

DISEÑO DE UN FOTOBIOREACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A
PARTIR DE LA LUZ SOLAR

LIINA ROCÍO GUTIÉRREZ BARRAGÁN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2.017

DISEÑO DE UN FOTOBIOREACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A
PARTIR DE LA LUZ SOLAR

LIINA ROCÍO GUTIÉRREZ BARRAGÁN

Proyecto Integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

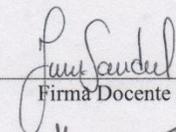
Director
Diego Rubio Fernández
Biólogo m. Sc
Grupo de investigación Biotecfua
Codirector
Juan Andrés Sandoval herrera
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2.017

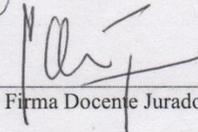
Nota de Aceptación (Dirección de Investigaciones)



Firma Docente Investigador



Firma Docente Jurado 1



Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D.C., Septiembre 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dr. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

*Dedico este proyecto:
A Dios y la Virgen María
A mis padres y hermano por siempre apoyarme incondicionalmente y motivarme a
ser una mejor persona cada día.
A toda mi familia por estar siempre apoyándome y ser una parte fundamental en
mi vida, por ser una familia tan amorosa e inseparable.
A mi novio por siempre ayudarme en todos los momentos y por ser incondicional.
A todos mis amigos, con los cuales compartimos experiencias inolvidables y por
estar siempre presentes.*

Agradezco:

Al Director Diego Rubio Fernández por ser la guía para desarrollar el proyecto de investigación.

Al Codirector Juan Andrés Sandoval Herrera por ser parte fundamental de este proyecto de investigación y por su grata colaboración.

A todos los profesores de la Fundación Universidad de América que ayudaron a formarme como profesional.

A mis amigos y compañeros por su preocupación y desinteresada colaboración en el desarrollo del proyecto.

A todas las personas que de una u otra manera me ayudaron en el avance de este trabajo.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| OBJETIVOS | 19 |
| 1. MÁRCO TEÓRICO | 20 |
| 1.1 MICROALGAS | 20 |
| 1.1.1 Sistemas de cultivo | 20 |
| 1.1.1.1 Sistemas Abiertos | 20 |
| 1.2 LUZ SOLAR | 23 |
| 1.2.1 Transmisión de la luz solar | 24 |
| 1.2.1.1 Absorción, Reflexión y Transmisión | 24 |
| 1.2.1.2 Luz polarizada | 26 |
| 1.2.2 Interacción de la luz solar sobre las microalgas | 27 |
| 2. METODOLOGÍA | 29 |
| 2.1 PRIMERA FASE | 30 |
| 2.2 SEGUNDA FASE | 31 |
| 2.3 TERCERA FASE | 32 |
| 2.4 CUARTA FASE | 33 |
| 3. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE CON RELACIÓN AL FOTOBIORREACTOR Y LA UBICACIÓN | 35 |
| 3.1 SELECCIÓN DEL FOTOBIORREACTOR | 35 |
| 3.1.1 Metodología. | 35 |
| 3.1.2 Resultados | 41 |
| 3.2 UBICACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR | 43 |
| 3.3 DESCRIPCIÓN DEL FOTOBIORREACTOR | 45 |
| 3.3.1 Material del fotobiorreactor | 46 |
| 3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA LUZ SOLAR | 47 |
| 3.4.1 Definición de la radiación solar sobre el lugar seleccionado | 47 |
| 3.4.2 Definición de la radiación solar sobre un FBR de pared plana de forma general | 49 |
| 3.4.3 Definición de la radiación solar sobre el FBR de pared plana seleccionado | 51 |
| 4. DESARROLLO DEL BALANCE DE ENERGÍA PARA EL SISTEMA | 54 |
| 4.1 BALANCE DE ENERGÍA | 54 |
| 4.1.1 Cálculo de la irradiancia incidente (luz que entra) | 54 |
| 4.1.2 Cálculo de la Irradiancia Transmitida | 57 |
| 5. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD TEÓRICA DEL SISTEMA | 67 |

| | |
|---|----|
| 5.1 DETERMINACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD | 67 |
| 5.1.2 Cálculo de la productividad del sistema | 68 |
| 6. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA | 71 |
| 6.1 PLANO DEL SISTEMA | 71 |
| 7. DISCUSIÓN | 73 |
| 7.1 APLICACIONES | 76 |
| 8. CONCLUSIONES | 78 |
| 9. RECOMENDACIONES | 78 |
| BIBLIOGRAFÍA | 80 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Variables respuesta seleccionados para el diseño de FBRs | 36 |
| Tabla 2. Configuraciones de fotobiorreactores al aire libre, de acuerdo con su diseño | 40 |
| Tabla 3. Ponderación de cada factor | 41 |
| Tabla 4. Especificaciones para Ibagué | 43 |
| Tabla 5. Elección del material | 47 |
| Tabla 6. Irradiación Global Horizontal media de Ibagué de todos | 48 |
| Tabla 7. Descripción de los ángulos mostrados en el plano del FBR | 50 |
| Tabla 8. Irradiancia Incidente de Ibagué para el día de muestra | 56 |
| Tabla 9. Coeficientes de reflexión para las interfases | 61 |
| Tabla 10. Irradiancia Transmitida para el día de muestra | 62 |
| Tabla 11. Ecuaciones para calcular la irradiancia promedio según la geometría del FBR | 64 |
| Tabla 12. Irradiancia promedio del día de muestra | 65 |
| Tabla 13. Valores de las constantes para la especie <i>Chlorella Vulgaris</i> | 68 |
| Tabla 14. Tasa de crecimiento específico y productividad del día de muestra | 69 |
| Tabla 15. Productividades más altas de todos los meses del 2016 | 70 |
| Tabla 16. Resumen de variables de decisión involucradas en el crecimiento de algas | 74 |
| Tabla 17. Resumen de información | 75 |
| Tabla 18. Producción de biomasa en las ubicaciones | 76 |

LISTA DE DIAGRAMAS

| | pág. |
|---|------|
| Diagrama 1. Metodología de la primera etapa | 30 |
| Diagrama 2. Esquema de cálculo para el balance de energía | 31 |
| Diagrama 3. Factores que influyen en la productividad de la biomasa | 32 |
| Diagrama 4. Metodología de la cuarta etapa | 33 |
| Diagrama 5. Metodología general de todo el proyecto | 34 |
| Diagrama 6. Definición del sistema desde sus variables | 38 |
| Diagrama 7. Propagación de la luz solar en el fotobiorreactor | 52 |
| Diagrama 8. Modelo de transmisión de la luz | 53 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|---|------|
| Gráfica 1. Ponderaciones calculadas para cada configuración | 42 |
| Gráfica 2. Irradiancia incidente para el día de muestra | 57 |
| Gráfica 3. Irradiancia transmitida para el día de muestra | 62 |
| Gráfica 4. Relación de la productividad con respecto a la irradiancia promedio del día de muestra | 69 |
| Gráfica 5. Tasa de crecimiento de las microalgas para el día de muestra | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Sistemas de cultivo abiertos y cerrados | 20 |
| Figura 2. Cultivo abierto | 21 |
| Figura 3. Fotobiorreactor de columna, fotobiorreactor tubular y fotobiorreactor de pared plana | 22 |
| Figura 4. Luz directa y difusa | 23 |
| Figura 5. Formas de propagación de la luz | 24 |
| Figura 6. Absorción y reflexión de la luz | 25 |
| Figura 7. Formas de transmitancia de luz | 25 |
| Figura 8. Polarización de la luz | 26 |
| Figura 9. Polarización de la luz | 27 |
| Figura 10. Distribución de la luz | 28 |
| Figura 11. División política del departamento del Tolima | 44 |
| Figura 12. Dimensiones del FBR de pared plana | 46 |
| Figura 13. Radiación global promedio de Ibagué | 47 |
| Figura 14. Esquema para cualquier fotobiorreactor de pared plana con relación a la luz solar | 49 |
| Figura 15. Propagación de la luz | 51 |
| Figura 16. Irradiancia Incidente | 55 |
| Figura 17. Irradiancia Transmitida | 58 |
| Figura 18. Interfase 1 - aire y pared exterior del FBR | 59 |
| Figura 19. Interfase 2 - pared interna del FBR y el cultivo de microalgas | 59 |
| Figura 20. Irradiancia Promedio (acumulada) | 63 |
| Figura 21. Plano del sistema | 71 |
| Figura 22. Vista Superior | 72 |
| Figura 23. Vista lateral | 72 |

