



Los fotobiorreactores de microalgas: Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales

Rafael Muñiz
rmuniz53@gmail.com

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello. Caracas,
Venezuela

Historia del Artículo

Recibido: 22 de abril de 2019

Aceptado: 10 de julio de 2019

Disponible online: 12 de julio de 2019

Resumen: Las microalgas son organismos fotosintéticos y se encuentran en la naturaleza con una amplia diversidad de taxonomías. Se han reportado múltiples aplicaciones industriales que parten de una serie de avances en el desarrollo del campo de la biotecnología de estos organismos. Estos desarrollos comprenden desde la producción de biocombustibles, abonos, complementos para la alimentación humana y de los animales de cría hasta el aporte de insumos para la industria farmacéutica. Una de las aplicaciones mejor documentadas de estos cultivos es su uso para el tratamiento de aguas residuales en las etapas finales del proceso de purificación. El cultivo de las microalgas a nivel industrial, presenta una serie de dificultades por el elevado costo del proceso y la inestabilidad de los cultivos debido a las condiciones variables del entorno y a la contaminación del medio nutritivo con otros microorganismos. Una alternativa para poder sortear algunos de estos problemas es el uso de fotobiorreactores. Un fotobiorreactor es un dispositivo cerrado diseñado para producir microorganismos fotosintéticos con un elevado rendimiento de biomasa siempre que se cumplan los requerimientos óptimos. El crecimiento de las algas en un fotobiorreactor reduce el riesgo de contaminación, mejora la reproducibilidad en las condiciones de cultivo, brinda un mayor control de las condiciones hidrodinámicas y de la temperatura, además de permitir un diseño técnico apropiado. Los avances tecnológicos en el diseño de estos sistemas han permitido mejorar notablemente la productividad y por ende la economía de los cultivos para distintos fines. Este artículo plantea como objetivo presentar de manera crítica información sobre los distintos diseños de fotobiorreactores, así como de los factores que afectan el cultivo de las microalgas en este tipo de dispositivos y se enfocará en el tratamiento terciario de aguas residuales. A partir de la información recopilada en este trabajo podemos sugerir el uso de estos dispositivos y en particular los que se construyen a pequeña escala como un recurso para reducir la contaminación de las aguas residuales provenientes de fuentes industriales y de origen urbano.

Palabras clave: microalgas, fotobiorreactores, aguas residual.

Microalgal photobioreactors: A resource for the tertiary treatment of wastewater

Abstract: The microalgae are photosynthetic organisms and are found in nature with a wide diversity of taxonomies. Multiple industrial applications have been reported that start from a series of advances in the development of the biotechnology field of these organisms. These developments range from the production of biofuels, fertilizers, supplements for human and animal feed to the contribution of supplies for the pharmaceutical industry. One of the best documented applications of these crops is their use for the treatment of wastewater in the final stages of the purification process. The cultivation of microalgae at an industrial level presents a series of difficulties due to the high cost of the process and the instability of the crops due to the variable environmental conditions and the contamination of the nutrient medium with other microorganisms. An alternative to overcome some of these problems is the use of photobioreactors. A photobioreactor is a closed device designed to produce photosynthetic microorganisms with a high biomass yield as long as the optimal requirements are met. The growth of algae in a photobioreactor reduces the risk of contamination, improves reproducibility in crop conditions, provides greater control of hydrodynamic conditions and temperature, in addition to allowing an appropriate technical design. The technological advances in the design of these systems have allowed to improve notably the productivity and therefore the economy of the crops for different purposes. This article aims to present critically information on the different designs of photobioreactors, as well as the factors that affect the cultivation of microalgae in this type of devices and will focus on the tertiary treatment of wastewater. From the information gathered in this work we can suggest the use of these devices and in particular those that are built on a small scale as a resource to reduce the pollution of wastewater from industrial sources and urban origin.

Keywords: microalgae, photobioreactors, wastewater

I. INTRODUCCIÓN

Las algas desempeñan un papel fundamental a nivel ambiental fijando hasta un 40% del carbono atmosférico y aportando a su vez una fracción importante del oxígeno a la biosfera. Debido a su abundancia, su copiosa biodiversidad y su habilidad para poder sobrevivir en una variedad de ambientes que incluyen condiciones extremas, estos organismos cumplen con una función relevante en la ecología de nuestro planeta.

