



Diseño de un Fotobioreactor Industrial para el Cultivo de Spirulina (*Arthrospira platensis*)

Ronny Barra ⁽¹⁾, Sonia Guartatanga ⁽²⁾

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar
Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL).

Campus Gustavo Galindo, Código Postal, Guayaquil, Ecuador.
fimcm@espol.edu.ec

⁽¹⁾ Escuela Politécnica del Litoral, Egresado de la Carrera de Acuicultura, ronny-barra@hotmail.com

⁽²⁾ Escuela Politécnica del Litoral, M.Sc, soniaguarta@espol.edu.ec

Resumen

Este Informe Técnico, previo a la obtención del título de Acuicultor de Ronny Barra, presenta el proceso de diseño de un fotobioreactor industrial para cultivo de la micro-alga Spirulina (Arthrospira platensis). El trabajo inicia con una revisión de los principales sistemas de cultivo de micro-algas existentes. Luego se describe los principales sistemas de cultivo abiertos y los diferentes tipos de fotobioreactores conocidos. Una reseña sobre los fotobioreactores industriales que han sido construidos y sobre los que actualmente están en funcionamiento brinda una perspectiva más amplia para el diseño de un nuevo fotobioreactor industrial. Una revisión de los principales criterios de diseño permite identificar los aspectos más importantes a ser tomados en cuenta cuando se diseña un fotobioreactor. Para poder evaluar el rendimiento de un fotobioreactor es necesario definir métodos adecuados para medir la productividad. Como resultado de este trabajo, se presentan los criterios de diseño, los cálculos, los planos, los detalles y el presupuesto de la construcción, y una evaluación de la operación del fotobioreactor diseñado. En la discusión de los resultados se identifican las ventajas y desventajas del sistema diseñado. Las conclusiones y recomendaciones del trabajo dan importantes pautas para la realización de futuros trabajos en este campo.

Palabras Claves: *Diseño, fotobioreactor, micro-alga, Spirulina, cultivo, industrial, productividad, raceway.*

Abstract

This is a Technical Inform, before to obtain the Ronny Barra Aquaculture degree, it show the process to design an industrial photobioreactor to growth Spirulina (Arthrospira platensis). This work star with a review of the principal open culture systems and the deferments types of know photobioreactors. An abstract about the industrial photobioreactors that have been building and it is running right now give a perspective to design a new industrial photobioreactor. A looking the principals' criteria of designs give to identify the items more important to design a photobioreactor. To evaluate the performance of photobioreactor is necessary to define methods to measure the output. As result of this work, it shows the design criterions, the calculus, planes, details and budget of building and evaluation of photobioreactor designing. In the discussion of results it is identify the advantages and the disadvantages of the designing system. The conclusions and of this work give important guidelines to make future works in this matter.

Key Words: *Design, photobioreactor, micro-alga, Spirulina, culture, industrial, output, raceway.*



1. Introducción

La Spirulina es una micro-alga del phylum Cyanophyta que se cultiva industrialmente en varios lugares del mundo debido a su excepcional composición nutricional. En el año 2000 se estimó que la producción mundial de Spirulina llegaba a las 2000 toneladas por año. El cultivo industrial de Spirulina se ha realizado tradicionalmente en sistemas abiertos conocidos como raceways, pero la necesidad de contar con sistemas de cultivo más higiénicos y eficientes ha hecho que científicos de todo el mundo diseñen sistemas cerrados conocidos como fotobioreactores (FBR). Existen muy pocas empresas que utilizan exitosamente fotobioreactores de escala industrial. El autor ha trabajado por más de 10 años en el cultivo industrial de Spirulina en fotobioreactores en las dos empresas que existen en Ecuador. Este trabajo muestra el proceso de diseño de los fotobioreactores que hasta el día de hoy utiliza Mertens & Aso. S.A. en la provincia de Pichincha.

2. Generalidades

2.1. Principales tipos de sistema de cultivo de micro-algas

Existen dos tipos principales de sistemas de cultivo de micro-algas: los sistemas abiertos y los sistemas cerrados.