ABREVIATURAS Y UNIDADES

FBR: Fotobiorreactor

I: Irradiancia Transmitida (W/m^2)

I_{av} : Irradiancia Promedio (W/m^2)

I_o : Irradiancia Incidente (W/m^2)

ka: Coeficiente de absorción (m^2/g)

nm: nanómetro

PAR: Radiación Fotosintéticamente Activa ($\mu mol/m^2/s$)

α_v : Ángulo de elevación del sol ($^\circ$)

β : Pendiente del reactor ($^\circ$)

γ : Ángulo de azimut de la superficie ($^\circ$)

θ : Ángulo de incidencia solar ($^\circ$)

θ_z : Ángulo cenital ($^\circ$)

μ : Tasa de crecimiento específico (h^{-1})

$\mu_{m\acute{a}x}$: Tasa de crecimiento máximo específico (h^{-1})

ρ : Productividad ($g/h \cdot m^3$)

GLOSARIO

ÁNGULO CENIT: posición del sol perpendicular con respecto al suelo.

BIOMASA: materia prima para la producción principalmente de biocombustibles.

BIOINCRUSTACIÓN: aglomeración de microorganismos en un recipiente.

CLOROFILA: pigmento presente en todas las plantas que se encarga de absorber la luz para realizar la fotosíntesis.

FOTOBIOREACTOR (FBR): sistemas cerrados que mantienen al cultivo aislado del exterior y con condiciones controladas de temperatura, presión, pH y agitación.

FOTOINHIBICIÓN: impedimento para que los organismos realicen la fotosíntesis debido al exceso de radiación.

FOTÓN: partícula más pequeña por la que la luz está compuesta, con masa de reposo cero y carga cero.

FOTOSÍNTESIS: transformación de la energía solar en energía química, elaborando azúcares a partir de dióxido de carbono, agua, nutrientes y luz.

IRRADIANCIA: “velocidad a la que se transfiere la energía radiante a través de un área unitaria de una superficie, comúnmente medida en vatios por metro cuadrado”¹.

IRRADIACIÓN: “integración de la irradiancia durante un período de tiempo específico, comúnmente medido en julios por metro cuadrado”¹.

PLEXIGLÁS: resina sintética transparente y flexible parecida al vidrio.

RADIACIÓN: ondas electromagnéticas medidas en fotones, las formas más conocidas de radiación son las ondas de radio, ondas de microondas, infrarrojo, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA (RFA): también denominada PAR por su significado en inglés (Photosynthetically active radiation), es la luz que se encuentra en una longitud de onda entre 400 a 700 nanómetros, ya que esta es la luz que utilizan las plantas para realizar la fotosíntesis.

¹ CLEVELAND Cutler, MORRIS Christopher. “Dictionary of Energy (Expanded Edition)”. Gran Bretaña.: Elsevier, 2009. p 274 – 414. ISBN 978-0-08-096491-1.

RESUMEN

El presente trabajo presenta los resultados del diseño de un fotobiorreactor para un campo abierto para todo el año 2016, teniendo en cuenta a la luz solar como principal parámetro, partiendo de la selección del tipo de fotobiorreactor y la ubicación del mismo en una ciudad de Colombia.

Se caracterizó la luz solar incidente en el lugar de ubicación del fotobiorreactor, con base en datos tomados del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), a partir de esta información se definieron y calcularon las cantidades de energía incidente sobre el fotobiorreactor, es decir la irradiancia transmitida, y la cantidad de luz que alcanzaba el cultivo de microalgas realmente, es decir la irradiancia promedio.

A partir de la cantidad de energía que alcanzaba el cultivo, se determinó la tasa de crecimiento específico a la que iban a crecer las microalgas, considerando la irradiancia promedio, una tasa de crecimiento específico máximo y una constante de fotoinhibición, en donde estos dos últimos valores fueron tomados de la literatura.

Finalmente se calculó la productividad del cultivo.

La productividad de biomasa obtenida para todo el 2016 fue de $0,88 \text{ g/h}\cdot\text{m}^3$, lo cual es 5% menor comparada con las alcanzadas en tres países (Países Bajos, Francia y Argelia), en donde en promedio consiguieron una productividad de $0,93 \text{ g/h}\cdot\text{m}^3$; con lo cual se puede concluir que implementar este tipo de sistemas para el cultivo de microalgas en un país que no presenta estaciones, es una gran herramienta para disminuir el consumo de los combustibles fósiles y contribuir de esta manera al medio ambiente.

PALABRAS CLAVE: fotobiorreactor, luz solar, sistemas cerrados, irradiancia, productividad.

INTRODUCCIÓN

El aumento sostenido en el consumo energético mundial, ha sido impulsado tanto por el crecimiento socioeconómico de los países como por el aumento de la población mundial, que se estima alcanzará los 9.100 millones para el año 2050². Las abundantes reservas mundiales de combustibles fósiles y los bajos costos de su extracción y refinación, hacen suponer que estos recursos seguirán siendo utilizados de manera preferencial en los próximos años.

El planeta está regido por un modelo energético que está basado en los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón mineral y el gas natural. No obstante, la dependencia de un número finito de reservas y el alto impacto ambiental asociado, ha impulsado el estudio y desarrollo de combustibles limpios alternos. Específicamente, resulta preocupante la emisión de gases nocivos a la atmósfera; gases que provocan lluvias ácidas, debilitamiento gradual de las plantas, sofocamiento irritante en el tracto respiratorio de animales y que han demostrado estar relacionados con el calentamiento global del planeta. El dióxido de carbono, CO₂ es considerado como el principal contribuyente dentro del grupo de gases de efecto invernadero, y está asociado mayoritariamente con la combustión de hidrocarburos de origen fósil.

Dentro de los combustibles alternos propuestos, se destaca el uso de microalgas como fuente de biomasa con potencial para la obtención de biocrudo. El biocrudo puede ser empleado como sustituto del petróleo tanto para la obtención de combustibles refinados, como para la producción de bioquímicos y productos alimenticios³. Una de las mayores ventajas de las microalgas frente a otras fuentes de carbono, se basa en su alto rendimiento fotosintético, el cual es entre tres y seis veces mejor que la de los cultivos terrestres⁴.

