Grobbelaar, 2004).

2.2.7. Nutrición de carbón heterotrófico.

Algunas microalgas asimilan y, por lo tanto, utilizan carbono orgánico y fuentes de energía para crecer en la oscuridad (los ejemplos se enumeran en el tabla 1). El modo de cultivo heterotrófico evita las dificultades técnicas y fisiológicas asociadas con el suministro y la distribución de la luz y el dióxido de carbono implicados en el modo de cultivo fotosintético. Ofrece la posibilidad de aumentar la concentración celular y la productividad. La concentración de células operativas de aproximadamente 0.5 g/L se informa ampliamente en cultivos fotosintéticos en estanques abiertos (Richmond et al., 1990), mientras que las concentraciones celulares superiores a 45 g/L (Gladue y Maxey, 1994) se han informado en cultivos heterotróficos de microalgas.

Cuadro 1. Especies de algas comercialmente importantes y se pueden cultivar heterotróficamente.

Microalga	Organic carbon substrate
<i>Brachiomonas submarina</i>	Acetate
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Acetate
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Acetate, glucose, lactate, glutamate
<i>C. regularis</i>	Acetate, glucose, etanol
<i>C. saccharophila</i>	Glucose
<i>C. sorokinianna</i>	Glucose
<i>C. vulgaris</i>	Acetate, glucose, lactate, glutamate
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	Glucose
<i>Dunaliella salina</i>	Acetate, lactate, glucose, glutamate
<i>D. tertiolecta</i>	Glucose
<i>Euglena gracilis</i>	Acetate, glucose, alanine, aspartate, asparagine, glutamine, etanol
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Acetate, asparagine
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Glucose
<i>Nitzschia alba</i>	Acetate, glucose, glutamate
<i>Poteriochromonas malhamensis</i>	Glucose, yeast extract
<i>Scenedesmus acutus</i>	Glucose
<i>Tetraselmis chuii</i>	Glucose
<i>T. suecica</i>	Acetate, glucose, glutamate, lactate
<i>T. tetrahele</i>	Acetate, glucose, glutamate, lactate
<i>T. verrucosa</i>	Glucose

Se ha observado ampliamente que la tasa máxima de crecimiento específico de las algas cultivadas heterótróficamente sobre azúcares simples y ácidos orgánicos es menor que la típica de los cultivos fotosintéticos. La mayoría de las cianobacterias no son capaces de asimilar, o asimilar a tasas muy bajas, los sustratos de carbono orgánico en la oscuridad (Smith et al., 1976).

En el caso de *Spirulina platensis*, la tasa de crecimiento específica máxima del cultivo heterotrófico (alimentado con glucosa) fue un tercio de la medida en cultivos

fotosintéticos. Esto implica que para lograr la misma tasa de producción de producto, la concentración celular de un cultivo de *Spirulina* heterotrófico debe ser al menos tres veces mayor que la de un cultivo fotosintético. Una razón para la tasa de crecimiento específica máxima más lenta en cultivos de algas heterótrofos se relaciona con la baja afinidad por estos sustratos de carbono orgánico. Las altas concentraciones de sustrato orgánico, sin embargo, darían como resultado la inhibición del sustrato del crecimiento (Lee, 2004).

2.3. Principios del cultivo en masa.

El tema central involucrado en el cultivo masivo de microalgas fotoautótrofas se refiere al uso efectivo de luz fuerte para la productividad fotosintética de la masa celular y los metabolitos secundarios. Las células absorben solo una fracción del flujo de fotones, los fotones que no son absorbidos por los centros de reacción fotosintética de las células se disipan principalmente como calor o pueden reflejarse. Como regla general, los cultivos en masa de microalgas realizan una reflectancia de la luz de una suspensión de células en el rango de 400-670nm era menor del 2% (Lehana, 1987).

Dado que esencialmente todos los fotones de alta densidad de flujo pueden ser capturados por cultivos de alta densidad celular, la densidad celular continuará aumentando exponencialmente hasta que se absorban todos los fotones disponibles fotosintéticamente. Una vez que se alcanza esta densidad celular, la masa celular se acumula a una velocidad lineal constante hasta que la luz por célula o algún sustrato en el medio de cultivo se vuelve demasiado baja o, alternativamente, alguna actividad o condiciones inhibitorias detienen el crecimiento celular (Richmon, 2004).

2.4. Métodos de cultivo

Dependiendo del régimen de operación, los cultivos de microalgas pueden clasificarse en estancos, semi-continuos, continuos e inmovilizados (Yuan-Kun y Hui, 2004).

En el modo estaque se parte de una situación inicial con un medio de cultivo y condiciones establecidas que se deja evolucionar con el tiempo. La concentración de la biomasa va incrementándose hasta agotar nutrientes y/o la luz llegue a ser limitante. Se ajusta por tanto a las fases de un cultivo microbiano: aclimatación, crecimiento exponencial, fase estacionaria y fase de declive/muerte. Los cultivos continuos se caracterizan por un aporte constante de medio fresco, una mezcla homogénea inmediata y la salida continua de la biomasa generada (Pirt *et al* 1983).

Los cultivos semi-continuos son una situación intermedia donde se realizan diluciones cada cierto tiempo renovando una parte del cultivo mediante el cosechado de parte de la biomasa y la recuperación del volumen con medio fresco (Henrard *et al.*, 2011). Por último, algunas especies de microalgas pueden ser inmovilizadas en distintos tipos de matrices naturales (alginato, carrageno, esponjas de lufa) o artificiales (acrilamida, poliuretano) proporcionando un ambiente estable y protector que permite unas tasas de crecimiento altas así como facilidad para recuperar los posibles productos excretados al medio (Moreno-Garrido, 2008).

2.5. Sistemas de cultivo

Según Brennan y Owende (2010) hoy en día la producción de microalgas fotoautótrofas es la única que se puede realizar a gran escala, de forma que pueda resultar económicamente rentable y viable técnicamente. (Danquah *et al*, 2009; Brennan and Owende, 2010).

En la producción de organismos fotoautótrofos existen 2 diseños básicos: cultivos abiertos, donde la biomasa está expuesta a las condiciones medioambientales; y cerrados, denominados fotobiorreactores o PBR (por sus siglas en inglés), con poco o ningún contacto con el medio externo. Un sistema de cultivo es diseñado en base a diversos criterios: la biología de las especies a cultivar; forma del cultivo; requerimientos nutricionales, lumínicos y resistencia al estrés; relación de la superficie iluminada /volumen del reactor que determina la velocidad de crecimiento; orientación e inclinación; tipo de sistemas de mezcla y dispersión de gases; sistemas de limpieza y de regulación

de la temperatura; transparencia y durabilidad del material; capacidad de escalado. Por último, son también importantes bajos costos de construcción y operación para fines comerciales. La elección del tipo de sistema de cultivo es compleja, siendo importante determinar el tipo y valor del producto final desarrollado a partir de la biomasa, además de la disponibilidad de recursos hídricos y suelo (Hernández-Pérez and Labbé, 2014).

2.6. Producción en masa de microalgas: Uso de canales (raceway) contra fotobiorreactores.

Los canales (raceway ponds), o "estanques de algas de alta tasa de crecimiento" se desarrollaron por primera vez en la década de 1950 para el tratamiento de aguas residuales. Desde la década de 1960, los canales abiertos al aire libre se han utilizado en la producción comercial de microalgas y cianobacterias. Son efectivos y de bajo costo, pero sufren de una productividad relativamente baja debido a caprichos del clima, ya que debe contar con ciertas condiciones como temperatura, pH, oxígeno entre otras para un adecuado funcionamiento. Un raceway es un estanque de recirculación oblongo y poco profundo con **extremos?**. El flujo y la mezcla se generan típicamente mediante una única rueda de paletas que gira lentamente (Chisti, 2012).

Los sistemas de lagunaje de alta carga (HRAP) se empezaron a desarrollar en la década de 1950. Son lagunas de 300-600 cm de profundidad que trabajan en el rango de 4–10 días de tiempo de retención hidráulico. Su poca profundidad favorece el crecimiento de las microalgas, debido a la posibilidad de penetración de la luz en todo el volumen. El agua se impulsa normalmente con una rueda a una velocidad de entre 10 y 30 cm/s, consumiendo el total del sistema hasta 0,57 kWh/kg DBO eliminada. Han sido empleados para tratar efluentes de digestión anaerobia de residuos porcinos, o residuos de acuicultura (Olguín 2003).