Por otro lado, las algas son un recurso muy valioso desde el punto de vista de la economía, sirviendo como fuente de materia prima de una serie de sustancias de interés comercial, e

inclusive logran utilizar los residuos de procesos industriales y los desechos urbanos y rurales como fuentes de alimento para su crecimiento [1].

Las microalgas constituyen un grupo muy extenso y diverso de microorganismos fotosintéticos, poseen una estructura simple lo que les permite lograr un rápido crecimiento y por ende generar una mayor biomasa, con la ventaja sobre otros tipos de biotecnologías de que no compiten con las áreas de los cultivos tradicionales y según su especie pueden crecer tanto en agua dulce como salada.

La composición de la biomasa es uno de los criterios que se toman en cuenta para clasificarlas según la especie, en conjunto con

otros aspectos como su morfología y el tipo de hábitat donde viven.

Estos microorganismos son capaces de producir una amplia gama de compuestos: biocombustibles, abonos orgánicos, proteínas de buen grado de palatabilidad para el ser humano y los animales de cría, antibióticos, pigmentos, esteroides entre otros, empleando en su síntesis únicamente la luz solar, el dióxido de carbono, una fuente que aporte N y P, en presencia de algunas sales inorgánicas. La biotecnología de microalgas ha ganado preponderancia en las últimas décadas conduciendo a los investigadores al desarrollo de una serie de bioprocesos que la vinculan con necesidades específicas de la población.

Como se discutirá con mayor detalle en los párrafos siguientes, para el cultivo de microalgas se emplean dos tipos de tecnologías: los sistemas abiertos en los que el cultivo se encuentra expuesto directamente al entorno y los sistemas cerrados que incluyen a los fotobiorreactores (FBR) en los que el cultivo tiene poco o ningún contacto con la atmósfera [2].

Se considera que “ el estado del arte ” de los sistemas abiertos llegó en el presente siglo a un techo tecnológico, por lo que el éxito de este tipo de biotecnología en el futuro dependerá en una buena medida del desarrollo de los dispositivos de tipo cerrado con el propósito de incrementar la biomasa y diversificar el número de compuestos útiles que se pueden obtener a partir de los cultivos [3].

Un fotobiorreactor es un dispositivo cerrado diseñado para producir microorganismos fotosintéticos bajo condiciones controladas donde se ajustan una serie de parámetros como los requerimientos óptimos de luz y la eficiencia en el mezclado, garantizando una buena transferencia de masa y de calor en el sistema y aislándolo del ambiente externo lo que previene la contaminación con organismos foráneos [4].

Tomando en cuenta los factores económicos, los FBR en el presente son muy apreciados, no solo por su alta producción de biomasa sino también por su menor costo cuando se les compara con los sistemas abiertos [5].

Este artículo tiene como objetivos plantear al lector los aspectos fundamentales de la tecnología de microalgas, con sus bondades y limitaciones, describir los factores fisicoquímicos y biológicos que pueden afectar la productividad de los cultivos y establecer los principales criterios que se deben tomar en cuenta para lograr que los fotobiorreactores sean eficientes para ser utilizados en una serie de aplicaciones generales de la biotecnología de microalgas y en particular como un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales.

Entre los objetivos principales del presente trabajo de investigación documental se incluyen los siguientes aspectos:

- ¿Qué tipo de factores de tipo físico, químico y biológico determinan el crecimiento óptimo de las microalgas bajo condiciones confinadas?

- ¿Cuáles son las principales ventajas y también las desventajas del uso de biorreactores de microalgas para el tratamiento de las aguas residuales en comparación con los sistemas abiertos?
- Presentar algunas aplicaciones de los biorreactores de microalgas en el tratamiento terciario de aguas residuales industriales y domésticas

II. APLICACIÓN DE LAS MICROALGAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El agua dulce es imprescindible para conservar la vida en el planeta y se ha convertido hoy en un recurso que es escaso en muchos países. Esto sucede en particular en las regiones más pobres y subdesarrolladas del planeta donde las aguas residuales se vienen utilizando cada vez con mayor frecuencia y en mayor cantidad para uso en la agricultura. Aunque en principio, esto podría generar beneficios para la economía agrícola, su uso indiscriminado sin tomar en cuenta otras consideraciones, podría ocasionar problemas para la salud tanto en humanos como en los animales de cría.