Las microalgas son microorganismos unicelulares que necesitan de cuatro componentes para crecer: luz, nutrientes, agua y CO₂ para realizar la fotosíntesis. Su biomasa, se compone mayoritariamente de lípidos, proteínas y carbohidratos.

En términos de tamaño celular y velocidad de duplicación las microalgas presentan ventajas competitivas en relación con cultivos de células vegetales. En promedio, el tamaño de una microalga oscila entre 1 y 10 µm y su tiempo de duplicación entre las 10 y las 36 horas. Adicionalmente, son capaces de crecer en

² PASQUEVICH, Daniel. La creciente demanda mundial de energía frente a los riesgos ambientales. Asociación Argentina para el progreso de las ciencias. Argentina. 2011

³ SLEGGERS, P. M., *et al.* Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. [1]: Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2013.

⁴ FIGOLI, Alberto y CASSANO, Alfredo. BASILIE, Angelo. Membrane Technologies for Biorefining. Gran Bretaña.: Elsevier, 2016. p. 12 – 13. ISBN 978-0-08-100451-7.

ambientes altamente diversos, tanto ácidos como alcalinos; mientras que su cultivo no requiere de agua potable, ni un suelo fértil³.

Existen varias estrategias para cultivar microalgas, puede ser en sistemas abiertos o cerrados. La necesidad de cumplir con los requerimientos lumínicos del cultivo, implica el uso de fotobiorreactores cuando se prefieren los sistemas cerrados. El diseño de este tipo de reactores debe tener en cuenta tanto la intensidad, como la duración de los periodos de irradiación⁵.

Es por esto que, por medio de este proyecto, se determinará la disponibilidad de la luz solar sobre un fotobiorreactor para la producción de biomasa a partir de microalgas. De esta manera, se pretende aprovechar la constante disponibilidad solar debido a la zona latitudinal en la que se encuentra Colombia

⁵ GRIMA MOLINA, Emilio. ACIÉN FERNÁNDEZ, Francisco Gabriel y FERNÁNDEZ SEVILLA, José María. Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas. [Consultado el Oct 16, 2016] Disponible en: <http://www.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un fotobiorreactor bajo el parámetro de la luz solar para un campo abierto

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la radiación solar incidente con relación al fotobiorreactor y la ubicación
- Desarrollar el balance de energía para el sistema
- Estimar la productividad teórica del sistema
- Realizar una representación del sistema

1. MÁRCO TEÓRICO

1.1 MICROALGAS

Las microalgas son microorganismos unicelulares eucariotas que tienen la capacidad de realizar fotosíntesis; es decir, son capaces de producir biomasa orgánica a partir de CO₂ como fuente de carbono y de luz como fuente de energía⁵.

1.1.1 Sistemas de cultivo. Las microalgas se pueden cultivar de dos maneras, como se muestra en la Figura 1. El primero, en sistemas de cultivo abiertos (*open ponds*) o el segundo, en sistemas de cultivos cerrados, denominados también fotobiorreactores (FBRs).⁶

Figura 1. Sistemas de cultivo abiertos y cerrados



Fuente: Anonymous Abierto. [1]. -10-24T18:00:09+00:00. [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en: <https://biotechmind.wordpress.com/2014/10/24/bioethanol-biocombustibles-biodiesel-biofuel/abierto/>

1.1.1.1 Sistemas Abiertos. Son estanques o balsas que están en contacto con la atmósfera, como se presentan en la Figura 2 y según Pandey *et al.*⁷, son mucho menos costosos de construir en grandes volúmenes. Sin embargo, tienen eficiencias y productividades bajas, y generalmente se asocian con un mayor riesgo de contaminación. En cuanto al control de los parámetros de cultivo, no es posible controlar temperatura, pH o presión. Adicionalmente, la tasa de evaporación del agua es variable y puede afectar las concentraciones de diversos compuestos en solución. En consecuencia, la eficiencia de mezclado puede verse afectada, tanto en términos de los metabolitos disueltos como de los

⁶ ARESTA Michele, DIBENEDETTO Angela y DUMEIGNIL Franck. “Biorefineries – An Introduction”. Alemania.: Walter de Gruyter GmbH, 2015. p 58 – 65. ISBN 978-3-11-033153-0.

⁷ PANDEY Ashok, *et al.* “Industrial Biorefineries and White Biotechnology”. Alemania.: Elsevier, 2015. p 48 - 55. ISBN 978-0-444-63453-5.

microorganismos suspendidos. En últimas, una distribución no uniforme de las microalgas podría desencadenar una sobreexposición a la luz y a los nutrientes del medio en algunos lugares, mientras que en otros las células podrían crecer en condiciones limitantes. Es por esto que algunos reactores abiertos incluyen sistemas de agitación que pueden incrementar la productividad, pero que requieren de una mayor inversión inicial. Valores típicos de productividades de biomasa reportadas para varias especies en sistemas abiertos varían entre los 10 g/m² y los 70g/m²⁷.

Figura 2. Cultivo abierto



Fuente: Anonymous The Different Kinds of Chlorella's Production. [1]. -04-14T21:59:50+00:00. [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en: <https://chlorelle.wordpress.com/2011/04/14/the-different-kinds-of-chlorellas-production/>

Según Pandey *et al*⁷, los fotobiorreactores son sistemas cerrados y permiten que las algas sean cultivadas en un ambiente controlado. Estos bioreactores pueden disponerse en interiores, o como es más común al aire libre, donde se puede aprovechar de la luz solar.

La construcción y operación de los fotobiorreactores es costosa debido a los altos requerimientos de energía, el alto costo de los materiales de construcción y de los sistemas de control. Actualmente, investigadores alrededor del mundo trabajan en la resolución de los retos que afectan el crecimiento celular, como son el sobrecalentamiento, la bioincrustación y la acumulación de oxígeno. A pesar de estos factores adversos, los sistemas cerrados ofrecen la capacidad de controlar los principales parámetros de cultivo para estudiar su influencia y obtener productividades de biomasa más altas en comparación con los sistemas abiertos.

Para que las microalgas crezcan y se obtengan productividades altas, se debe tener en cuenta la cantidad y disponibilidad de luz a las que van a ser sometidas, dada su importancia como principal parámetro determinante de la eficiencia de fotosíntesis. Cuando el cultivo se realiza al aire libre para utilizar la luz solar, se debe evaluar la disponibilidad del recurso durante todo el año. Por ejemplo, en lugares con estaciones, en verano se obtendrán altas tasas de crecimiento, pero en invierno la baja disponibilidad de luz podría ocasionar bajas productividades.

En este sentido, los lugares más prácticos para este tipo de cultivos son las áreas tropicales o semi-tropicales carentes de estaciones y con disponibilidad más o menos constante de luz solar⁶.

La Figura 3 muestra diferentes tipos de fotobiorreactores para cultivo de microalgas. Los más comunes, son los reactores tubulares, de columnas y de pared plana. Empleando diseños como estos, y las microalgas pueden crecer bajo condiciones de irradiación luminosa y temperatura controlada; con una fijación aumentada de dióxido de carbono, gracias a la inclusión de una corriente de gas burbujeada a través del medio de cultivo⁶. Las algas reciben luz solar directamente a través de las paredes transparentes del envase o por medio de fibras o tubos ligeros que canalizan el producto obtenido en los colectores de luz solar. Estos están hechos de plástico transparente o de vidrio expuesto al sol ya sea en el aire libre o en invernaderos.