Los sistemas abiertos se caracterizan por no estar protegidos de los factores ambientales y por lo tanto están expuestos a la contaminación y a los factores tales como la lluvia, el polvo, las aves, los insectos, etc.

Los sistemas cerrados tienen protección del medio ambiente con el objetivo de proteger al cultivo de la contaminación y mejorar las condiciones ambientales, entre ellas la temperatura. En el mundo entero, cuando se habla de un fotobioreactor se hace referencia a un sistema cerrado.

2.2. Sistemas abiertos

En esta categoría se encuentran los lagos y estanques naturales, los sistemas inclinados, los tanques circulares y los raceways.

Los lagos y estanques naturales han sido explotados por siglos por pueblos antiguos como la tribu Kanembu en África. Hasta los años 80, la empresa Sosa Texcoco Co. producía grandes cantidades de Spirulina en el lago Caracol en México.

En los sistemas inclinados el cultivo se bombea desde la parte baja hasta la parte alta de una superficie

inclinada. Existe gran interés en los sistemas inclinados debido a que en este tipo de sistemas se obtienen flujos altamente turbulentos con capas muy finas, lo que a su vez permite mantener altas concentraciones celulares y una alta relación superficie/volumen. Las desventajas que han presentado estos sistemas son las altas tasas de evaporación y pérdida de CO₂ y el alto requerimiento de energía que demanda bombear el cultivo durante todo el día.

Los tanques circulares han dejado de ser utilizados por las empresas industriales debido al alto costo de construcción y de la energía necesaria para mover los gigantes brazos mecánicos que se utilizan para proporcionar mezcla.

Los raceways son tanques con forma de pista ovalada que pueden ser construidos sobre el suelo con cualquier material que sea lo suficientemente resistente. Su construcción es relativamente barata y los grandes productores de Spirulina, entre ellos Earthrise Farms en California y Cyanotech en Hawaii los han utilizado por décadas. Las principales desventajas que tienen los raceways es que no pueden ser operados con niveles de agua superiores a los 15 cm debido a que niveles superiores pueden causar una gran reducción del flujo y de la turbulencia. El uso de este tipo de capa en el cultivo obliga a trabajar con densidades celulares muy bajas, lo que hace que el cultivo sea muy susceptible a la contaminación y se incrementa considerablemente el costo de la cosecha. También hay grandes pérdidas por evaporación, sobre todo en climas cálidos, donde también el control de la temperatura es muy deficiente.

2.3. Fotobioreactores

Un fotobioreactor es un sistema de cultivo de organismos fotótrofos en el que el cultivo no tiene contacto directo con el medio ambiente. Los principales tipos de FBR son: tubulares, planos, cilindros verticales y fundas, y los FBR axénicos.

Los FBR tubulares utilizan tubos de material transparente dispuestos en serie o en paralelo. El cultivo generalmente se recircula con una bomba o un airlift desde un tanque separado. Los FBR tubulares a su vez pueden ser en serpentina, en manifold y helicoidales. En los FBR en serpentina varios tubos transparentes se conectan en paralelo formando un lazo plano vertical u horizontal llamado fotoplataforma. Las principales desventajas de este sistema son las dificultades para controlar la temperatura y la acumulación del oxígeno fotosintético que se conoce que es un importante factor limitante del cultivo cuando llega a niveles de concentración tóxicos. En los FBR en manifold los



tubos transparentes están arreglados en paralelo y se unen a un manifold (recolector) al inicio y al final del sistema. Este tipo de sistema tiene las mismas desventajas del sistema en serpentina. En los FBR helicoidales un solo tubo flexible, generalmente de diámetro pequeño, se envuelve formando un cilindro vertical.

Los FBR planos han sido muy utilizados para cultivar organismos fotótrofos en laboratorio debido a que permiten medir con claridad la irradiancia que recibe el cultivo. Pese a su gran sencillez, este sistema ha sido poco utilizado en el cultivo industrial debido al alto costo de los materiales transparentes y su laboriosa operación.