Según menciona la Organización Mundial de la Salud, hay una serie de enfermedades como el cólera, la diarrea, la fiebre tifoidea y otras fiebres entéricas que son transmitidas como consecuencia directa o indirecta por el mal manejo de las aguas residuales provenientes de fuentes industriales y de origen doméstico [6].

Tomando en cuenta todo el riesgo para la salud que involucra esta posible fuente de contaminación ha surgido la necesidad de desarrollar nuevos procesos que permitan el tratamiento de las aguas residuales y que a su vez estas tecnologías sean eficientes y de bajo costo con el propósito de hacer viable su implementación, en particular en aquellas locaciones donde los recursos económicos son muy limitados [7].

El tratamiento convencional de aguas residuales se realiza básicamente en tres etapas y la complejidad que sigue el proceso depende del tipo de agua residual que se esté tratando y de los costos que se generan durante el curso de su purificación.

En rasgos generales, el proceso se inicia con una etapa preliminar donde se remueven los sólidos de gran tamaño. Esta etapa previa se realiza haciendo pasar el caudal a través de una serie de barras metálicas que actúan como un cribado, reduciendo la velocidad de flujo y permitiendo así que ocurra la retención de los sólidos suspendidos [8].

El siguiente paso, que se denomina etapa primaria, busca separar los sólidos de menor tamaño que se puedan sedimentar. Esta etapa se realiza en tanques en los que permanece el agua confinada por un tiempo permitiendo la segregación del fluido y que se separen los materiales particulados según su densidad.

La etapa secundaria del tratamiento tiene como propósito el de disminuir la DBO y la DQO (demandas biológicas y químicas de oxígeno) reduciendo así los niveles de materia orgánica

en las aguas servidas. Esta etapa implica incubar el material que se quiere purificar bajo condiciones aerobias y/o anaerobias en presencia de consorcios microbianos constituidos por algas y bacterias que son capaces de metabolizar los compuestos orgánicos.

La etapa terciaria se enfoca fundamentalmente en reducir a un mínimo los niveles remanentes de compuestos orgánicos solubles y las sustancias que provienen de su metabolismo durante el proceso previo de digestión. Dependiendo del tipo de compuestos se les puede reducir sea por medios químicos o mediante otros tratamientos biológicos adicionales. La remediación química es por lo general más costosa e involucra una fuente de contaminación secundaria por lo cual se prefiere la remediación biológica.

Cuando se comparan los costos operativos a lo largo del proceso de purificación se comprueba que la etapa terciaria, diseñada en un principio para remover el exceso de iones amonio, nitratos y fosfatos es cuatro veces más costosa que la etapa primaria y en el caso de que se requiera incluir una cuarta etapa de tratamiento para remover los metales pesados y otros compuestos tóxicos el costo adicional se incrementaría de 6 a 8 veces en relación con las primeras etapas [9].

Es en las etapas finales del proceso de depuración donde los cultivos de microalgas ofrecen su mayor potencial para purificar aguas residuales, en especial a nivel terciario, debido a la capacidad de las microalgas para fijar

elementos como el N y el P con una elevada eficiencia previniendo así que ocurran fenómenos ulteriores de eutrofización de las fuentes de acuíferos con todos los problemas que acompañan a este fenómeno.

Se conocen ciertas especies de microalgas que son capaces de acumular y tolerar cantidades importantes de metales pesados por lo que no se debe descartar también su aplicación en una fase cuaternaria del tratamiento de aguas.

A lo largo de décadas los esfuerzos en I & D realizados en diversos países, entre los que hay que destacar como pioneros a los Estados Unidos de Norte América, Francia, Inglaterra e Israel y también en fecha reciente los países del medio oriente como los Emiratos Árabes guiaron el desarrollo de la biotecnología de microalgas para la purificación del agua.

La literatura es pródiga en reportes sobre el uso de la tecnología de microalgas para el tratamiento de efluentes provenientes de diversas fuentes tales como: la industria pesquera, la de productos cárnicos tanto de aves, porcinos o ganado vacuno y los residuos que se generan a partir de la industria vinícola [10].

III. VARIABLES QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA EN EL CULTIVO DE MICROALGAS

La investigación en el campo de la biotecnología de microalgas, se desarrolla básicamente en dos etapas.