Para considerar un cultivo exitoso dentro de un FBR, se deben tener en cuenta ciertos criterios que están directamente relacionados con la eficiencia de conversión de energía solar: relación superficie / volumen; orientación e inclinación; mezcla e intercambio gaseoso, limpieza y regulación de la temperatura y durabilidad del material⁷.

Figura 3. Fotobiorreactor de columna, fotobiorreactor tubular y fotobiorreactor de pared plana



Fuente: Anonymous Inicio. [1]. -08-08. [Consultado el Jul 15,2017]. Disponible en: <http://www.algaenergy.es/>, BIOTECH, I. G. V. Photobioreactor. [1]. 25 February, 08:53:30. [Consultado el Jul 15,2017]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photobioractor_PBR_500_P_IGV_Biotech.jpg

1.2 LUZ SOLAR

Independientemente de qué sistema se esté considerando, es necesario establecer un equilibrio entre la disponibilidad de luz y las concentraciones de biomasa⁷. La eficiencia de mezclado es esencial para la disponibilidad de la luz, así como la eliminación de los gradientes nutricionales, térmicos y gaseosos⁷. Los ciclos de luz o de sombra cortos pueden ralentizar la tasa de crecimiento; mientras que, por el contrario, la luz intensa (como puede ocurrir en áreas desertizadas o en biorreactores) no garantiza un crecimiento rápido, dado que puede modificar la función celular misma.

“La luz solar es el espectro de frecuencia total de la radiación electromagnética emitida por el sol, particularmente la luz infrarroja, visible y ultravioleta”⁸. Existen dos formas básicas a través de las cuales la radiación solar puede llegar a la Tierra, tal como se muestra en la Figura 4. La primera, conocida como directa, es aquella en la que la “luz está brillante y emite un calor radiante”⁸; mientras que la difusa, se caracteriza por la presencia de un objeto, como las nubes que se interpone en el camino de la luz, y solo una porción de esta es capaz de atravesarla.

Figura 4. Luz directa y difusa



Fuente: Anonymous Que tiempo atmosférico os gusta mas? [1]. Nov 13 [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en: <http://listas.20minutos.es/lista/que-tiempo-atmosferico-os-gusta-mas-372201/>, Anonymous Sol entre nubes al amanecer. [1]. [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en: <http://todofondos.com/f/67842>

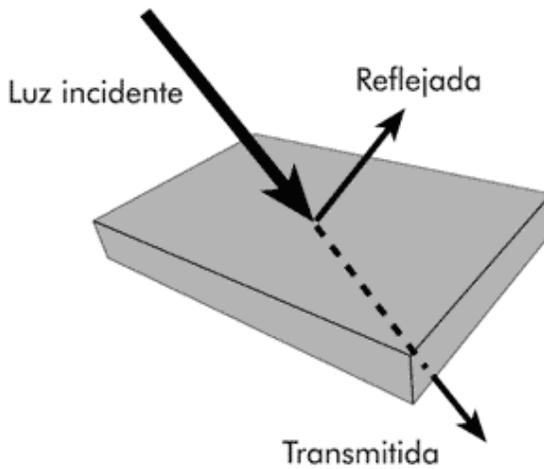
“La luz solar brillante proporciona una iluminancia de aproximadamente 100.000 lux o lúmenes por m² en la superficie terrestre. La composición de la luz solar a

⁸ CISBE. “Buildings for Extreme Environments – Arid”. Gran Bretaña.: CISBE, 2014. p 21 – 22. ISBN 978-1-906846-43-5

nivel del suelo, con el sol en el cenit, es decir en lo más alto del cielo, es de aproximadamente 527 W de radiación infrarroja, 445 W de luz visible y 32 W de radiación ultravioleta”⁸.

1.2.1 Transmisión de la luz solar. Cuando los haces de luz solar caen sobre cualquier objeto, puede suceder una combinación de tres cosas: la luz puede ser absorbida, reflejada y transmitida⁹ (Figura 5).

Figura 5. Formas de propagación de la luz

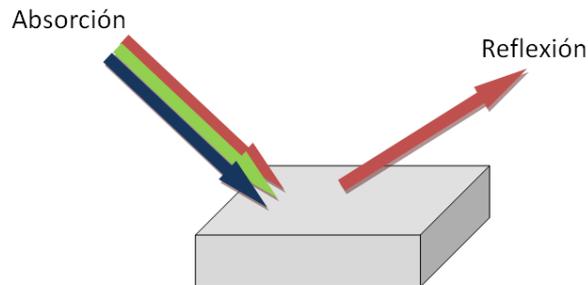


Fuente: RODRIGUEZ, Hugo. Curso de Sensitometria 2004. [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en: http://www.hugorodriguez.com/cursos/curso_sensit_02.htm

1.2.1.1 Absorción, Reflexión y Transmisión. Como se muestra en la Figura 6, la absorción ocurre cuando la luz incide sobre el objeto y penetra dentro de este. De otro lado, la reflexión sucede cuando el haz de luz incidente rebota sobre el objeto, ya sea de forma directa o difusa. La primera, ocurre cuando la luz es reflejada sobre una superficie lisa, como un espejo; obteniendo una luz intensa que rebotará con el mismo ángulo con que llegó a la superficie. La segunda, ocurre cuando la luz se refleja sobre superficies rugosas, en donde la luz rebotará en varios ángulos y se tendrá una intensidad de luz distinta a la del haz incidente⁹.

⁹SMALLMAN, R. E y NGAN, A. H. W. Physical Metallurgy and Advanced Materials. 7 Ed. Gran Bretaña.: Elsevier, 2007. p. 284 – 285. ISBN 978 0 7506 6906 1

Figura 6. Absorción y reflexión de la luz

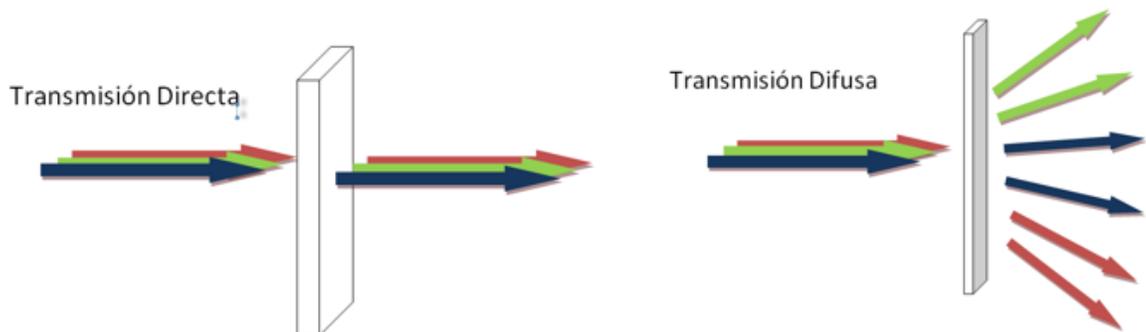


Fuente: RODRIGUEZ, Hugo. Curso de Sensitometria 2004. [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en: http://www.hugorodriguez.com/cursos/curso_sensit_02.htm

Finalmente, la transmitancia ocurre cuando el rayo de luz atraviesa el objeto, como se presenta en la Figura 7. De nuevo, existen dos tipos de transmisión⁹.

- Directa: la luz pasa a través del objeto y no se provocan cambios de dirección o calidad de esta. Este fenómeno ocurre cuando un haz de luz atraviesa el aire.
- Difusa: la luz traspasa un objeto con textura. En estos casos, los rayos transmitidos no lo hacen en una sola dirección, sino que se desvían en muchas direcciones.