Los canales raceway requieren una inversión relativamente baja en capital y, por lo tanto, siguen siendo el sistema de producción de elección a pesar de su baja productividad (Chisti, 2016).

Las principales limitaciones de los sistemas abiertos son: Uno, están expuestas a peligros de contaminación biológica por otras especies de microalgas, bacterias y / o depredadores debido al contacto directo del cultivo con la atmósfera, solo las especies resistentes pueden cultivarse durante largos períodos de tiempo. Dos, es difícil mantener una temperatura óptima aunque los sistemas abiertos están menos sujetos a un sobrecalentamiento que los sistemas cerrados. La concentración relativamente baja de CO₂ en la atmósfera generalmente da como resultado pequeñas concentraciones de carbono disuelto el cual resulta insuficiente para satisfacer las necesidades de los microorganismos fotosintéticos en la producción intensiva de biomasa. Por lo tanto, se puede agregar una fuente de carbono inyectando gas CO₂ (o carbonato químico). Sin embargo, una parte importante del carbono inorgánico disuelto se desgasifica inevitablemente en la atmósfera. En la práctica, esto hace que la limitación del carbono sea difícil de evitar por completo en sistemas abiertos (Morweiser *et al.*, 2010; Pruvost 2011; Pulz 2001; Richmond 2004b; Ugwu *et al.*, 2008).

Los sistemas cerrados, a menudo llamados "fotobiorreactores" (FBR), reducen los riesgos de contaminación externa y proporcionan un mejor control de las condiciones de crecimiento. Se han usado ampliamente para el cultivo de microalgas para una variedad de aplicaciones desde biocombustibles hasta productos de alto valor. La capacidad de cultivar monocultivos de algas con altos rendimientos de biomasa y huellas significativamente más pequeñas ha hecho que los fotobiorreactores sean una tecnología muy atractiva para aplicaciones específicas (Chisti, 2016).

Sin embargo, los FBR también adolecen de varias limitaciones inherentes a sus principios operativos. En primer lugar, la concentración de cultivo aumenta el riesgo de formación de biopelículas en las paredes de FBR. Conduce a la acumulación de oxígeno en el cultivo que puede tener posibles efectos tóxicos sobre el crecimiento fotosintético. También puede causar sobrecalentamiento del cultivo, especialmente bajo radiación solar debido a la gran cantidad de radiación infrarroja absorbida por el medio de cultivo (Carvalho *et al.* 2011; Grobbelaar 2008).

2.7. Producción de biomasa algal a gran escala: Fotobiorreactores.

Los sistemas cerrados de cultivo de microalgas son reactores transparentes, de plástico o vidrio, con geometrías de diverso tipo: tubulares, cilíndricas o planas. Se empezaron a desarrollar con posterioridad a los sistemas de lagunaje y su configuración y geometría dependen de condiciones locales, del producto a obtener y de las especificaciones económicas del sistema (Ruiz, 2011).

Cuadro 2. Distintos tipos de biomasa (Salinas-Callejas and Gasca-Quezada, 2009).

TIPO DE BIOMASA	CARACTERÍSTICA
Biomasa primaria	Es la materia orgánica formada directamente de los seres fotosintéticos. Este grupo comprende la biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas y forestales.
Biomasa secundaria	Es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria. La constituyen la materia fecal o la carne de los animales.
Biomasa terciaria	Es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, por ejemplo los restos y deyecciones de los animales carnívoros que se alimentan de herbívoros.
Biomasa natural	Es la que producen los ecosistemas silvestres; 40% de la biomasa que se produce en la tierra proviene de los océanos.
Biomasa residual	La que se puede extraer de los residuos agrícolas y forestales, y de las actividades humanas.

Cultivos energéticos	Recibe esta denominación cualquier cultivo agrícola cuya finalidad sea suministrar la biomasa para producir biocombustibles
-----------------------------	---

CUADRO 3. Distintos tipos de fotobiorreactores y sus usos

Tipo	Pv	Pa	DC	Aplicación	Referencia
Sistema carrusel	0,18	27	0,4	Producción de biomasa	Richmond, 2000
Plano vertical UADC	9,2	67,8	22,5	Fijación de CO ₂ del aire	Hu <i>et al.</i> , 1998
Plano inclinado ADC	4,3	51,1	8,4	Estudio del efecto de la trayectoria de la luz.	Hu <i>et al.</i> , 1996 b
Plano inclinado UADC	n.d.	n.d.	35	Estudio de la fisiología de los organismos en UADC	Hu <i>et al.</i> , 1996 a
Triangular	n.d.	n.d.	0,275	Remoción de amonio, nitrato y fósforo.	Sylvestre <i>et al.</i> , 1996
Tanque agitado iluminado	n.d.	n.d.	1,2	Remoción de amonio a altas concentraciones	Prosperi, 2000
Tubular horizontal	0,55	n.d.	n.d.	Prototipo de reactores horizontales con mecanismo <i>airlift</i>	Richmond <i>et al.</i> , 1993
Tubular inclinado	1,47	n.d.	n.d.	Con mezcladores estáticos internos	Ugwu <i>et al.</i> , 2002
Tubular helicoidal cónico	n.d.	33,2	n.d.	Prototipo agitado neumáticamente	Morita <i>et al.</i> , 2002
Iluminado cuasi-internamente	n.d.	n.d.	2x10 ⁹	Prototipo de UADC con ultrafiltración e iluminación con diodos	Lee y Palsson, 1994
UADC			cel/ml		
Iluminado internamente	n.d.	n.d.	30	Prototipo de reactores de UADC	Javanmardian y Palsson, 1991
Tubular horizontal ADC	1,6	27	4,8	Prototipo de producción de biomasa	Richmond, 2000
Plano vertical ADC	2,4	66	6	Prototipo de producción de biomasa	Richmond, 2000

Plano inclinado ADC	0,9	110	2,2	Prototipo de producción de biomasa	Richmond, 2000
Tubular horizontal ADC	n.d.	30	6,5	Producción de biomasa	Gudin y Chaumont, 1991
Plano horizontal	n.d.	30	2	Producción de biomasa	Gudin y Chaumont, 1983
Plano vertical	1,93	n.d.	n.d.	Estudios de fotoinhibición en diferentes geometrías	Tredici y Zitteli, 1998
Serpentín vertical	1,64	n.d.	n.d.	Estudios de fotoinhibición en diferentes geometrías	Tredici y Zitteli, 1998
Serpentín horizontal	0,9	n.d.	n.d.	Estudios de fotoinhibición en diferentes geometrías	Tredici y Zitteli, 1998
Airlift	0,34	n.d.	n.d.	Estudio y caracterización de reactores <i>airlift</i> .	Sánchez <i>et al.</i> , 2000

Pv: productividad volumétrica (g/l·día), Pa: productividad por área (g/m²·día) salvo donde se indique, DC: densidad celular máxima alcanzada (g/l), ADC: alta densidad celular, UADC: ultra alta densidad celular.

De acuerdo a la experiencia con el diseño de fotobiorreactores, deben de tomarse en cuenta los siguientes aspectos en su construcción (Merchuk y Wu, 2002):

1. Un exceso en la intensidad luminosa puede mermar el índice de crecimiento del cultivo, a veces de manera drástica. Así es como ocurre la fotoinhibición, donde la energía administrada ya no se aprovecha.
2. Un exceso de iluminación provoca que el crecimiento de la biomasa se detenga, hasta llegar a un punto en el que el fotobiorreactor es improductivo por completo.
3. El flujo luminoso que produce sensibilidad a la fotoinhibición depende de la concentración de la biomasa en virtud del fenómeno de absorción y dispersión de las células.
4. En ausencia de la luz, la biomasa puede decrecer.
5. El mezclado o circulación (del medio de cultivo) tiene gran influencia en el índice de crecimiento del producto.

2.7.1. Ingeniería de biorreactores y reglas de escalamiento

Escalamiento significa un cambio en la escala de volumen de proceso. Este cambio generalmente viene acompañado de dificultades debido a que muchos de los parámetros de proceso se encuentran directamente relacionados con el tamaño y geometría del reactor. El objetivo principal es cambiar la escala de una reacción biológica aumentando o disminuyendo el volumen de trabajo, evitando que se reduzca su productividad (Parra, 2004).