Los cilindros verticales son sistemas simples en los que la mezcla se obtiene inyectando aire en el fondo del cilindro y son muy utilizadas en los laboratorios de producción de biomasa de algas destinada a la alimentación de estadios larvales de crustáceos, peces y moluscos. Un reactor vertical muy simple puede ser elaborado con una funda suspendida en una estructura. Aunque estas fundas duran poco, pueden ser fácilmente reemplazadas. La desventaja que tienen este tipo de sistemas es la relativamente baja relación superficie/volumen y la dificultad para manejar un gran volumen de cultivo.

Los FBR axénicos son sistemas diseñados para que puedan ser esterilizados y su uso está restringido a los laboratorios de investigación debido a alto costo de su construcción y mantenimiento.

2.4. Fotobioreactores industriales

Pocos FBR de escala industrial han sido construidos y operados, pero la mayoría han cerrado a los pocos meses de operación debido a fracasos de orden técnico y económico.

En todo el mundo, solo tres grandes sistemas comerciales están, aparentemente, en completa operación, las plantas construidas por Ökologische Produkte Altmark GmbH en Alemania y por Micro Gaia Inc y Aquasearch Inc en Hawai (USA). Desafortunadamente, no se conoce mucho de su productividad y características técnicas.

En Ecuador en cambio, los fotobioreactores de Aldanempres Cia. Ltda. ha trabajado continuamente desde el año 1998 y los de Mertens & Aso. S.A. desde el año 2006.

2.5. Criterios de diseño de fotobioreactores

Técnicamente, los criterios de diseño de los FBR deben apuntar a lograr alta productividad volumétrica y una eficiente conversión de la energía luminosa y, al

mismo tiempo, brindar la fiabilidad y estabilidad necesaria para el proceso de cultivo.

Un FBR eficiente no puede estar apropiadamente diseñado sin el adecuado conocimiento de la fisiología del cultivo en masa del organismo. Debido a que los micro-organismos fototróficos son altamente diversos en su morfología, requerimientos nutricionales, de luz, y resistencia al estrés; los FBR no pueden ser diseñados para manejar a todos los organismos o a todas las condiciones. Los principales criterios de diseño incluyen: el radio superficie a volumen, la orientación e inclinación, la mezcla, la descarga de gases, los sistemas de limpieza y de regulación de temperatura, y la transparencia y durabilidad del material de construcción. La facilidad para operar y escalar el cultivo y un bajo costo de construcción y operación también tiene una relevancia particular en los FBR industriales.

El radio entre la superficie iluminada de un reactor y su volumen (s/v) determina la cantidad de luz que entra en el sistema por cada unidad de volumen. Generalmente, a mayor radio s/v , es mayor la concentración celular a la que puede ser operado el reactor y es mayor la productividad volumétrica del cultivo.

Los sistemas orientados al sol generalmente tienen mejor productividad sobre todo si están ubicados en lugares de bajas latitudes.

La acumulación de oxígeno fotosintético en el cultivo es uno de los mayores problemas que enfrentan los FBR tubulares. Cuando el oxígeno alcanza niveles 4 o 5 veces mayores al nivel de saturación puede llegar a ser tóxico para muchos fotótrofos y se reduce la productividad. Por lo tanto, el sistema diseñado debe permitir un adecuado intercambio de gases en el cultivo.

La mezcla es necesaria para prevenir la sedimentación de las células, evitar la estratificación térmica, distribuir los nutrientes, remover el oxígeno generado por la fotosíntesis y asegurar que las células experimenten adecuados períodos de luz y oscuridad. El tipo de mezcla y la dinámica de fluido del cultivo influyen en la irradiancia y régimen de luz al las que las células están expuestas; factores clave que influyen en la productividad. La elección del dispositivo de mezcla y la intensidad del mezclado deberían ser determinadas por las características del organismo a ser cultivado. Generalmente, los cultivos de cianobacterias filamentosas y dinoflagelados no pueden ser mezclados con bombas debido a que su estructura celular es delicada.