La primera etapa se enfoca en coleccionar en forma sistemática un banco de microalgas provenientes de diversas especies y

mantenerlas vivas cultivándolas en placas de agar para su clasificación final y estudio de los aspectos relevantes de su bioquímica y su fisiología. Se ha podido comprobar que los mejores resultados de campo se obtienen cuando se utilizan microalgas autóctonas de la zona donde se propagará el cultivo.

La segunda etapa involucra desarrollar un protocolo de escalamiento que permita obtener los niveles de producción que se requieren para que el tratamiento sea eficiente en términos cuantitativos y cualitativos, asegurando que el cultivo sea rentable económicamente [11].

Como ya se mencionó en los párrafos anteriores, para la producción a nivel industrial de microalgas se emplean dos tipos de sistemas de cultivo: los sistemas abiertos y los sistemas cerrados.

Los sistemas abiertos consisten en estanques al aire libre de poca profundidad (50 cm) que utilizan directamente el CO₂ atmosférico y la luz solar. Usualmente disponen de un equipo rotatorio con paletas que producen un flujo laminar mezclando el cultivo sin dañar la suspensión de células.

Este tipo de piscinas al aire libre fue la primera tecnología en ser empleada para la purificación de aguas residuales a inicios del siglo pasado. Los sistemas abiertos pueden multiplicar en condiciones óptimas una cantidad considerable de microalgas, pero presentan también una serie de inconvenientes. Al ocupar mayores extensiones y encontrarse expuestos al ambiente son más propensos a la

contaminación por organismos no deseados como otras microalgas foráneas y bacterias [12].

Por esta razón, para el cultivo en sistemas abiertos se prefiere el uso de cepas que puedan crecer bajo condiciones extremas limitando la proliferación de otros tipos de organismos competidores, estas condiciones pueden contemplar valores de pH que son muy altos o bajos, temperaturas específicas que superan las del entorno donde se realiza el cultivo o estrategias basadas en requerimientos nutricionales que son particulares a la variedad de microalga que se desea cultivar.

En los sistemas abiertos, la tasa de difusión y de disolución del CO₂ en el medio de cultivo puede limitar considerablemente la tasa de crecimiento celular, sumado al hecho de que la atmósfera contiene relativamente una baja concentración de ese gas. Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es que en estos sistemas abiertos es más difícil aplicar un control estricto de las condiciones ambientales. Al variar una serie de factores ambientales como la temperatura del entorno y como consecuencia la del medio de cultivo y la intensidad lumínica, entre otros, se verá afectada la velocidad de crecimiento de los organismos.

Por otra parte hay que tomar en cuenta que si se mantiene una baja densidad celular se originan otros inconvenientes, además de que baja la productividad del cultivo y se facilita la contaminación por efecto del factor de competencia mutua, se hace más difícil

mantener un control estricto de la temperatura y por otra parte se incrementa el costo para la recuperación de la biomasa. Otro de los parámetros que hay que controlar y que según su valor se pueden tornar en crítico son los incrementos excesivos en el pH del medio durante el proceso de cultivo.

Las microalgas por efecto de la fotosíntesis alcalinizan el medio de cultivo hasta niveles que no pueden ser compensados por el efecto neutralizador que genera la captura del CO₂, debido al equilibrio del buffer bicarbonato y también por la tasa respiratoria de las mismas microalgas que acidifica el medio, por esta razón es imprescindible mantener un control riguroso del pH, de ahí que se prefiera mantener un consorcio microbiano en el que las microalgas crezcan junto con ciertas bacterias, las bacterias al respirar acidifican el medio y colaboran compensando el desbalance de pH [13].

Las microalgas presentan diversos requerimientos en lo que respecta al valor del pH para su óptimo crecimiento. A pH alcalinos se reduce la disponibilidad de CO₂ al medio lo que limita el crecimiento y la tasa de fotosíntesis de las microalgas un factor que limita en especial a los sistemas abiertos como ya se mencionó. El rango de pH ideal para la mayoría de los cultivos de microalgas se encuentra entre 7 y 9. El rango del pH de operación del cultivo se puede controlar en los sistemas cerrados aplicando aire enriquecido con CO₂. Pero se convierte en un elemento limitante en las granjas de algas con estanques al aire libre [14].

En cultivos de microorganismos fotoautótrofos la disponibilidad de luz condiciona la velocidad específica a la que se realiza la fotosíntesis y como consecuencia, determina también la tasa específica de crecimiento. Los sistemas de cultivo cerrados son más versátiles en el sentido de que se pueden iluminar por luz artificial, luz solar o por ambas mientras que los sistemas abiertos solo permiten fuentes naturales de luz.