Figura 7. Formas de transmitancia de luz



Fuente: RODRIGUEZ, Hugo. Curso de Sensitometria 2004. [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en:
http://www.hugorodriguez.com/cursos/curso_sensit_02.htm

1.2.1.2 Luz polarizada. Cuando la luz solar incidente toca cualquier objeto o superficie plana entre dos medios transparentes, como lo pueden ser el aire y el vidrio, (Figuras 8 y 9); una parte de esta luz se reflejará quedando parcialmente polarizada. La cantidad de polarización dependerá del ángulo de incidencia de refracción de los medios¹⁰. Se debe tener en cuenta que cuando el ángulo reflejado y el refractado se encuentran perpendiculares, la luz reflejada estará completamente polarizada.

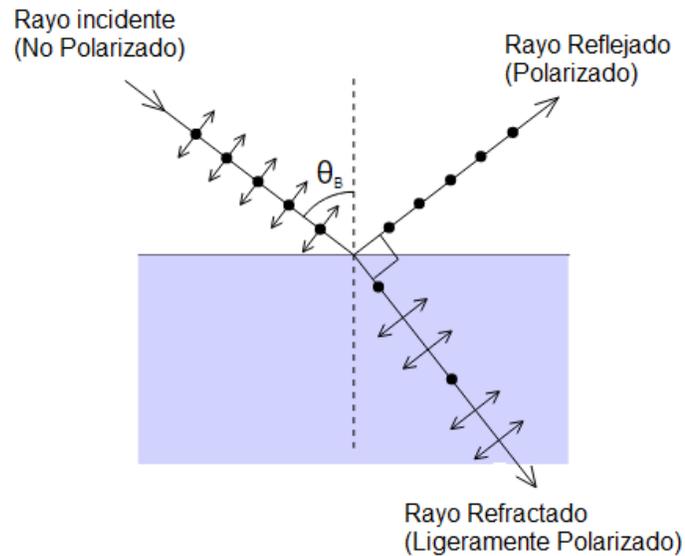
Figura 8. Polarización de la luz



Fuente: Anonymous Lentes Polarizadas: ¿Qué son, para que sirven y cómo diferenciarlas? [1]. -11-13T15:20:14+00:00. [Consultado el Feb 15,2017]. Disponible en: <http://sunglassesrestorer.es/lentes-polarizadas-que-son-para-que-sirven-y-como-diferenciarlas/>

¹⁰ BHATTACHARYA, D.K. y TANDON, Poonam Engineering Physics. India.: Oxford University Press. 2015. p 91. ISBN: 978-0-19-945281-1.

Figura 9. Polarización de la luz

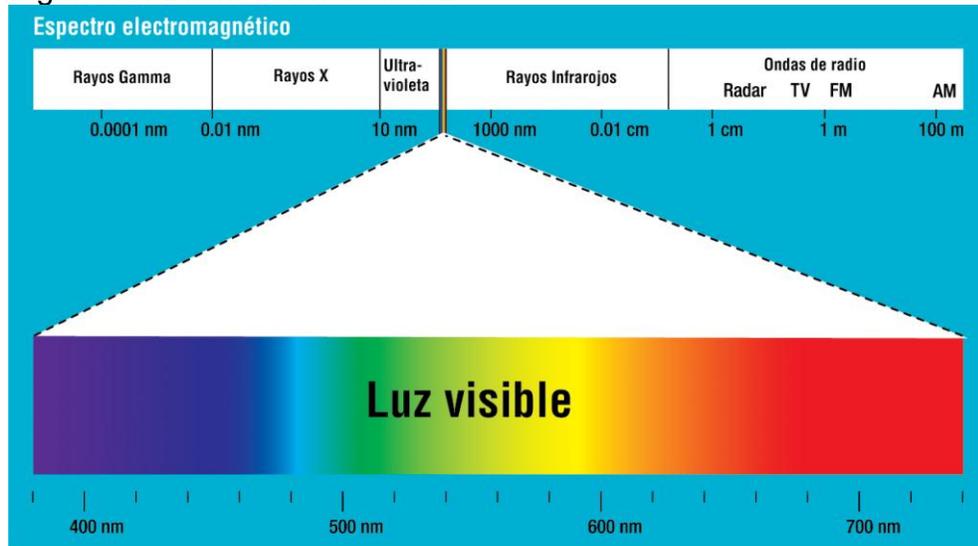


Fuente: VELASCO, Madelyne. Polarización.
[1]. -09-01 20:18:55 UTC. [Consultado el Jul
15,2017]. Disponible en:
[https://es.slideshare.net/madelitap12/polarizac
in-5110140](https://es.slideshare.net/madelitap12/polarizacin-5110140)

1.2.2 Interacción de la luz solar sobre las microalgas. El espectro de casi toda la radiación electromagnética solar que golpea la atmósfera de la tierra abarca un rango desde los 290 nm hasta 24000 nm. Esta banda se puede dividir en cinco regiones: ultravioleta C, ultravioleta B, ultravioleta A, luz visible y luz infrarroja¹.

La radiación que es asimilada por los cultivos microalgales, es la que puede activar la fotosíntesis, es decir la radiación fotosintéticamente activa (RFA o PAR). Dentro del espectro electromagnético (Figura 10), la RFA está en el rango de luz visible; es decir los haces de luz con longitudes de onda comprendida entre los 700 y 400 nm.

Figura 10. Distribución de la luz



Fuente: Anonymous Percepción de la luz. [1]. [Consultado el Jul 15,2017]. Disponible en: <http://essilorla.com/salud-visual/como-funciona-el-ojo-humano/percepcion-de-la-luz/>

2. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se dividió en cuatro fases. En la primera fase (Diagrama 1), se seleccionó el tipo de fotobiorreactor, se determinaron las dimensiones y el material del cual iba a ser construido. Así mismo, se definió la localización en donde se ubicaría el FBR y finalmente se evaluó el comportamiento de la luz solar sobre el sitio y el fotobiorreactor.

En la segunda fase (Diagrama 2), se desarrolló el balance de energía considerando los conceptos generales propuestos por Doran¹¹. Los cálculos se realizaron partiendo de la geometría del FBR, la disponibilidad de luz solar que existe en la ubicación seleccionada para el fotobiorreactor, la cantidad de luz solar que atraviesa y se refleja del reactor y la cantidad de luz solar que le llega realmente al cultivo de microalgas.

En la tercera fase (Diagrama 3) se calculó la productividad teórica que tendría el FBR. Para ello, se tuvo en cuenta la velocidad específica de crecimiento de las microalgas, que depende principalmente de la irradiancia dentro del fotobiorreactor. Una vez conocida esta función, se obtuvo una correlación entre la productividad de la biomasa y la irradiancia promedio dentro del FBR.