La máxima productividad solo se puede lograr en la temperatura óptima de crecimiento. Mientras que los tanques abiertos están limitados por bajas temperaturas en la mañana, los FBR generalmente



requieren enfriamiento durante el medio día. El sombreado, la inmersión en baños de agua, y el rociado de agua, son las soluciones más comunes para evitar el sobre calentamiento de los FBR externos. El sombreado, para ser efectivo, requiere que una gran porción del reactor (mayor al 80%) sea cubierta durante las horas de máxima insolación; lo cual causa una significativa reducción en la productividad. El enfriamiento por inmersión en baño de agua es eficiente, pero su efectividad/costo es dudoso. El enfriamiento con rociado de agua puede ser una alternativa viable. Consideraciones económicas favorecen el enfriamiento evaporativo con el uso de intercambiadores de calor.

El carbón es el mayor componente del costo de producción de las micro-algas. El abastecimiento de dióxido de carbono en suspensiones poco profundas no es una tarea fácil porque el tiempo de residencia de las burbujas es insuficiente para completar la absorción, resultando en grandes pérdidas de CO_2 a la atmósfera. Inyectado el CO_2 en burbujas diminutas desde el fondo de una columna se puede incrementar la eficiencia de uso de este gas a más del 70 %.

Un criterio fundamental en el diseño de un FBR sustentable es la elección del material utilizado en la construcción de la fotoplataforma. Los materiales utilizados en FBR no deben ser tóxicos, deben tener una alta transparencia, alta resistencia mecánica, alta durabilidad (y resistencia a los factores ambientales), estabilidad química y bajo costo. La facilidad para su limpieza es otra característica operacional importante. Las ventajas y desventajas de los materiales tubulares más comunes usados para la construcción de FBR ha sido descrita por Tredeci (1999).

2.6. Productividad en fotobioreactores

Hay tres parámetros comúnmente utilizados para evaluar la productividad en los fotobioreactores. El primero es la productividad volumétrica (PV), que es la productividad por unidad de volumen del reactor (expresada como g/l/d), la segunda es la productividad por área (PA), que es la productividad por unidad de suelo ocupado por el reactor (expresada como $\text{g/m}^2/\text{d}$); y la tercera es la productividad del área iluminada (PSI), que es la productividad por unidad de área de reactor iluminada (expresada como $\text{g/m}^2/\text{d}$).

2.7. Fotobioreactores versus sistemas abiertos

A parte de la superficie expuesta, la mayor desventaja de los sistemas abiertos es que debido a que el nivel del cultivo no puede ser manejado a menos de 15 cm, se debe operar con concentraciones celulares muy bajas; y esto hace que el cultivo sea más

susceptible a la contaminación de otras algas, bacterias y protozoos. La mayor densidad poblacional, la protección contra los factores ambientales, y el mejor control de los parámetros del cultivo, hace que los FBR estén más protegidos contra la contaminación; y, por lo tanto, sean más higiénicos.

Aunque algunos FBR han logrado producciones de Spirulina mayores a las obtenidas en tanques abiertos, debido principalmente al mejor control de la temperatura, no han sido utilizados en producción industrial debido, seguramente, a que la mayor densidad celular y productividad no compensa el alto costo de inversión y operación.

3. Materiales y métodos

3.1. Criterios del diseño

Debido a que el clima del lugar donde se construyó el proyecto es templado se descartó utilizar un sistema de cultivo abierto y la única alternativa era un sistema cerrado que permita calentar el cultivo de manera artificial.

El cultivo bajo invernadero es muy utilizado en la serranía ecuatoriana debido a que es un sistema muy práctico y de costo relativamente bajo para proteger a los cultivos de los factores ambientales y elevar la temperatura ambiental. En el caso del FBR diseñado, el invernadero a más de elevar la temperatura del cultivo, ofrece una excelente protección de los factores ambientales contaminantes.

En el sistema de Aldanempres Cia. Ltda. se utilizan grandes bombas que tienen un alto requerimiento energético debido a que el flujo tiene una área tangencial relativamente grande ($0.044\text{-}0.264 \text{ m}^2$); lo que, como veremos más adelante, influye de manera directa en el dimensionamiento de la bomba. Por esta razón, se ideó un sistema de fotoplataforma conformado por un solo canal angosto, inclinado, y dispuesto en serpentina; que al tener un área tangencial menor (0.0498 m^2), permite utilizar una bomba más pequeña que tiene un menor requerimiento de energía. Aunque con un canal más angosto se podría utilizar una bomba aún más pequeña, por razones prácticas se diseñó un canal de 1.66 m de ancho.