No solo la intensidad de la luz es un factor importante también cuenta sus características espectrales. Se debe tomar en cuenta que en todos los sistemas de cultivo, las células más cercanas a la superficie iluminada impiden la penetración de la luz hacia el seno del medio de cultivo y producen un efecto de sombreado. En la literatura se han reportado efectos de sombreado mutuo entre las células de los cultivos, para reducir este efecto no deseado se debe garantizar un movimiento celular que sea continuo en el sistema desde y hacia las zonas de luz y de oscuridad [2] .

En términos de los requerimientos nutricionales del cultivo, el principal componente que se debe considerar es el anhídrido carbónico. Estos microorganismos logran vivir con altas concentraciones de este gas disuelto en el medio y toleran muy bien otros gases de efecto invernadero como los NO_x a un punto que estos contaminantes atmosféricos son considerados por los investigadores mas como nutrientes para las microalgas que como fuente de sustancias tóxicas [15].

El crecimiento de las algas depende también en gran medida de la temperatura, por lo que se requiere conocer el valor óptimo respecto a este parámetro para cada cepa de forma de poder alcanzar una tasa máxima de crecimiento. Los sistemas fotosintéticos siempre generan una cierta cantidad de calor a causa de que la fotosíntesis no tiene una eficiencia del 100% al convertir la energía luminosa en energía química, al igual que sucede con cualquier otro proceso bioquímico [16].

La conversión teórica de la luz roja en energía química es solo de un 30 % y el 70 % restante se pierde como calor. Por ello, el nivel de enfriamiento que requiere un sistema de cultivo tanto abierto como cerrado dependerá de la intensidad de la luz que incide en el sistema y de la concentración celular del cultivo que recibe la radiación.

La temperatura óptima para el cultivo de las microalgas se encuentra generalmente entre los 20 y 24 °C, no obstante, estos valores pueden variar dependiendo del medio de cultivo y la cepa utilizada [17].

Sea cualquiera que sea el tipo de sistema que se utilice para el cultivo de microalgas siempre se requiere de un tipo de mezclado que sea eficiente con el fin de producir una dispersión uniforme de las células en el medio de cultivo, evitando que se formen gradientes de radiación lumínica, concentración de nutrientes o de temperatura [18].

Uno de los problemas más frecuentes en el cultivo de algas es el daño celular que causa el efecto de cizalla que produce cortes en las células. Este daño colateral se debe con frecuencia a una agitación excesiva de la suspensión celular o de una técnica inadecuada de agitación que causa turbulencia, esta condición en el sistema puede originar daños permanentes en la estructura celular, en particular en las membranas plasmáticas, lo que afecta no solo la tasa de crecimiento sino la misma supervivencia de los organismos. Por el contrario, si se aplica una agitación que es insuficiente se provocará la sedimentación de las microalgas con la subsecuente muerte celular [19].

IV. PARÁMETROS QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE FOTOBIORREACTORES DE MICROALGAS

En el caso de los sistemas cerrados se emplean recipientes donde la suspensión de microalgas se mantienen bajo agitación continua utilizando bombas de flujo continuo o por burbujeo con aire o con de mezcla de aire enriquecido con CO₂, siendo iluminando mediante fuentes de luz natural y/o artificial [20].

Dentro de los sistemas cerrados de uso más frecuente se encuentran los fotobiorreactores. Estos dispositivos previenen la evaporación del agua y reducen las pérdidas del CO₂, a estas ventajas se suma una probabilidad menor de que el sistema se contamine pudiendo mantener constantes otras

parámetros físicos como la temperatura del cultivo. Otra ventaja colateral que viene del hecho de que son sistemas cerrados es el de reducir los malos olores que desprenden las aguas residuales por su misma naturaleza y origen [21].

Los primeros FBR fueron propuestos por Gudin y Chaumont en 1983 [22], por Pirt y col., en ese mismo año [23], y posteriormente por Torzillo y col., en 1986 [24]. En la última década los fotobiorreactores tubulares y los de placas planas construidos con vidrio o con plástico transparente han recibido mucha atención ya que permiten establecer cultivos de alta densidad celular, que superan en un factor de tres o más veces la productividad en términos de masa celular cuando se les compara con los sistemas abiertos del tipo convencional.