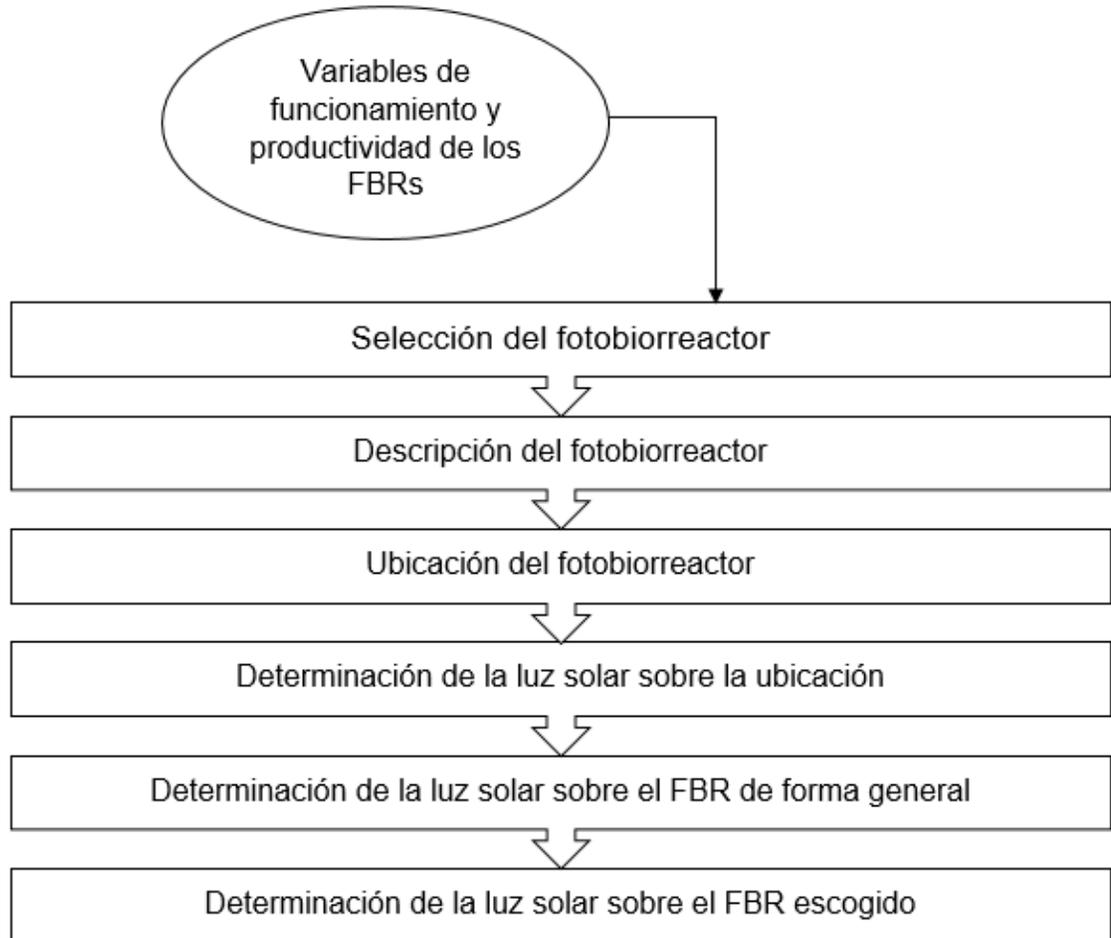
En la cuarta y última fase (Diagrama 4), se realizó la representación del fotobiorreactor por medio del programa SOLID EDGE, comprendida por la vista superior y lateral de este.

En el Diagrama 5, se presenta la metodología general del proyecto.

¹¹ DORAN, Pauline M. Bioprocess Engineering Principles. 1st ed. Oxford: Academic Press, 1995.

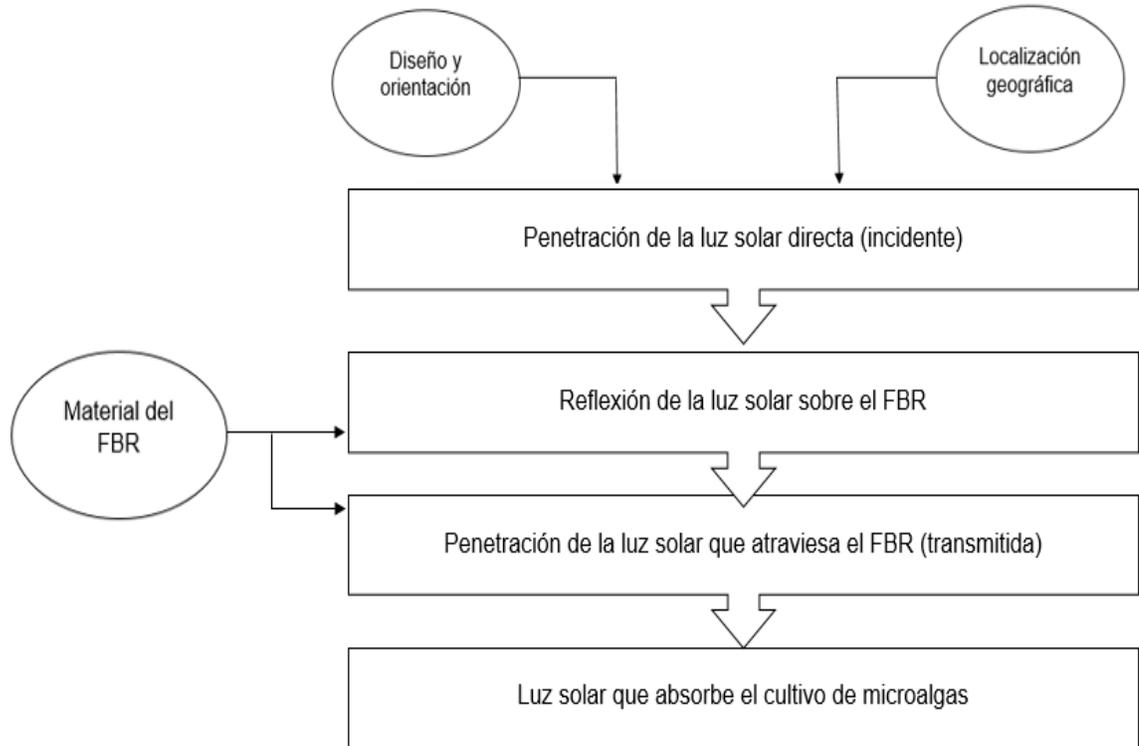
2.1 PRIMERA FASE

Diagrama 1. Metodología de la primera etapa



2.2 SEGUNDA FASE

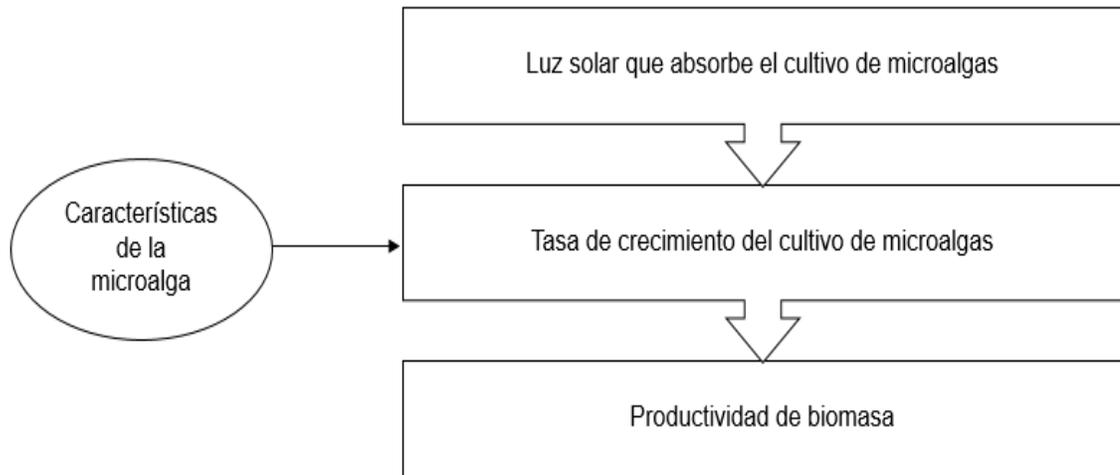
Diagrama 2. Esquema de cálculo para el balance de energía