El diseño de foto-biorreactores (FBR) para el cultivo en masa exterior de microalgas determina la distribución de irradiación solar entre células en el cultivo, modo de agitación, eficiencia de la transferencia de masa y consumo de energía, estos determinan la productividad del sistema y los costos de producción. Se ha propuesto el concepto de foto-biorreactor flotante con capacidad rotatoria. Además se ha utilizado la microalga *Dunaliella tertiolecta*, como se muestra en el modelo algal Figura 4. Con la máxima concentración celular (8.38×10^6 células mL⁻¹), logrando una producción de biomasa y eficiencia fotosintética de 3.10 g m⁻²d⁻¹ y 4.61% de relación fotosintética activa, respectivamente (Huang *et al.*, 2016).

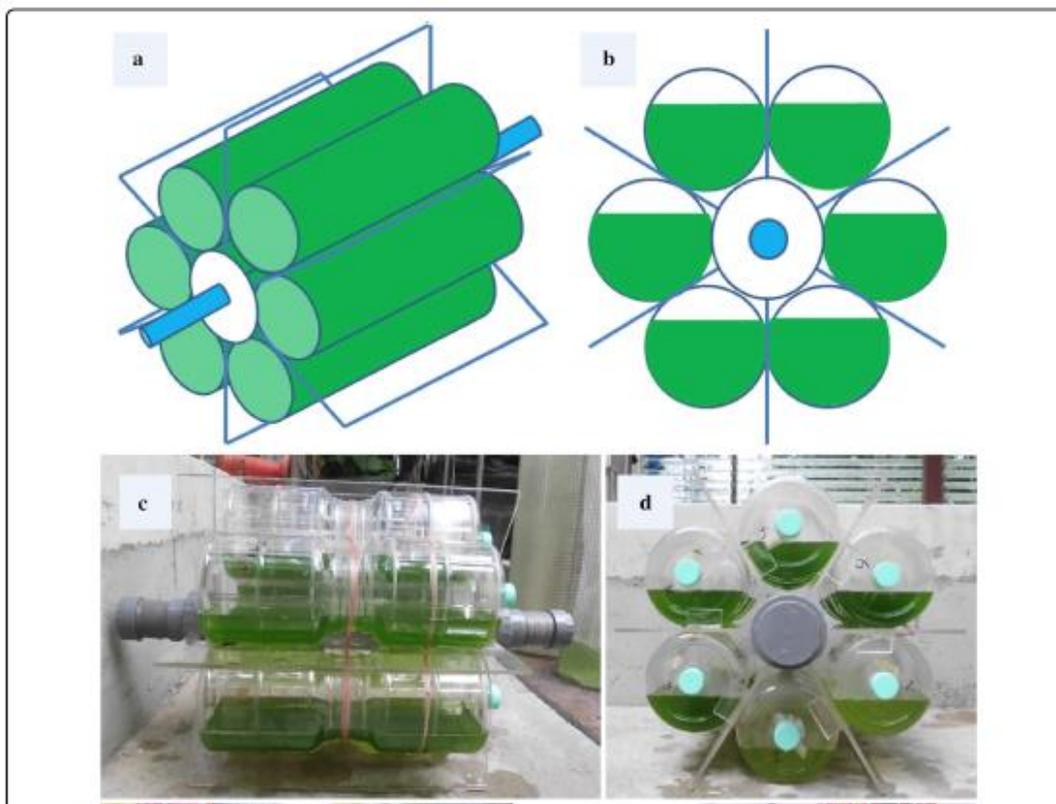


Figura 4. Diagrama esquemático del fotobiorreactor flotante. **a.** Diagrama tridimensional esquemático del FBR flotante rotatorio. **b.** sección transversal de la representación esquemática del FBR. **c.** Vista lateral del FBR flotante lleno con cultivo. **d.** Vista frontal de FBR lleno de cultivo (Huang *et al.*, 2016).

2.8. Cosecha de biomasa de microalgas

La biomasa de microalgas ha sido reconocida como una fuente alternativa prometedora de materia prima, pero la falta de un método económico y eficiente para cosechar biomasa de algas es un inconveniente importante para impulsar su aplicación a gran escala (Greenwell *et al.*, 2010).

Cuadro 4. Clasificación métodos de escalamiento primera clasificación

PRIMERA CLASIFICACIÓN

Método Fenomenológico	Tiene como eje principal la fundamentación con razonamiento teórico, pero de tipo microscópico sin involucrar consideraciones moleculares.
Método Empírico	Se postula sin bases teóricas y se espera solamente que ajuste la interacción entre los datos en el rango o intervalo de experimentación.
Método de Similitud	Obtenido a partir de un análisis de similitud con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico, etc. Busca la relación existente entre sistemas físicos y el tamaño de los mismos. Caracterizados por cualidades independientes entre sí como: tamaño, forma y composición.

Cuadro 5. Clasificación de métodos de escalamiento

SEGUNDA CLASIFICACION

Método Fundamental	Implica la solución de micro-balances de transferencia de momentum, masa y de calor. Por lo general contempla sistemas de ecuaciones complejas.
Método Semi-Fundamental	Establecido en los mismos principios del fundamental, pero con consideraciones menos estrictas. Basa el escalamiento en modelos de flujo simplificados.
Método de Análisis Dimensional y de Régimen	Las dimensiones son obtenidas por ecuaciones de balance dimensional o por principios de similitud. La

similaridad es muy difícil de lograr en el caso de reacciones microbiológicas en diferentes escalas, específicamente lo relacionado con la similaridad hidrodinámica y la química.

En la producción, su separación del medio de cultivo supone entre el 20 y 30% del coste total (Molina Grima 2003). Esto significa que esta etapa es determinante en la economía y en el balance energético del proceso.

La técnica de separación depende de la microalga en cuestión, la densidad del cultivo, el uso posterior y factores económicos como el precio del subproducto obtenido. En general, tiene lugar en dos etapas: en una primera etapa se produce una separación más basta en la que se alcanza una concentración de microalgas entre el 2 y 7%. Se puede realizar por floculación, sedimentación por gravedad o flotación. En una segunda etapa se realiza un secado más fino y de mayor coste energético, mediante centrifugación, filtración o ultrasonidos (Ruiz, 2011; Chen *et al*, 2011).

La tecnología de membranas es generalmente más barata que la aplicación de centrifugas y se sabe que no consume mucha energía. Por lo tanto, constituye una tecnología muy prometedora para la cosecha de algas y ofrece además las ventajas de la retención casi completa de biomasa (Mouchet y Bonnelye, 1998).

2.9. Aplicación de microalgas al tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales con cultivos de microalgas tiene la gran ventaja de producir biomasa al mismo tiempo que es efectivo en la eliminación de nutrientes (C, N y P), bacterias coliformes, metales pesados y la reducción de la demanda de oxígeno químico y biológico, la eliminación y / o degradación de compuestos xenobióticos y otros contaminantes. Puede valorizarse para producir bioenergía o moléculas de interés. Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales a base de microalgas han existido durante mucho tiempo; sin embargo, la adopción de la tecnología hasta la fecha ha sido

limitada principalmente debido a consideraciones de requerimientos de tierra y volúmenes de aguas residuales a tratar (Rawat *et al.*, 2016; Christenson and Sims, 2011; Vandamme *et al.*, 2009).

Regresando al contexto del tratamiento de aguas residuales, solo se pueden aplicar técnicas de bajo costo capaces de gestionar grandes volúmenes de agua y biomasa, como la coagulación-floculación seguida de una separación sólido / líquido. De hecho, la coagulación, la floculación y la sedimentación pueden conducir a una concentración sólida en la biomasa de microalgas del 1 al 5% p / p, que es apropiada para procesos posteriores como la producción de biogás (Smith and Davis, 2012).

De acuerdo con López-Hernández *et al.* (2016), evaluaron el uso de fotobiorreactores, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas en Torreón, Coahuila, México. Se logró una alta remoción de la demanda química de oxígeno del 98.1, 97.7 y 93.5% para T1, T2 y T3, mientras que para N y P (87.5, 78.9, 88.6, 73.7, 85.5 y 89.5%) y la reducción de la conductividad eléctrica de 25, 32.2 y 11.4% respectivamente. Los fotobiorreactores generaron al final del experimento: agua para reusó y biomasa con importante contenido de proteína.

Más de 80% de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descargan sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras (Scott *et al.*, 2004). En México se genera 6.7 Km³ de aguas residuales, con una cobertura de tratamiento de 47.5% (SEMARNAT, 2015). Un porcentaje importante del agua que se trata se realiza de manera deficiente, siendo poca el agua disponible para reutilizarse y resulta de baja calidad (Mahapatra *et al.*, 2013). Existen normas internacionales que regulan la calidad de las aguas residuales para su reuso en la agricultura, sin embargo, algunos países no tienen implementadas aún normas propias (Veliz *et al.*, 2009).