Actualmente existen diversos tipos de fotobiorreactores, algunos modelos se encuentran disponibles en el mercado y otros son relativamente fáciles de construir, entre las opciones de uso más frecuente se encuentran las columnas de burbujeo, los reactores airlift (agitados y aireados mediante burbujas) y los tanques agitados, que se fabrican tanto de tipo tubular como cónico.

Los FBR son generalmente categorizados de acuerdo a su estructura y a su producción de biomasa, los modelos de diseño tubular, los de superficie plana denominados en inglés como tipo flat panel y los de columna vertical son los de uso más común para la mayoría de las aplicaciones industriales y sanitarias [4].

Entre estos dispositivos los fotobiorreactores del tipo tubular son el diseño más sustentable entre los sistemas cerrados, disponen de una buena área de iluminación, excelente tasa de producción de biomasa y son relativamente económicos [25].

El diseño de tipo flat-panel son construidos también a partir de materiales transparentes con la finalidad de maximizar el empleo de la luz solar. Este tipo de reactores permite una buena inmovilización de las microalgas que como veremos en breve es una característica que le brinda una ventaja adicional al sistema y además son de fácil mantenimiento.

Los diseños de tipo columna vertical son los más compactos, económicos y fáciles de operar, lo que los confiere ventajas para el escalamiento del sistema [26].

Entre los aspectos que se consideran que son claves para el diseño de un FBR se debe tomar en cuenta: la distribución de la luz, el tipo de mezclado, la inyección de gas (CO_2) y la facilidad para poder aplicar un flujo laminar sobre material microalgal inmovilizado.

Los sistemas de biorreactores empleados a nivel de laboratorio con frecuencia son iluminados por vía interna o externa con luz artificial mediante el uso de lámparas fluorescentes o diodos emisores de luz (LED).

Existen otros sistemas cerrados para el cultivo de algas que emplean la luz natural con áreas de iluminación que pueden competir con los estanques abiertos, los llamados flat

plates (laminares), los airlift tubulares (de burbujeo) los de tipo serpentín y los de diseño inclinado [27].

Para que la luz artificial sea útil para el proceso fotosintético de las microalgas, los fotones generados deben encontrarse en un rango de longitud de onda entre los 600 y los 700 m [29]. En condiciones reales el factor que determina la actividad fotosintética es la cantidad de energía disponible para cada célula individual, más que la cantidad de energía luminosa incidente [28].

Los parámetros que pueden considerarse básicos para describir la disponibilidad de energía bajo una iluminación intermitente son dos, la relación de los periodos luz/oscuridad (L/O) y la frecuencia de los ciclos L/O. Estos establecen en gran medida el régimen de iluminación, el cual es un indicador de la disponibilidad de luz para una célula individual [29].

La eficiencia en el mezclado es otro factor que juega un rol importante para asegurar una eficiente distribución de la intensidad de luz, en garantizar la transferencia de CO₂ entre la fase gaseosa y la líquida y en el mantenimiento uniforme de pH [30].

Un mezclado adecuado no solo favorece el intercambio gaseoso, también evita la sedimentación celular, la formación de gradientes con otros parámetros ambientales y de concentración de nutrientes, pero su función principal es permitir que todas las células puedan acceder a las zonas iluminadas en un fotobiorreactor [25].

El mezclado puede aplicarse de diversas formas; sin embargo, los FBR del tipo airlift se recomiendan con frecuencia por su sencillez y porque este tipo de diseño no causa un daño mecánico a las células [31].

En general los sistemas de columnas de burbujeo ocasionan un menor daño celular que los sistemas de agitación mecánica. En este tipo de dispositivos el líquido fluye a través de un tubo colocado en el exterior del dispositivo, creando una recirculación natural de tipo reflujo [32] [33].

La inyección de CO₂ mediante el burbujeo directo en el interior de un FBR debe ser considerada también como otro de los parámetros importantes en el diseño. Una aireación rica en CO₂ provee con este gas a una mayor cantidad de microalgas y al mismo tiempo ayuda desoxigenar el medio por efecto del desplazamiento de los gases disueltos lo que evita que ocurra el fenómeno de la foto oxidación que afecta a la eficiencia fotosintética de las microalgas.