Basado en: POSTEN, Clemens. WALTER, Chistian. *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*. Berlín/Boston.: Guyter, 2012. 266 p. ISBN: 978-3-11-022501-3 y SLEGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: *Applied Energy*. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

2.3 TERCERA FASE

Diagrama 3. Factores que influyen en la productividad de la biomasa



Basado en POSTEN, Clemens. WALTER, Chistian. *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*. Berlín/Boston.: Guyter, 2012. 266 p. ISBN: 978-3-11-022501-3 y SLEGGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: *Applied Energy*. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

2.4 CUARTA FASE

Diagrama 4. Metodología de la cuarta etapa

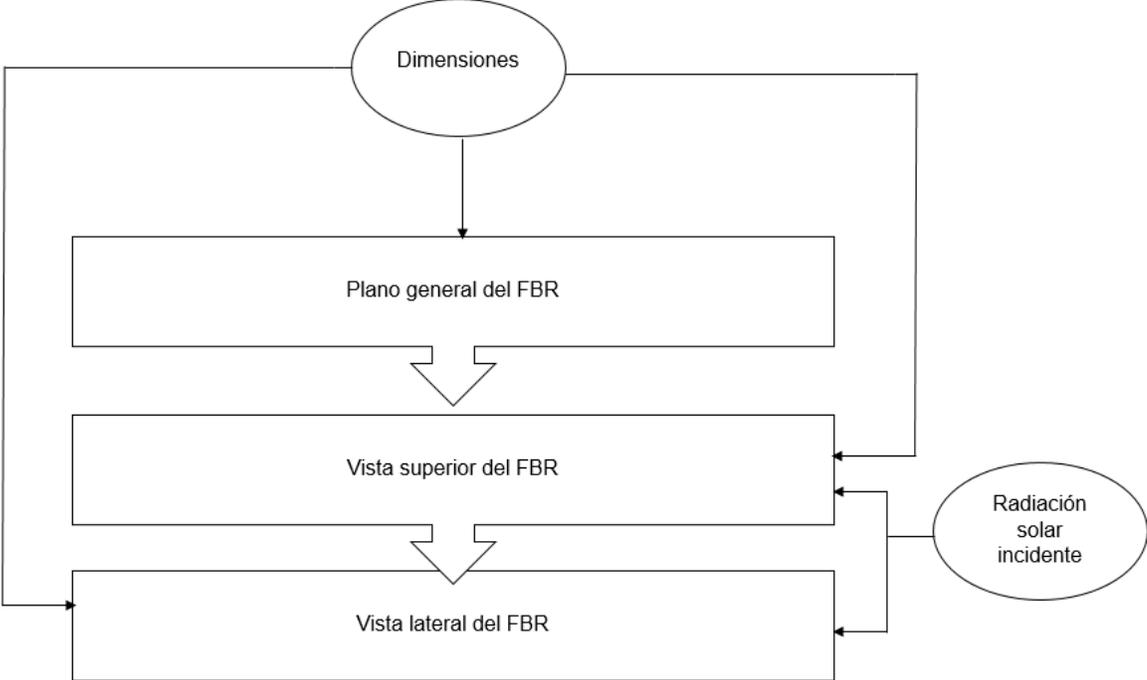
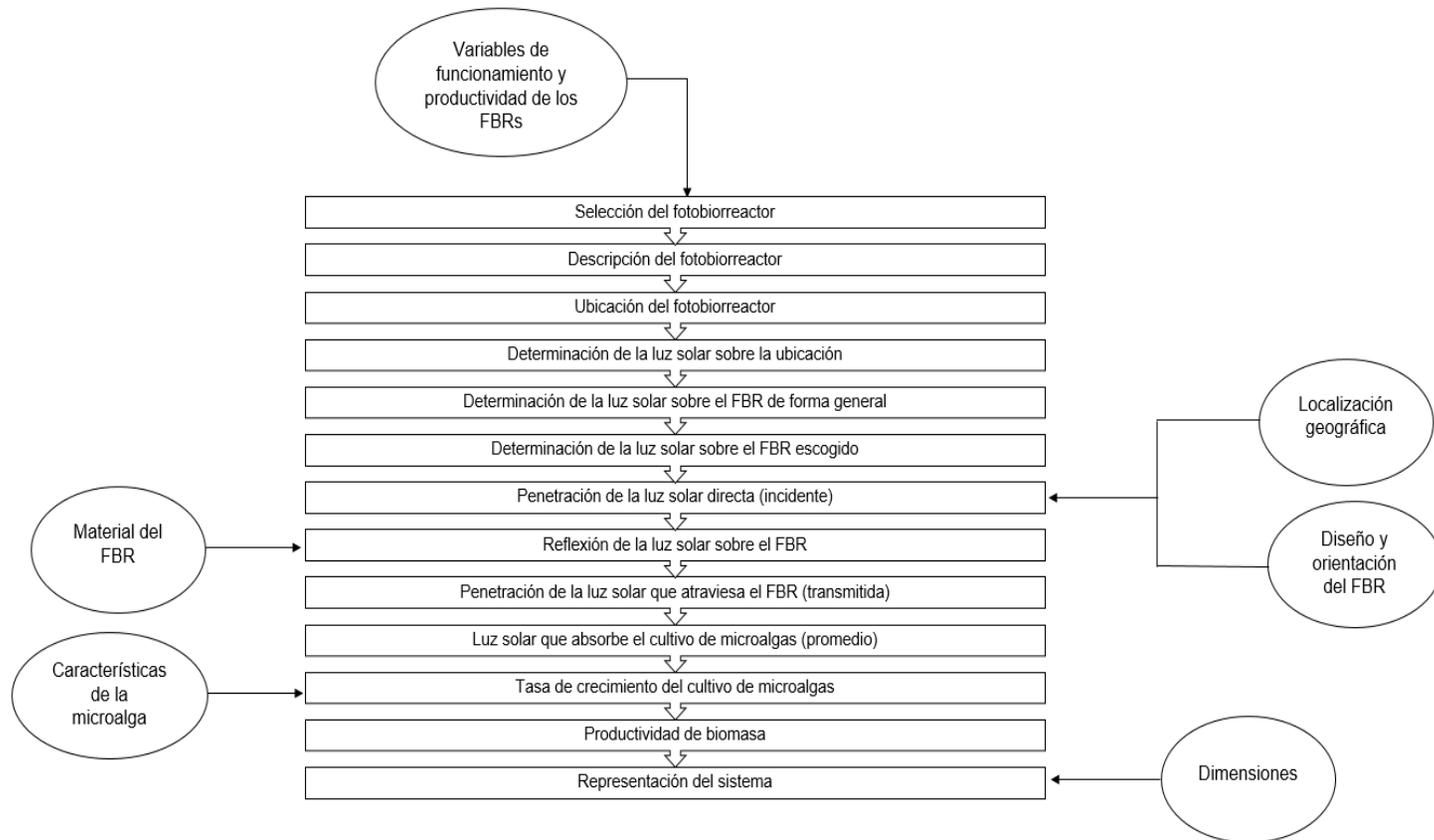


Diagrama 5. Metodología general de todo el proyecto



Basado en: POSTEN, Clemens. WALTER, Chistian. Microalgal Biotechnology: Potential and Production. Berlín/Boston.: Guyter, 2012. 266 p. ISBN: 978-3-11-022501-3 y SLEGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE CON RELACIÓN AL FOTOBIORREACTOR Y LA UBICACIÓN

3.1 SELECCIÓN DEL FOTOBIORREACTOR

3.1.1 Metodología. Se considera que el desempeño de un fotobiorreactor depende de varios factores o variables de diseño que se reflejan en aspectos como la eficiencia fotosintética y la productividad volumétrica de biomasa. Con el objeto de definir un diseño base, se consideraron las variables de funcionamiento y productividad de los FBRs, para posteriormente relacionarlas con los datos reportados en la literatura.