Cuadro 6. Microalgas empleadas en la degradación de diversos contaminante de aguas residuales (Fathi *et al.*, 2013).

Microalgas	Tipos de aguas residuales
<i>Protothecazopfi</i>	Hidrocarburos derivados del petróleo
<i>Chlorellapyrenoidosa</i>	Tintes azoicos en aguas residuales
<i>Chlorellasp.</i>	Residuos de ganadería digeridos anaeróbica.
<i>Ankistrodesmus</i> y <i>Scenedesmus</i>	Aguas residuales de industria del papel y alperujos
<i>Spirulinaplatis</i>	Agua residual urbana
<i>Chlorellasokoniana</i>	Agua residual en heterotrofia sin luz
<i>Botryococcusbraunii</i>	Agua residual tras tratamiento secundario
<i>Scenedesmus</i>	Altos niveles de amonio en efluente de digestión anaerobia

El cultivo de microalgas tiene aplicaciones prácticas significativas a corto plazo, porque permite eliminar nutrientes (nitrógeno y fósforo) de manera eficiente y por lo tanto puede desempeñar un papel importante en el tratamiento terciario de aguas residuales (Arbib *et al.*, 2013).

2.9.1. Fitorremediación

La fitorremediación se define en general como la utilización de algas para la eliminación de contaminantes del agua, las microalgas poseen dicha capacidad que consiste en la eliminación o biotransformación de contaminantes, este tratamiento de aguas residuales de algas es efectivo en la eliminación de nutrientes (C, N y P), bacterias coliformes, metales pesados y la reducción de la demanda de oxígeno químico y biológico, la eliminación y / o degradación de compuestos xenobióticos y otros contaminantes, estos compuestos son captados por la biomasa algal y pueden ser recuperados mediante su cosecha. Esta capacidad resulta en un sistema de cultivo con 2 propósitos: eliminación de contaminantes y producción de biomasa con fines comerciales (Hernández y Labbé, 2014).

Un cultivo para fitorremediación debe cumplir con 3 condiciones: alta tasa de crecimiento; alta tolerancia a la variación estacional y diurna si es un sistema abierto; y

buena capacidad para formar agregados para una cosecha por simple gravedad (Park *et al.*, 2011b).

Además, altos niveles de componentes celulares valiosos (por ejemplo lípidos para generación de biodiesel) también podrían ser deseables (Martínez 2008, Park *et al.*, 2011a, Abdel-Raouf *et al.*, 2012).

2.10. Producción industrial y subproductos de valor.

La biomasa algal tiene una amplia utilización que va desde biofertilizante a producción de biocombustibles, también para alimentación animal y humana, y para la obtención de productos biotecnológicos con uso en medicina, alimentación, farmacia y/o cosmética (Gómez 2007, Brennan y Owende 2010, Flotats *et al.*, 2011)

Los productos culinarios conocidos incluyen Nori, Wakame, Kombu y Dulse, a partir de biomasa de macroalgas entera. Las microalgas Spirulina y Chlorella se han comercializado ampliamente como suplementos nutricionales para humanos y animales. Varias microalgas con un alto valor nutricional y contenido energético se cultivan comercialmente como alimento para la acuicultura, dentro de los pigmentos extraídos de algas incluyen β caroteno, astaxantina y ficobiliproteínas. Estos se utilizan generalmente como colorantes alimentarios, como aditivos en la alimentación animal o como nutracéuticos por sus propiedades (Griffiths *et al.*, 2016).

La biotecnología de microalgas es una industria mucho más nueva. La espirulina, posiblemente el producto de microalgas más conocido, ha sido recolectada y consumida por los aztecas y la gente de África Central durante siglos, sin embargo, la producción comercial en estanques artificiales solo comenzó en 1978 (Belay 1997).

2.11.1. *Chlorella*

Chlorella vive en hábitats múltiples, como agua dulce, agua de mar y solanáceas, se reproduce a sí misma a través de la producción de autosporas asexuales. Presenta un alto contenido de proteínas (hasta 70% del peso seco de las células) además de ser rico en minerales, vitaminas y carotenoides también ha convertido a la *Chlorella* en un sustituto nutricional ideal para el ser humano y animales. También posee la capacidad de sintetizar grandes cantidades (hasta el 50% del peso seco) de lípidos neutros de almacenamiento principalmente en forma de triacilglicerol (TAG) bajo condiciones de estrés (por ejemplo, alta deficiencia de luz o nitrógeno), lo que lo convierte en un organismo candidato prometedor para los biocombustibles a base de lípidos (Liu and Hu, 2013). La biomasa de *Chlorella* puede consistir en 10-15% de carbohidratos y 12-15% de lípidos cuando se cultiva en condiciones de cultivo favorables. Los lípidos principales encontrados en *Chlorella* contienen grupos acilo grasos C16 y C18, que incluyen C16: 0, C16: 2, C18: 1, C18: 2 y C18: 3 (Sansawa y Endo, 2004; Lin, 2005; Xiong *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010).

2.11.2. *Arthrospira (Spirulina) platensis.*

Existe evidencia histórica que sugiere que la Spirulina se usó como alimento en México durante la época de la conquista española bajo el nombre de "tecuitlatl". De hecho, la primera producción comercial de Spirulina comenzó con la cosecha de la proliferación seminatural constante de Spirulina (*Arthrospira*) maxima del lago Texcoco, cerca de la ciudad de México, comenzando en los años 1970. Todavía se cultiva entre la población kanembu de Chad (Abdulqader *et al.*, 2000).

La cianobacteria comestible *Arthrospira* (*Spirulina*) ha atraído la atención debido a su uso tradicional como alimento y producción y aplicación comercial a gran escala en la actualidad como alimentos, alimentos funcionales, suplementos dietéticos, nutracéuticos y alimentos para animales, la producción comercial de Spirulina implica al menos cuatro pasos: (1) cultivar las algas, (2) cosechar la biomasa, (3) secar la biomasa y (4) empacar la biomasa. Cada uno de estos procesos es importante en la producción de aspirulina de alta calidad, la temperatura óptima para el crecimiento de *Arthrospira* (*Spirulina*) es de

35-38 ° C y la temperatura mínima para mantener el crecimiento es de 15-20 ° C (Belay, 2013).

La producción industrial a gran escala de *Spirulina* utiliza estanques de alcantarillado en su mayoría abiertos o, a veces, cubiertos en invernaderos. Una pequeña cantidad de *Spirulina* también se produce directamente a partir de lagos naturales (Thein, 1993).

Los principales beneficios de salud potenciales son los efectos antioxidantes, la regulación de la inmunidad y la reducción de las condiciones inflamatorias asociadas con el estrés oxidativo (Gershwin y Belay, 2008).

2.11.3. *Dunaliella*.

Pertenece a clase *Clorophyceae*, es una célula verde-amarillo, posee 2 flagelos móviles, de forma ovoide con el extremo anterior agudo y el posterior redondo. Miden entre 9 y 11 micras de largo y 6 micras de diámetro. Es un alga eurihalina que crece a temperaturas de 16 a 28°C, aunque se adapta a salinidades altas e iluminación constante. *Dunaliella* tolera pH's de entre 5.5-10, siendo 7 el óptimo (López-Elías y col., 2004), sin embargo el pH óptimo para la producción de β -caroteno por *Dunaliella salina* es pH=9 y presenta una amplia tolerancia a la 5 temperatura, siendo la óptima entre 20 y 40° C. (Sánchez-Varo, 2000).

Dunaliella salina se considera como un alimento adecuado para moluscos, algunos peces de agua dulce y crustáceos, es la especie más utilizada en la producción industrial de β -caroteno, es el organismo eucariótico tolerante a la sal más conocido, y puede crecer en un intervalo de salinidad de aproximadamente 10% a 35% (p / v) de NaCl (= saturación de NaCl) (M. A. Borowitzka y L. J. Borowitzka, 1988).

Además de lo ya mencionado anteriormente, es la principal fuente natural del carotenoide β -caroteno. La producción comercial de este alga como fuente de β -caroteno ha ocurrido desde la década de 1980, y actualmente hay grandes plantas de producción de *D. salina* en Australia e Israel (Borowitzka, 2013).