El rango de pH de operación del cultivo se puede controlar en los sistemas cerrados al aplicar aire enriquecido con CO₂. No obstante, se debe considerar también el punto de vista económico, ya que una velocidad de aireación mayor involucra mayores costos de producción en el proceso de escalamiento [34].

Una tecnología relativamente reciente para el cultivo de microalgas es la inmovilización en forma de biopelículas de las células en suspensión sobre un soporte inerte (microesferas de agar o polímeros de

acrilamida) lo que permite mantener en el fotobiorreactor un flujo laminar con las aguas residuales incrementándose la eficiencia de captura de los compuestos solubles que se quieren eliminar y además evitando la pérdida de las microalgas en el percolado [35].

V. CONCLUSIONES

Las algas en general y especialmente las microalgas, se han ganado un espacio bien merecido como una alternativa exitosa y viable desde una óptica económica que no presenta grandes complicaciones para ser aplicado como un tratamiento complementario de fase terciaria en la purificación de las aguas residuales y así poder recuperar una buena parte del valioso recurso hídrico para fines ulteriores.

Se han tipificado una serie de factores que pueden ser críticos para el mantenimiento óptimo de los cultivos de microalgas entre estos factores resaltan : la intensidad y calidad de la luz, la fuente de nutrientes , la temperatura de cultivo, el valor del pH del medio, el sistema de mezclado y una geometría del sistema que evite el efecto de sombreado mutuo entre las células

Los fotobiorreactores ofrecen una serie de ventajas cuando se le compara con los sistemas abiertos: mayor facilidad para cosechar la biomasa, mantenimiento de un cultivo libre de contaminación foránea, un mejor control de las condiciones del cultivo, además de permitir que se pueda disponer de un diseño apropiado para cada situación en particular con una menor inversión de capital. Por otra parte, el uso de fotobiorreactores

aparece como una opción muy atractiva si se toma en cuenta que su nivel de escalamiento permite llegar a un excelente compromiso entre el tamaño y la eficiencia del sistema.

Estas ventajas en el diseño permiten la construcción de dispositivos de pequeño tamaño para uso doméstico que se pudieran colocar en las casas, en los edificios comerciales y residenciales o incluso ser aplicado a nivel de urbanizaciones o industrias permitiendo depurar las aguas residuales a pequeña y mediana escala, disminuyendo el nivel de la contaminación del agua antes de esta alcance los grandes colectores, evitando recargar la operación de las plantas de tratamiento convencionales y haciendo el proceso mas sostenible desde la óptica ambiental.

Se ha demostrado ampliamente que los cultivos de microalgas en general y los fotobiorreactores en particular no solo pueden ser competentes para purificar el agua residual , también pueden aportar materias primas valiosas como un subproducto en paralelo con su función depuradora, estos materiales colaterales al ser comercializarlos ayudarían a sufragar los costos operativos del proceso y a reducir el tiempo para recuperar la inversión inicial que hubo que hacer para construir el sistema. Este tipo de enfoque mixto se conoce hoy en día como " biofábricas" y se presenta como una alternativa viable para hacer más atractivo desde el punto de vista económico el uso de este tipo de biotecnologías.

REFERENCIAS

Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
Ingeniería Ambiental Bucaramanga, Colombia