Debido a las malas experiencias con fotocapas menores a 1 cm y a las posibles dificultades constructivas se decidió utilizar una fotocapa de 3 cm de altura.

Debido a que en el sitio destinado al proyecto la temperatura ambiental nocturna es baja ($4 - 12 \text{ }^\circ\text{C}$), se diseñó un tanque que, a más de permitir el bombeo del cultivo a la fotoplataforma durante su operación en el



día, no permita que el cultivo se enfríe durante la noche.

Para diseñar el reactor se aplicó la teoría de flujo en canales abiertos y también los principios de dinámica de fluidos.

El sistema de FBR diseñado vendría a ser una combinación del tipo plano inclinado y del de serpentina. Tiene una fotoplataforma de 10 m de ancho y 100 m de largo (1000 m^2), conformada por un canal de 600 m de largo y 1.66 m de ancho dispuesto en serpentina. El canal tiene la pendiente necesaria para asegurar una adecuada velocidad de flujo y está construido con liner (geomembrana) de polietileno de alta densidad, estacas, y cables, sobre una rampa conformada en la tierra. La fotoplataforma está cubierta por un invernadero de estructura metálica y plástico térmico para invernadero calibre 6. Cada FBR tiene un tanque donde el cultivo se almacena en la noche y que también sirve para bombear el cultivo durante la operación en el día. El tanque está excavado en la tierra e impermeabilizado con liner de PVC, y también está cubierto con un invernadero de menor tamaño. El fondo del tanque tiene pendiente para facilitar el desalojo y el bombeo del cultivo. Una bomba semiaxial bombea el cultivo desde el tanque hasta el inicio del canal por medio de una tubería de 6 pulgadas relativamente corta. Después de recorrer la fotoplataforma, el cultivo regresa al tanque por medio de un desagüe ubicado al final del canal. Cada tanque cuenta con un sistema de difusión de aire y/o CO_2 , que también mantiene mezclado el cultivo y permite un adecuado intercambio de gases durante la noche. Cada tanque también cuenta con una tubería de abastecimiento de medio de cultivo y nutrientes y una de CO_2 . El volumen de cultivo cosechado sale por una derivación de la tubería de descarga de la bomba.

En la fotoplataforma se produce la fotosíntesis en una fotocapa de apenas 3 cm de altura. Esta pequeña altura de fotocapa permite tener un índice s/v relativamente alto (33 m^{-1}), lo que a su vez permite mantener altas densidades celulares. No se escogió una altura de fotocapa menor para no tener problemas con el terminado de la pendiente del canal. Por el contrario, una altura de capa mayor reduciría el radio s/v .

Como el cultivo no está confinado en un tubo, el oxígeno producido en la fotosíntesis se libera con facilidad en la fotoplataforma y no se acumula en niveles peligrosos.

Durante las horas de luz, el cultivo recircula constantemente entre el tanque y la fotoplataforma. El flujo obtenido en la fotoplataforma y las irregularidades del canal producen la mezcla necesaria.

El cultivo se calienta gracias al efecto invernadero que se produce en la fotoplataforma y a la gran superficie expuesta al sol en relación al volumen del cultivo ($s/v 33 \text{ m}^{-1}$); funcionando como un gran intercambiador de calor. La temperatura se puede controlar con la manipulación de las ventanas del invernadero.

Durante la noche el cultivo se mantiene caliente gracias a que permanece protegido en el tanque, que además de ser construido en tierra y estar protegido con un pequeño invernadero, tiene muy poca superficie expuesta al aire por su bajo radio s/v (0.8 m^{-1}). El sistema de difusión del tanque permite inyectar el CO_2 requerido por el cultivo, facilita el intercambio gaseoso y mantiene mezclado el cultivo.

4. Resultados

4.1. Cálculos

La pendiente del canal (0.16%) fue calculada utilizando la teoría de flujo en canales abiertos para garantizar una velocidad de flujo de 30 cm/s.