Los productos de β -caroteno de *Dunaliella* disponibles incluyen soluciones de β -caroteno en aceite, suspensiones de cristal de β -caroteno (trans- β -caroteno) en aceite (por ejemplo, aceite de soja o canola) y polvos de β -caroteno dispersables en agua. Aquí la biomasa de algas se seca en tambor, se estabiliza con antioxidantes y se vende como un suplemento nutricional rico en β -caroteno para la nutrición humana o como un aditivo para alimentación animal, como pigmentador en alimento de langostino. El secado por pulverización de la biomasa de algas también es posible para producir un producto rico en β -caroteno (Leach *et al.*, 1998).

2.11.4. *Haematococcus*.

El cultivo masivo de *Haematococcus pluvialis* disponible comercialmente y astaxanurado de *H. pluvialis* se utiliza como producto químico para la salud humana y como agente de acolización para la acuicultura. Sin embargo, la industria de *Haematococcus* solo ha logrado un éxito moderado debido a la baja productividad de astaxantina y el alto costo de producción asociado con los sistemas y procesos de cultura masiva (Han *et al* 2013).

La astaxantina se aplica como un agente de protección contra las enfermedades asociadas a radicales libres que incluyen a los carenados orales, colon y hepático, enfermedades cardiovasculares como la esclerosis y enfermedades oculares degenerativas como la catarata (Lorenz & Cysewski, 2000; Guerinet al., 2003).

El comercial como taxanth en el mercado está dominado por la astaxantina sintética. El valor de mercado total de astaxantina es más de \$ 240 millones por año. El costo estimado de producción es de aproximadamente \$ 1000 por kg, mientras que el precio del mercado de astaxantina es superior a \$ 2000 por kg (Misawa, 2009; Li *et al.*, 2011).

2.11.5. Nostoc.

Nostoc es un género de cianobacterias hereditarias y heterocistas que se ha utilizado como suplementos dietéticos durante siglos. Se han recogido varias especies comestibles (es decir, *N. commune*, *N. sphaeroides* y *N. fl agelliforme*) de diversos hábitats naturales para uso humano. Recientemente, se ha caracterizado el valor nutricional de la especie comestible Nostoc y varios estudios farmacológicos sugieren que Nostoc contiene una variedad de compuestos bioactivos con funciones antitumorales, antioxidantes o antiinflamatorias (Danxiang *et al.*, 2013).

2.12. Microalgas en la nutrición animal y humana.

El gran potencial de las microalgas marinas para aplicaciones, como tales o como extractos, en áreas tan diversas como la nutrición humana y la alimentación en acuicultura, como biofertilizantes y en el tratamiento de efluentes, como agentes antiinflamatorios, antialérgicos y analgésicos, entre otros, fue recientemente revisado (Raposo *et al.*, 2013).

Las algas contienen constituyentes adicionales que contienen nitrógeno, por ejemplo, ácidos nucleicos, aminos, glucosamidas y materiales de pared celular. Recientemente se ha publicado una investigación sobre el rendimiento, la digestibilidad y los parámetros séricos de terneros alimentados con raciones que contienen diferentes cantidades de *Spirulina* de Irán (Heidarpour *et al.*, 2011).

2.12.1. Uso Animal.

Estudios en cerdos indican que la biomasa de microalgas en general es un ingrediente de alimentación de calidad nutricional aceptable y adecuada para la cría de cerdos. No se reportaron serias dificultades en la aceptabilidad de las algas. Las algas pueden reemplazar a las proteínas convencionales como la harina de soya o harina de pescado hasta cierto punto (Becker, 2013).

2.12.2. Uso Humano.

Se ha generado una diversidad de informes sobre los beneficios para la salud de consumir predominantemente *Spirulina* y *Chlorella*. El uso principal de éstas y otras microalgas todavía es como suplemento alimenticio. (Becker, 2013). También algunas especies se comercializan por su valor medicinal, como *Chlorella* que protege contra la insuficiencia renal y promoción del crecimiento de *Lactobacillus* intestinales. Además favorece la disminución en concentraciones de colesterol sanguíneo. En cambio *Dunaliella* se comercializa por su contenido de β -caroteno (Morris, 2014).

Entre los beneficios citados del consumo de *Chlorella*, se encuentran el tratamiento de úlceras gástricas, acción preventiva frente a la arterioesclerosis e hipercolesterol y actividad antitumoral. La *Spirulina* (*Arthrospira*) se utiliza debido a su elevado contenido proteico y su excelente valor nutricional; también es una fuente esencial de ácidos grasos y ácido linoleico que no pueden sintetizar los humanos (Hernández and Labbe, 2014).

En los últimos años, se han desarrollado procesos para el aislamiento de una serie de constituyentes de alto valor a partir de algas, incluidos pigmentos, enzimas, ácidos grasos, fenoles, etc. *Porphyridium* y *Rhodella* (rodophytes), y cianobacterias, como *Arthrospira*, pueden producir polisacáridos sulfatados, que ya han encontrado aplicación como agentes antivirales, in vivo o in vitro (Huleihel *et al.*, 2002), pero también como nutracéuticos (Dvir *et al.*, 2009), como agentes para prevenir el crecimiento de células tumorales (Gardeva *et al.*, 2009), como terapéuticos (Arad y Atar, 2007; Guzman *et al.*, 2003), o incluso como intercambiadores de iones (Lupescu *et al.*, 1991) y reductores de arrastre (Gasljevic *et al.*, 2008).

2.13. Producción de metano e hidrógeno por microalgas.

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en ausencia de oxígeno. Consiste en una descomposición de los componentes orgánicos complejos en componentes más simples y químicamente estables gracias a la acción de los microorganismos, en el caso de las microalgas se produce una reacción de oxidación donde la materia orgánica se digiere para transformarse en metano, dióxido de carbono y amonio, Como producto se

obtiene un residuo orgánico estabilizado y biogás, compuesto aproximadamente por 60-75 % de metano y 25-40 % de dióxido de carbono (González, 2016).

Biotecnología de la producción de hidrógeno

Las microalgas son capaces de recolectar energía solar, mientras convierten el CO₂ y el agua fotosintéticamente en macromoléculas orgánicas por ejemplo, Carbohidratos, proteínas y lípidos. Más específicamente, las microalgas (a) pueden producir rendimientos de biomasa mucho más altos que los cultivos tradicionales, (b) tienen una huella global mucho menor para la producción de H₂ utilizando procesos fotosintéticos directos (sin una etapa de biomasa intermedia); (c) puede usar desechos, solución salina o agua de mar, minimizando el uso de agua dulce; (e) puede reciclar los residuos de CO₂ de las fuentes de emisión industriales (incluidas las plantas de bioetanol); y (f) son susceptibles a la producción integrada de coproductos junto con combustibles y precursores de combustible (Torzillo and Seibert, 2013).

El descubrimiento de la técnica de inanición de azufre en *C. reinhardtii* (Melis *et al.*, 2000) representó un modelo efectivo para examinar la biotecnología de la fotoproducción de H₂ de algas, ya que ha permitido mantener el proceso durante un tiempo suficientemente largo para optimizar las condiciones de cultivo para maximizar su producción.

Se han llevado a cabo una serie de estudios para mejorar y prolongar el proceso de producción de H₂, como los exámenes de los efectos de (1) bajas cantidades residuales de azufre al inicio del experimento (Laurinavichene *et al.*, 2002); (2) volver a agregar cantidades limitantes de sulfuro al medio de cultivo en el medio de la fase de producción de H₂ (Kosourov *et al.*, 2005); (3) utilizando cultivos sincronizados con la luz (Tsygankovetal., 2002); (4) el pH inicial del medio (Kosourovetal., 2003); (5) el uso de diferentes condiciones de crecimiento (Kosourov *et al.*, 2007); y (6) intensidad de luz en su producción (Hahn *et al.*, 2004; Laurinavichene *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2006; Tsygankov *et al.*, 2006). También se logró un aumento cultivando células de *C. reinhardtii* en aguas residuales caracterizadas por altas relaciones C/N (Faraloni *et al.*, 2011).

2.14. biorremediación por microalgas. Purificación del agua.

Los sistemas de tratamiento natural, como los estanques de oxidación, se usan comúnmente en comunidades con mucha tierra disponible. Estos sistemas son más eficientes en climas moderados y calientes, y se considera uno de los métodos más efectivos, confiables y fáciles de operar para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, La singularidad del estanque de estabilización radica en su modo de oxigenación, que depende de la fotosíntesis de las algas. Esta dependencia de la fotosíntesis de algas para la oxigenación exige parámetros de diseño específicos y una comprensión justa de la fisiología de las algas y, en consecuencia, regímenes de tratamiento especiales destinados a permitir a la población de algas llevar a cabo la fotosíntesis y la oxigenación óptimas (Brenner and Abeliovich, 2013).