- [1] Norton T, Melkonian N y Andersen R. (1996). Algal biodiversity. *Phycologia*. 35: 308–326
- [2] Martin F. (2010). Optimization of photobioreactor for astaxanthin production in *Chlorella zofingiensis*. Tesis de Maestría en Ingeniería. National University of Singapore.
- [3] Barbosa M, Janssen M, Ham N, Tramper J y Wijffels R. (2003). Microalgae cultivation in air-lift reactors: modeling biomass yield and growth rate as a function of mixing frequency. *Biotechnology and Bioengineering* 82: 170–179.
- [4] Pulz O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 57: 287-293.
- [5] Singh R y Sharma S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 2347–2353.
- [6] Organización Mundial de la Salud. (2015). Agua. Documento divulgativo. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>
- [7] UN Water (2009) The United Nations World Water Development Report 3 – Water in a Changing World. (UNESCO Publishing/Earthscan). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2012). Procesos de Bioremediación.
- [8] Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155 (1).
- [9] Bashana, L, Manuel Morenoa M. , Hernandez J. y Bashana Y.(2002) Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Research* 36 . 2941–2948
- [10] Contreras, L. y Cañizares R (2003). Avances en el diseño conceptual de biorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*. Vol 28. N° 8
- [11] Carey, R., & Migliaccio, K. (2009). Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: a review. *Environmental Management*, 44 (2).
- [12] Escorihuela E. Núñez M. , Rosales, R, Mora R y Morales E.(2007) Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas. *Rev. Fav. Agron. (LUZ)*. 24 Supl. 1: 225-230
- [13] Lebsky V, Gonzalez-Bashan L y Bashan Y (2001) Ultrastructure of interaction in alginate bead between the microalga *Chlorella vulgaris* with its natural associative bacterium *Phyllobacterium myrsinacearum* and with the plant growthpromoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Can. J. Microbiol.* 47: 1–8
- [14] Candela R. (2016) Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica Monografía de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental Universidad Nacional Abierta y a Distancia Escuela de Ciencias
- [15] Van Beilen JB. 2010. Why microalgal biofuels won't save the internal combustion machine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4: 41–52.
- [16] Bhosale P. 2004. Environmental and cultural stimulants in the production of carotenoids from microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 63: 351–361.
- [17] Tafur, J. y Estrada, L. (2015). Tratamiento de aguas residuales in vitro por medio de la microalga *Chlorella* sp. en el municipio de Barrancabermeja, Colombia. *Revista para Difusión y Divulgación de Avances de Investigación*, 6 (10)
- [18] Gómez, L. (2007). Microalgas: aspectos biológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, 19 (2).
- [19] Hernández-Pérez A. y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49 (2).
- [20] Ruiz, A. (2011). Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente. Tesis de grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [21] Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. (2012). Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. *Bioresource Technology* 114: 542-548.
- [22] Gudín C Y Chaumont D. (1983). Solar biotechnology study and development of tubular solar receptors for controlled production of photosynthetic cellular biomass. En Palz W, Pirwitz D (Eds.) *Proceedings of the Workshop and EC Contractor's Meeting in Capri*. Reidel. Dordrecht, Holanda 184-193.
- [23] Pirt S, Lee Y, Walach M, Pirt M, Balyuzi H Y Bazin M.(1983). A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: Design and performance. *Journal of Chemical and Technological Biotechnology* 33: 35-38.
- [24] Torzillo G, Pushparaj B, Bocci F, Balloni W, Materassi R y Florenzano G.(1986). Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors. *Biomass* 11: 61-64.
- [25] Uguw C, Aoyagi H y Uchiyama H.(2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology* 99: 4021–4028.
- [26] Reyna R, Cristiani E, Hernández D, Thalasso F y Cañizares R. (2010). Hydrodynamic and mass transfer characterization of a flat-panel airlift photobioreactor with high light path. *Chemical Engineering and Processing* 49: 97–103.
- [27] Degen J, Uebele A, Retze A, Schmid-Staiger U y Trosch W. (2001). A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *Journal of Biotechnology* 92: 89–94.
- [28] Fernandes B, Dragoner G, Teixeira J y Vicente A. (2010). Light regime characterization in an airlift. Photobioreactor

- for production of microalgae with high starch content. *Applied Biochemical and Biotechnology* 61: 218–226.
- [31] Fernández J, García J, García F, Molina E, Al-Dahhan M, Huping L y Kemoun A. (2002). Integration of fluid dynamics, light regime and photosynthetic response in photobioreactors. 1st Congress of International Society for Applied Phycology. Roquetas de Mar, Almería, España
- [32] Kommareddy A y Anderson G. (2003) . Study of light as a parameter in the growth of algae in a photo-bio reactor (PBR). ASAE Paper No. 034057. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- [33] Chisti Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25: 94–306.
- [34] Contreras-Flores C, Peña-Castro J y Flores-Cotera L. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia* 8: 450-456.
- [35] Barbosa MJ, Hadiyanto H y Wijffels RH. (2004). Overcoming shear stress of microalgae cultures in sparged photobioreactors. *Biotechnology and Bioengineering* 85: 78-85.
- [36] Zhang K, Kurano N y Miyachi S. (2002). Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor. *Bioprocess Biosystems Bioengineering* 25, 97–101.
- [37] Fernández J. Mosquera M y Curt M. (2014) Uso de microalgas inmovilizadas en biofilm para tratamiento de aguas residuales. Universidad Politécnica de Madrid.

NOTAS

Los artículos que aparecen citados en las referencias se encuentran disponibles en Google Académico (actualizados en abril de 2019).