El caudal de la bomba se calculó utilizando el área tangencial y la velocidad de flujo requerida en el canal. El cálculo de la altura dinámica total (14.4 pies) y el caudal de bombeo (240 gpm) permitieron dimensionar la bomba.

El volumen del tanque (40 m^3) es calculó en 1.3 veces el volumen de la fotoplataforma (30 m^3).

Se calculó que la exposición real del cultivo a luz solar es de 46 min/h.

4.2. Planos

El trabajo presenta en varios planos los detalles del FBR diseñado: vistas en planta, cortes, y detalles del tanque.

4.3. Costo de construcción

El costo de un FBR de 1000 m^2 es de $\$16.775^{00}$, por lo que el costo de construcción por m^2 es de $\$16^{78}$.

4.4. Construcción

El primer paso para construir los FBR fue conformar el terreno con una pendiente de 6° con la ayuda de un tractor de bulldózer. Cada uno de los 6 niveles del canal fue conformado con la ayuda de una motoconformadora. La nivelación y acabado final de la rampa del canal se hizo a mano.

La estructura del invernadero se fijó al terreno por medio de pequeños plintos de hormigón en las base de



los tubos verticales de cada sercha. El resto de los componentes de la estructura del invernadero se fijaron con suelda o pernos. El plástico de la cubierta y de las paredes del invernadero se fija a la estructura con tiras de madera.

La estructura de los canales se construyó con estacas elaboradas a partir de tubos metálicos, cables de acero trenzado, alambres y liner. El liner de polietileno se puso sobre la rampa de tierra y se fijó a la estructura del canal con grapas.

El tanque se excavó en el terreno con la ayuda de una retro-excavadora. El liner de PVC fue instalado por una empresa especializada y fue anclado a los bordes del tanque. La fosa para la bomba fue reforzada con paredes de bloque. Sobre el tanque también se construyó un invernadero más sencillo y de menor tamaño.

El acabado del FBR incluye la colocación de la bomba, de la tubería, y de la instalación eléctrica.

4.5. Operación y evaluación

Desde el punto de vista hidráulico y operativo, el FBR diseñado funciona totalmente de acuerdo a lo planificado.

El control de la temperatura es muy eficiente y por el contrario es necesario mejorar el calentamiento en los días fríos. En el tanque el cultivo pierde tan solo 2 °C en toda la noche.

En condiciones normales, el cultivo amanece con pH de 9.8 y en el transcurso del día puede llegar hasta 10.3; por lo que durante la noche es necesario inyectar CO₂ en el tanque.

La bomba consume 1000 watss (1.3 HP); por lo que el índice de consumo de energía es de 1 watt/m². Al comparar este valor con el índice de consumo de energía de Aldanempres Cia. Ltda. (4 watt/m²) y el índice de energía típico de un raceway (3 watt/m²) podemos ver que, en términos energéticos, el sistema diseñado es mucho más eficiente.

Aunque con las condiciones ambientales adecuadas la PSI al inicio del cultivo puede alcanzar los 15 g/m²/d, empieza a caer proporcionalmente al tiempo de vida del medio de cultivo pudiendo llegar a 4 g/m²/d al cabo de 3 meses de operación. Justamente, se ha observado que uno de los factores que más afecta la productividad del cultivo es el estado químico del medio de cultivo (Richmond, 2004). En base a datos de producción obtenidos en los 3 años de operación de los FBR de Mertens & Aso. S.A. se establece que la PV promedio que ha logrado el sistema de cultivo diseñado es 0.13 g/l y que la PSI promedio es 5.5 g/m²/d. Eso significa que, en promedio, el FBR de 1000 m² diseñado produce 5.5 kg de biomasa de Spirulina por día.

5. Discusión

El relativamente alto radio s/v (33 m⁻¹) del FBR diseñado permite mantener una alta densidad celular (de hasta 100 g/m²). La alta densidad celular a su vez permite utilizar una menor cantidad de medio de cultivo y reduce drásticamente el costo del medio de cultivo y de la cosecha. Sin embargo, la alta densidad celular también produce problemas con el manejo de los nutrientes y la microbiología del cultivo.