Otra opción es el uso de fotobiorreactores con microalgas nativas los cuales han demostrado que en cuatro días son capaces de reducir los contenidos de CF por debajo de 240 NMP cumpliendo así con la norma oficial mexicana (SEMARNAT, 2014) permitiendo que el agua pueda ser aplicada en actividades de reuso (López *et al.*, 2016).

2.15. Compuestos bioactivos en microalgas.

Las microalgas se mantienen como los principales productores primarios de ecosistemas acuáticos (Hoek *et al.*, 1995). Como grupo, pueden hacer frente a temperaturas altas y bajas, intensidades de luz subóptimas y supraóptimas, baja disponibilidad de nutrientes esenciales y otros recursos. Las microalgas tienen, además, una ventaja sobre muchos otros organismos en el sentido de que pueden cultivarse convenientemente para la producción y el procesamiento de los compuestos deseables. La búsqueda de químicos bioactivos a partir de microalgas es cada vez más prometedora.

Una variedad extraordinaria de compuestos bioactivos y biotecnológicamente relevantes es producida por microalgas y cianobacterias. El interés en estos nuevos metabolitos se ha incrementado debido a la creciente demanda de productos farmacéuticos nuevos y alternativas a los combustibles y productos químicos derivados del petróleo. Para aprovechar de manera efectiva estos productos químicos exclusivos de microalgas, uno

debe saber no solo cómo se pueden usar, sino también dónde se encuentran y, finalmente, cómo se producen (Cameron *et al.*,2013).

2.16. Consideraciones

Las microalgas podrían ser un agente de cambio en el panorama del tratamiento de aguas residuales y extracción de biomasa gracias a la información obtenida, posee una amplia gama de aplicaciones en diversas ramas de la industria, además de representar una opción como alimento tanto humano como animal por las propiedades que posee la biomasa de estas, podría llegar a funcionar como alternativa de cultivo pues el costo de producción es relativamente bajo y se usan microalgas nativas que facilitan la adaptación y producción del cultivo en cuestión, siendo amigable con el ambiente pues su producción trae consigo la reducción del CO₂ gracias al metabolismo y procesos ficoquímicos que dan como resultado la liberación de oxígeno.

Conclusiones

Al final de este trabajo puedo concluir que las microalgas representan una gran opción no solo para la industria alimenticia, farmacéutica o energética gracias a los subproductos que se obtienen a partir de su biomasa, sino que el bajo costo que representa la producción en sí el mismo cultivo y la gran gama de aplicaciones que estas poseen, además resultan ser una opción efectiva en el tratamiento de aguas residuales eliminando diversos contaminantes como metales pesados, bacterias y otras sustancias, gracias a la acción fito-remediadora que realizan estas. Por lo tanto las microalgas resultan ser una opción de estudio muy interesante hoy en día.

Referencias.

- Abalde, J. y C, Herrero. 2004. Microalgas en acuicultura: calidad nutricional. ALGAS 32 Diciembre de 2004. 40pp: p 16-18.
- Abdel-Raouf N, AA Al-Homaidan & IBM Ibraheem. 2012. Microalgae and wastewater treatment. Saudi Journal of Biological Sciences 19: 257-275.
- Abdulqader, G., Barsanti, L. & Tredici, M.R. 2000. Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kosorom (Chad) and its household usage among the Kanembu. J. Appl. Phycol. 12: 493–498.
- Anaya-Durand, A. Y H. Pedroza-Flores. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, El Paso entre el huevo y la gallina. En: Tecnología, Ciencia, Educación. vol. 23, no. 001, p. 32
- Anderson, R.A. 2013. The microalgal cell, In: Richmond, A., Hu, Q. (Eds.) Microalgal Culture: Applied phycology and biotechnology. Wiley Blackwell, Hoboken, NJ, 3-20.
- Arad S(M), Atar D. 2007. Viscosupplementation with algal polysaccharides in the treatment of arthritis. Patent no WO/2007/066340 (Ben Gurion University of the Negev Research and Development Authority), Minneapolis, MN USA.
- Arbib, Z., Ruiz, J., Álvarez-Díaz, P., Garrido-Pérez, C., Barragan, J., & Perales, J. A. (2013). Long Term Outdoor Operation of a Tubular Airlift Pilot Photobioreactor and a High Rate Algal Pond as Tertiary Treatment of Urban Wastewater. Ecological Engineering, 52, 143-153.
- Bajpai, R., Zappi, M., Dufreche, S., Subramaniam, R. y Prokop, A. 2014. Status of algae as vehicles for commercial production of fuels and chemicals, In: Bajpai, R., Zappi, M., Prokop, A. (Eds.) Algal Biorefineries. Volume 1: Cultivation of Cells and Products. Springer, New York. USA, 3-24.
- Belay, A. 1997. Mass culture of *Spirulina* (*Arthrospira*) outdoors—The Earthrise Farms Experience. In A. Vonshak (Ed.), *Spirulina platensis* (*Arthrospira*): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology (pp. 131–158). London: Taylor and Francis.
- Belay, A. 2013. Biology and Industrial Production of *Arthrospira* (*Spirulina*) in Handbook of Microalgal Culture Applied Phycology and Biotechnology. Second Edition. Pages 339–358.
- Bermúdez J.L., G. Sánchez., G. Fuenmayor & E. Morales. 2003. Efecto de la fuente de carbono sobre el crecimiento y producción de pigmentos de la microalga marina *Chroomonas* sp. Ciencia 11 (4): 265-269.

- Borowitzka, M.A. & Borowitzka, L.J. 1988. *Dunaliella*. In: *Micro-algal Biotechnology* (eds M.A. Borowitzka & L.J. Borowitzka), pp. 27–58. Cambridge University Press, Cambridge.
- Borowitzka, M.A., 2013. High-value products from microalgae-their development and commercialisation. *J. Appl. Phycol.* 25, 743-756.
- Borowitzka, M.A. 2013. *Dunaliella*: Biology, Production, and Markets in *Handbook of Microalgal Culture Applied Phycology and Biotechnology*. Second Edition. Pages 359–368.
- Brennan, L. And P. Owende. 2010. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14. 557–577.
- Brenner, A. And A. Abeliovich. 2013. Water Purification: Algae in Wastewater Oxidation Ponds in *Handbook of Microalgal Culture Applied Phycology and Biotechnology*. Second Edition. Pages 595–601.
- Carney, L.T. y Lane, T.W., 2014. Parasites in algae mass culture. *Front Microbiol* 5, 278.
- Carvalho, A. P., Silva, S. O., Baptista, J. M., & Malcata, F. X. (2011). Light requirements in microalgal photobioreactors: An overview of biophotonic aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89, 88.
- Chen, C.Y., K.L. Yeh, R. Aisyah, D.J. Lee & J.S. Chang. 2011. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review, *Bioresour. Technol.* 102. 71–81.
- Chisti, Y. 2012. Raceways-based production of algal crude oil. In: C. Posten & C. Walter (Eds.), *Microalgal biotechnology: Potential and production* (pp. 113–146). de Gruyter, Berlin.
- Christenson, L., R. Sims. 2011. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts, *Biotechnol. Adv.* 29.686–702.
- CONAGUA. 2007. Programa Nacional Hídrico 2007 - 2012. México. D.F Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. 2014. Plan Nacional de Desarrollo 2013 - 2018 México., D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Contreras-Flores C, J Peña-Castro, L Flores-Cotera & R Cañizares-Villanueva. 2003. Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia* 28(8): 450-456.
- Danxiang, H., D. Zhongyang, L. Fan & H. Zhengyu. 2013. Biology and Biotechnology of Edible *Nostoc* in *Handbook of Microalgal Culture Applied Phycology and Biotechnology*. Second Edition. Pages 433–444.

- Danquah, M.K., L. Ang, N. Uduman, N. Moheimani & G.M. Fordea. 2009. Dewatering of microalgal culture for biodiesel production: exploring polymer flocculation and tangential flow filtration, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 84:1078–1083.
- Demirbas, A., Dermibas, M.F., 2011. " Importance of algae oil as a source of biodisel ". *Energy Conversion and Management* 52, 163-170.
- Dvir I, Stark AH, Chayoth R, Madar Z, Arad S(M). 2009. Hypocholesterolemic effects of nutraceuticals produced from the red microalga *Porphyridium* sp in rats. *Nutr* ;1:156–67.
- Faraloni, C., Ena, A., Pintucci, C. & Torzillo, G. (2011) Enhanced hydrogen production by means of sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii* cultures grown in pre-treated olive mill waste water. *Int. J. Hydrogen Energy* 36: 5920– 5931.
- Flotats X, HL Foged, AB Blasi, J Palatsi, A Magri & KM Schelde. 2011. Manure Processing Activities in Europe Project reference: ENV.B.1/ETU/2010/0007 Manure Processing Technologies. Technical Report 2, European Commission, Directorate-General Environment, 184 pp.
- García Gozalbes, C. C., Arbib, Z. y Perales-Vargas-Machuca, J. A. (Febrero de 2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnol. Ciencias Agua*. VI: 49-68
- Gardeva E, Toshkova R, Minkova K, Gigova L. 2009. Cancer protective action of polysaccharide derived from microalga *Porphyridium cruentum* — a biological background. *Biotechnol Equip*;23(2):783–7.
- Gasljevic K, Hall K, Chapman D, Matthys EF. 2008. Drag-reducing polysaccharides from marine microalgae: species productivity and drag reduction effectiveness. *J Appl Phycol* ;20:299–310.
- Gershwin, M.E.&Belay, A.(eds)(2008)*Spirulinain Human Nutrition and Health*. 312 pp. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Gómez L. 2007. Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química* 19(2): 3-20.
- González, A. 2016. Producción de biogás a partir de Microalgas y Cianobacterias: Efecto de los pretratamientos térmico y alcalino. Barcelona, España. P 23
- Greenwell, H.C., Laurens, L.M.L., Shields, R.J., Lovitt, R.W., Flynn, K.J., 2010. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *J. R. Soc. Interface* 7, 703–726.

- Griffiths, M., S. Harrison., M. Smit and D. Maharajh. 2016. Major Commercial Products from Micro- and Macroalgae in Book *Algae Biotechnology Products and Processes*. Pages 269-300.
- Grima EM, Belarbi E-H, Fernández FGA. 2003 Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnol.*;20 (7–8):491–515.
- Grobbelaar, J. U. 2008. Factors governing algal growth in photobioreactors: the “open” versus “closed” debate. *Journal of Applied Phycology*, 21, 489–492.
- Grobbelaar, J. U. 2004. Mineral Nutrition. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology* Edited by Amos Richmond Copyright © 2004 by Blackwell Publishing Ltd. Page 98.
- Guerin, M., Huntley, M.E. & Olaizola, M. 2003. Haematococcus astaxanthin: applications for human health and nutrition. *Trends Biotechnol.* 21: 210–216.
- Guzman S, Gato A, Lamela M, Freire-Garabal M, Calleja JM. 2003. Anti-inflammatory and immunomodulatory activities of polysaccharide from *Chlorella stigmatophora* and *Phaeodactylum tricornutum*. *Phytother Res*; 17: 665–70.
- Han, D., Y Li. & Q. Hu. 2013. Biology and Commercial Aspects of *Haematococcus pluvialis*, Production, and Markets in *Handbook of Microalgal Culture Applied Phycology and Biotechnology*. Second Edition. Pages 388–405.
- Hahn, J.J., Ghirardi, M.L. & Jacoby, W.A. (2004) Effects of process variables on photosynthesis algal hydrogen production. *Biotechnol. Bioeng.* 20: 989–99
- Henrard, A. A., M. G. de Moraes, J. A. Costa (2011). "Vertical tubular photobioreactor for semicontinuous culture of *Cyanobium* sp." *Bioresource technology* 102(7): 4897-4900.
- Hernández-Pérez, A., Labbé, J.I., 2014. Microalgas, cultivo y beneficios *Revista de Biología Marina y Oceanografía*49, 157-173.
- Hernández, A.G., Vázquez-Duhalt, R., Saavedra, M.d.P.S., Carreón, L.S., Jiménez, A.M., 2009. Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*13, 1-24.
- Hernández, F., Lamizana, B., Mateo-Sagasta, J., & Qadir., M. 2015. Economic Valuation of Wastewater - The cost of action and the cost of no action. Kenya: UNEP.
- Herrera, R.S., Dayleni, F., Gonzalez, S.M., Cruz, A.M., 2010. Pigmentos. . *Redalyc*44, 45-50.
- Ho, S.H., Chen, C.Y. 2011. Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems- A review. *Biotechnology Advances* 29, 189-198.

- Huang, J.J., Bunjamin, G., Teo, E.S., Ng, D.B., Lee, Y.K., 2016. An enclosed rotating floating photobioreactor (RFP) powered by flowing water for mass cultivation of photosynthetic microalgae. *Biotechnology for biofuels* 9, 218.
- Huleihel M, Ishanu V, Tal J. Arad S(M). 2002. Activity of Porphyridium sp polysaccharide against Herpes simplex viruses in vitro and in vivo. *J Biochem Biophys Methods*;50: 189–200.
- Jiménez, C. B., Torregrosa, A. M., & Aboites, A. L. 2010. El agua en México: cauces y encauses. México: AMC.
- Kim, J.P., Kang, C.D., Park, T.H., Kim, M.S. & Sim, S.J. 2006. Enhanced hydrogen production by controlling light intensity in sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii* culture. *Int. J. Hydrogen Energy* 31: 1585–1590.
- Kosourov, S., Seibert, M. & Ghirardi, M.L. 2003. Effects of extracellular pH on the metabolic pathways in sulfur deprived, H₂ producing *Chlamydomonas reinhardtii* cultures. *Plant Cell Physiol.* 44: 146–155
- Kosourov, S., Makarova, V., Fedorov, A.S., Tsygankov, A.A., Seibert, M. & Ghirardi, M.L. 2005. The effect of sulfur-re-addition on H₂ photoproduction by sulfur-deprived green algae. *Photosynth. Res.* 85: 295–305
- Kosourov, S., Patrusheva, E., Ghirardi, M.L., Seibert, M. & Tsygankov, A.A. 2007. A comparison of hydrogen photoproduction by sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii* under different growth conditions. *J. Biotechnol.* 128: 776–787.
- Laurinavichene, T.V., Tolstygina, I.V., Galiulina, R.R., Ghirardi, M.L., Seibert, M. & Tsygankov, A.A. 2002. Dilution methods to deprive *Chlamydomonas reinhardtii* cultures of sulfur for subsequent hydrogen photoproduction. *Int. J. Hydrogen Energy* 27: 1245–1249.
- Laurinavichene, T.V., Tolstygina, I.V. & Tsygankov, A.A. 2004. The effect of light intensity on hydrogen production by sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii*. *J. Biotechnol.* 114: 143–151.
- Leach, G., Oliveira, G. & Morais, R. 1998. Spray-drying of *Dunaliella salina* to produce a β -carotene rich powder. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 20: 82–85.
- Lee J, Cho D-H, Ramanan R, et al. 2013. Microalgae associated bacteria play a key role in the flocculation of *Chlorella vulgaris*. *Bioresour Technol*; 131:195–201. 554.