La orientación de los FBR permite aprovechar mejor la luz del sol en las primeras horas de la mañana. Esta orientación podría ser una desventaja en las horas de la tarde, pero debido a las condiciones climáticas de la zona, la luminosidad de la mañana generalmente es mejor que la del final del día. La inclinación de los FBR también permite un mejor aprovechamiento de los rayos solares de la mañana pero además evita el sombreado mutuo entre reactores.

La acumulación del oxígeno fotosintético que es un gran limitante en FBR tubulares, no es un problema en el sistema diseñado debido a que se libera con facilidad en el canal de la fotoplataforma y en el tanque.

Aunque no se observa sedimentación de la Spirulina en el canal de la fotoplataforma, se ha observado que en varios tramos el flujo se hace laminar y hace falta turbulencia, pese a las irregularidades que tiene el canal. Por lo tanto, es necesario evaluar un aumento en la velocidad de flujo o la posibilidad de agregar dispositivos que mejoren la mezcla.

Aunque el sistema de invernadero permite un adecuado calentamiento y control de la temperatura del cultivo en los días cálidos, es necesario mejorar el sistema de calentamiento en los días fríos.

El abastecimiento de CO₂ en general funciona bastante bien debido a la gran disponibilidad de este gas, pero es necesario mejorar la eficiencia del sistema de difusión en el tanque.

Los materiales con los que fueron construidos los FBR han demostrado tener una gran resistencia y durabilidad.

El costo de construcción del sistema es bastante razonable, tomando en cuenta el alto costo de otros sistemas de FBR construidos en otras partes del mundo.

En términos energéticos, el FBR diseñado ha demostrado ser muy eficiente y esto repercute favorablemente en el costo de producción.

La productividad del FBR diseñado (5.5 g/m²/d) está dentro del promedio mundial. Pero se debe recordar que la PV o la PSI lograda en cada empresa no depende únicamente del diseño del reactor; sino



que depende más bien de la interacción de varios factores, entre los que la cepa de Spirulina, el diseño del reactor, el manejo del cultivo y los factores ambientales (luz y temperatura) son los más importantes. Los resultados alcanzados en el inicio del cultivo demuestran que el potencial de productividad es mayor y que podría ser mejorado al mejorar la vida útil del medio de cultivo con un tratamiento.

Finalmente, el FBR diseñado ha demostrado tener una gran fiabilidad y varias ventajas en la operación. Estas ventajas incluyen las facilidades para la siembra, para el abastecimiento de nutrientes, aire y CO₂; y también para realizar la cosecha y limpieza del sistema.

El sistema de cubierta con invernadero es muy transparente y ofrece grandes ventajas en la operación y mantenimiento del sistema.

6. Conclusiones y recomendaciones

La conclusión general de este trabajo es que el fotobioreactor para cultivo industrial de Spirulina diseñado es un sistema totalmente confiable y eficiente.

Los 3 años de operación continua demuestran que también es un sistema sustentable en el tiempo.

Como en todo diseño, el sistema de cultivo propuesto es susceptible de ser mejorado.

Los datos presentados demuestran que para que un sistema de cultivo tenga una buena productividad es imprescindible que el lugar escogido para el montaje del proyecto tenga las condiciones climáticas más favorables.

Es necesario investigar métodos de tratamiento del medio de cultivo para de esta manera prolongar su período de vida útil y reducir los problemas derivados de su deterioro en el tiempo.

Sería interesante diseñar un sistema similar en el que el canal se construya con un material alternativo que permita reducir el costo de construcción.

Una torre de difusión de CO₂ puede ayudar a que la inyección de este gas en el cultivo sea más eficiente.

Es preferible contratar los servicios de empresas especializadas en la instalación de los invernaderos y de las geomebranas.

7. Referencias

- [1] Richmond, A. (2004) Handbook of Microalgal Culture. Blackwell Science Ltd. 178-210, 264, 267.
- [2] Vonshak, A. (1996). Spirulina platensis (Arthrospira), Physiology, cell-biology and biotechnology. Taylor & Francis. 221-224.