- Li, Y., Chen, Y. F., Chen, P., Min, M., Zhou, W., Martinez, B., et al. Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. *Bioresour Technol*, 102(8), 5138-5144.
- Li, J., Zhu, D.L., Niu, J.F., Shen, S.D. & Wang, G.C. 2011. An economic assessment of astaxanthin production by large scale cultivation of *Haematococcus pluvialis*. *Biotechnol. Adv.* 29: 568–574.
- Lin, L.-P. 2005. *Chlorella: Its Ecology, Structure, Cultivation, Bioprocess and Application*. Yi Hsien Publishing, Taipei, Taiwan.
- Liu, J., Huang, J., Fan, K.W., Jiang, Y., Zhong, Y., Sun, Z. & Chen, F. 2010. Production potential of *Chlorella zofingiensis* as a feedstock for biodiesel. *Bioresour. Technol.* 101: 8658–8663.
- López-Elías, J. A., Voltolina, D., Nieves-Soto, M. y Figueroa-Ortiz, L. 2004. Producción y Composición de Microalgas en Laboratorios Comerciales del Noroeste de México. *Avances en Nutrición Acuícola VII. Memorias del VII Simposium Internacional de Nutrición Acuícola*. 16-19 Noviembre, 2004. Hermosillo, Sonora, México.
- Lorenz, R.T. & Cysewski, G.R. 2000. Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin. *Trends Biotechnol.* 18: 160–167.
- Lupescu N, Geresh S, Arad S(M), Bernstein M, Glaser R. 1991. Structure of some sulfated sugars isolated after acid hydrolysis of the extracellular polysaccharide of *Porphyridium* sp. unicellular red alga. *Carbohydr Res*; 210:349–52.
- Mahapatra, D. M., Chanakya, H. N., & Ramachandra, T. V. 2013. Treatment efficacy of algae-based sewage treatment plants.
- Markous, G., Nerantzis, E., 2013. Microalgae for high-value compounds and biofuels production: a review with focus on cultivation under stress conditions. *Biotechnol. Adv.* 31, 1532-1542.
- Martínez L. 2008. Eliminación de CO₂ con microalgas autóctonas. Tesis Doctoral, Instituto de Recursos Naturales, Universidad de León, León, 226 pp.
- Mateo-Sagasta, J.; Raschid-Sally, L. y Thebo, A. 2015. Global wastewater and sludge production, treatment and use. P. Drechsel, M. Qadir y D. Wichelns, *Wastewater: Economic Asset in Urbanizing World*. Springer Netherlands
- Merchuk J.C and Wu X. 2002. Modeling of photobioreactors: application to bubble column simulation, *J. Applied Phycol.* 15: 163-169.
- Melis, A., Zhang, L., Forestier, M., Ghirardi, M.L. & Seibert, M. (2000) Sustained photobiological hydrogen gas

- production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiol.* 122: 127–136
- Meza-Bazan, M., 2013. "El enfoque médico social sobre el uso y consumo de la coca y la cocaína en Perú en la primera mitad del siglo xx" Universidad Antonio Ruiz de Montoya S. J. Lima2, 488-894.
- Misawa, N. (2009) Pathway engineering of plants toward astaxanthin production. *Plant Biotechnol.* 26: 93–99.
- Molina, E., Fernandez, J., Acien, F.G. y Chisti, Y., 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. *J Biotechnol* 92, 113-131.
- Moreno-Garrido, I. (2008). "Microalgae immobilization: current techniques and uses." *Bioresource technology* 99(10): 3949-3964.
- Morris, S., 2014. *Microalgas Cultivos y Beneficios* Scielo3, 58-62.
- Morweiser, M., Kruse, O., Hankamer, B., & Posten, C. (2010). Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87, 301–1291.
- Mouchet, P., Bonnelye, V., 1998. Solving algae problems: French expertise and worldwide applications. *J. Water SRT-Aqua.* 47, 125–141.
- Munoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Res*, 40(15), 2799-2815.
- NMX-AA-102-SCFI-1987 - Determinación de Coliformes. (1987).
- Numeragua. 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Impreso y hecho en México.
- Olguin, E.J. 2003. Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnology Advances* 22 81-91.
- OOSTERHUIS, Nicolaas Marius Gerard. 1984 En: SCALE-UP OF BIOREACTORS: a SCALE-DOWN APPROACH. College van Dekanen. Pages 152.
- Oswald WJ. 2003. My sixty years in applied algology. *J Appl. Phycol.* 15:99–106.
- Park J, R Craggs & A Shilton. 2011a. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology* 102: 35-42.
- Park J, R Craggs & A Shilton. 2011b. Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond. *Water Research* 45: 6637-6649.

- Parra, M. E.. (2004). Diseño y escalamiento de un reactor biológico para la producción de microorganismos probióticos en un medio de cultivo no lácteo. Tesis de grado (ingeniería química). Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería química
- Pirt, S. J., Y. K. Lee, M. R. Walach, M. W. Pirt, H. H. Balyuzi, M. J. Bazin (1983). "A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: design and performance." *J.Chem.Tech.Biotechnol.* 33B: 35-58.
- Pruvost, J., Van Vooren, G., Cogne, G., & Legrand, J. (2009). Investigation of biomass and lipids production with *Neochloris oleoabundans* in photobioreactor. *Bioresource Technology*, 100, 5988–5995.
- Pulz, O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57, 287–293.
- Raposo MFJ, Morais RMSC, Morais AMMB. 2013. Bioactivity and applications of sulphated polysaccharides from marine microalgae (review). *Mar Drugs*; 11(1):233–52.
- Rawat, I., S. K. Gupta., A. Shriwastav., P. Singh., S. Kumari and F. Bux. 2016. Microalgae Applications in Wastewater Treatment in Book *Algae Biotechnology Products and Processes*. Pages 249-268.
- Richmond A. 2004a. Biological principles of mass cultivation. In: Richmond A (ed). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*, pp. 125-177. Blackwell Science, Iowa.
- Richmond, A. 2004b. Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: An overview. *Hydrobiologia*, 512, 33 –37
- Ruiz A. 2011. Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente. Universidad Politécnica de Valencia. 102 paginas.
- Salinas-Callejas, E., Gasca-Quezada, V., 2009. Los biocombustibles. *El cotidiano* 157, 75-83.
- Sánchez-Varo, R.M. 2000. Producción de carotenos por *Dunaliella salina*. *Biología de microalgas..* pp 1-36
- Sansawa, H. & Endo, H. (2004) Production of intracellular phytochemicals in *Chlorella* under heterotrophic conditions. *J. Biosci. Bioeng.* 98: 437–444

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. Normas Oficiales Mexicanas. México, D. F. 66 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2015. Normas Oficiales Mexicanas. México, D. F.
- Smith, B.T. , R.H. Davis. 2012. Sedimentation of algae flocculated using naturally-available magnetic-based flocculants, *Algal Res.* 1. 32–39.
- Solimeno, A., L. Parker, T. Lundquist and J. García. 2017. Integral microalgae-bacteria model (BIO_ALGAE): Application to wastewater high rate algal ponds. *Rev. Science of the total Environment.* Pages. 601–602 and 646–657.
- Sorrequieta, A. (2004). *Aguas Residuales: Reuso y Tratamiento. Lagunas de estabilización: una opción para Latinoamérica.* México: Facultad de Ciencias: Bioquímicas y Farmacéuticas.
- Tamiya, H., 1957. Mass culture of algae. *Ann Rev Plant Physiol* 8, 309-334.
- Thein, M. (1993) Production of Spirulina in Myanmar (Burma). In: *Bulletin de l'Institute Oceanographique* (eds F. Doumenge, H. Durand-Chastel & H. Toulemont), pp. 175–178. Musee Oceanographique, Monaco, Europe.
- Torzillo, G. & M. Seibert. 2013. Hydrogen Production by *Chlamydomonas reinhardtii* in *Handbook of Microalgal Culture Applied Phycology and Biotechnology.* Second Edition. Pages 359–368.
- Travieso, L., Benitez-Echegoyen, F., 1988. Cultivo de *Arthrospira* sp: del Laboratorio a planta piloto. Curso: Tecnología y aprovechamiento del cultivo heterotrófico de microalgas. Centro de Investigaciones Pesqueras. La Habana, 1-16.
- Tsygankov, A.A., Kosourov, S., Seibert, M. & Ghirardi, M.L. (2002) Hydrogen photoproduction under continuous illumination by sulfur-deprived, synchronous *Chlamydomonas reinhardtii* cultures. *Int. J. Hydrogen Energy* 27: 1239– 1244.
- Tsygankov A.A., Kosourov, S.N., Tolstygina, I.V., Ghirardi, M.L. & Seibert, M. (2006) Hydrogen production by sulfur deprived *Chlamydomonas reinhardtii* under photoautotrophic conditions. *Int. J. Hydrogen Energy* 3: 11574–11584.
- Ugwu, C. U., Aoyagia, H., & Uchiyamaa, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, 99, 4021–4028.
- Vandamme, D., I. Foubert, B. Meesschaert & K. Muylaert. 2009. Flocculation of microalgae using cationic starch, *J. Appl. Phycol.* 22. 525–530.

- Widjaja, A.C., Chien, C., Ju, Y.H., 2009. " Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris* ". Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40, 13-20.
- Xiong, W., Li, X., Xiang, J. & Wu, Q. 2008. High density fermentation of microalga *Chlorella protothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production. Appl. Microbiol. Biotechnol. 78: 29–36.
- Yuan-Kun, L., S. Hui 2004. "Basic culturing techniques." Handbook of Microalgal Culture (Biotechnology and Applied Phycology). Edited by Amos Richmond. Blackwell Publishing: 40-56.