Para jerarquizar estas variables, se realizó una revisión bibliográfica (Tabla 1), haciendo énfasis en los parámetros de respuesta seleccionados por cada autor.

Tabla 1. Variables respuesta seleccionados para el diseño de FBRs

| Fuente | Nombre del artículo | Variable (s) respuesta |
|---|--|---|
| de Vree, <i>et al.</i> , 2015 ¹² | Comparison of four outdoor pilot- scale photobioreactors | <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia Fotosintética • Productividad por área |
| Ramírez Mérida, Queiroz Zepka y Jacob-Lopes, 2013 ¹³ | Fotobiorreactor: Herramienta Para Cultivo De Cianobacterias | <ul style="list-style-type: none"> • Productividad Volumétrica |
| Wang, Lan y Horsman, 2012 ¹⁴ | Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses | <ul style="list-style-type: none"> • Productividad Volumétrica • Eficiencia Fotosintética |
| Slegers, <i>et al.</i> , 2011 ¹⁵ | Design scenarios for flat panel photobioreactors | <ul style="list-style-type: none"> • Productividad Volumétrica |
| Carvalho, Meireles, y Malcata, 2006 ¹⁶ | Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances | <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia Fotosintética • Productividad por área |
| Janssen, <i>et al.</i> , 2003 ¹⁷ | Enclosed Outdoor Photobioreactors: Light Regime, Photosynthetic Efficiency, Scale-Up, and Future Prospects | <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia Fotosintética |
| Ación Fernández, <i>et al.</i> , 2001 ¹⁸ | Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: assessment of design and performance | <ul style="list-style-type: none"> • Productividad Volumétrica |
| Tredici, Zittelli y Autotrofi, 1997 ¹⁹ | Efficiency of Sunlight Utilization: Tubular Versus Flat Photobioreactors | <ul style="list-style-type: none"> • Productividad Volumétrica • Eficiencia Fotosintética |

¹² DE VREE, Jeroen. BOSMA, Rouke. JANSSEN, Marcel. BARBOSA, Maria. WIJFFELS, René. "Comparison of four outdoor pilot-scale photobioreactors". En: Biotechnology for Biofuels. Agosto 2015. vol. 8, no. 1, p. 215.

¹³ RAMÍREZ MÉRIDA, Luis Guillermo. QUEIROZ ZEPKA, Leila. JACOB-LOPES, Eduardo. "Fotobiorreactor: Herramienta para cultivo de cianobacterias". En: Ciencia Y Tecnología. 2013. vol. 6, no. 2, p. 9–19.

¹⁴ WANG, Bei. LAN, Christopher. HORSMAN, Mark. "Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses". En: Biotechnology Advances. Agosto, 2012. vol. 30, no. 4, p. 904–912.

¹⁵ SLEGGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

¹⁶ CARVALHO, Ana. MEIRELES, Luis. MALCATA, Xavier. "Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances". En: Biotechnology Progress, 22(6), 1490–1506.

¹⁷ JANSSEN, Marcel. TRAMPER, Johannes. MUR, Luuc. WIJFFELS, René. Enclosed outdoor photobioreactors: Light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects. En: Biotechnology and Bioengineering. Octubre, 2001. vol. 81, no. 2, p. 193–210.

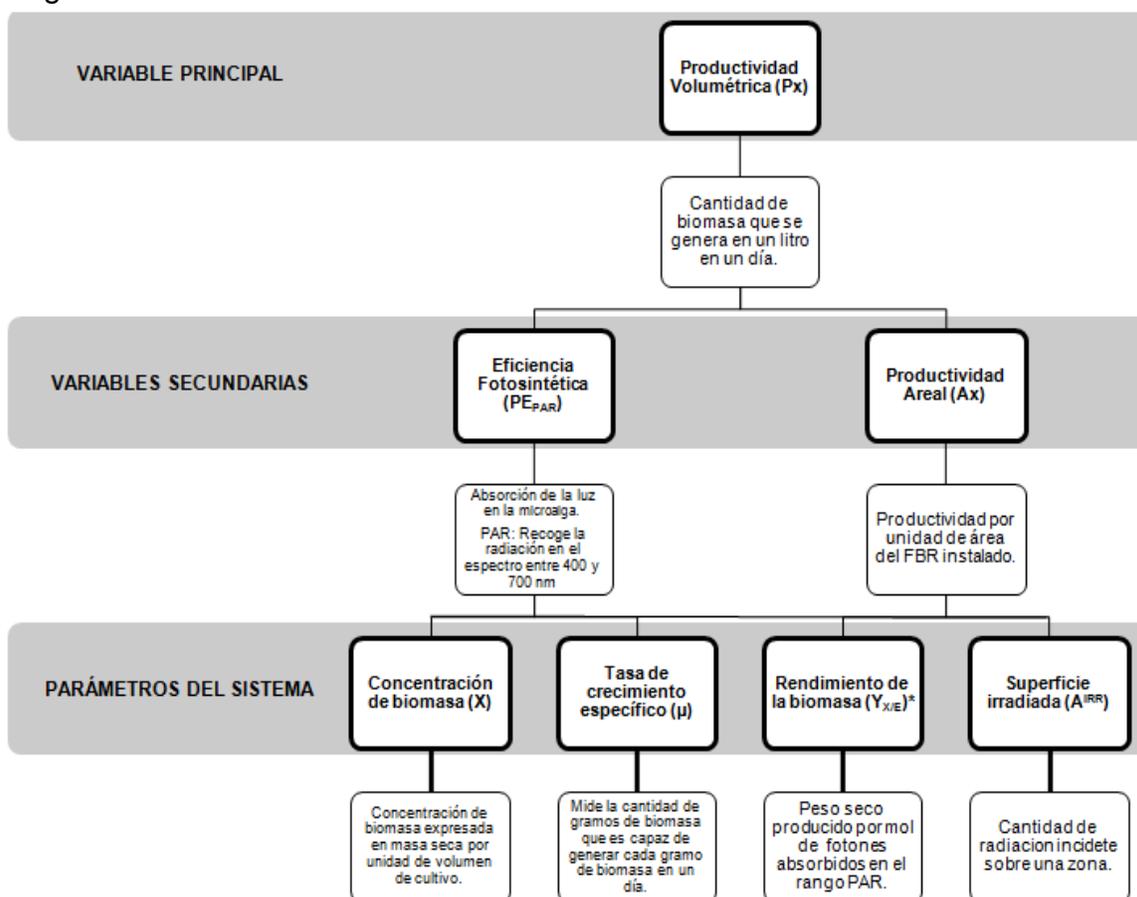
¹⁸ ACIÓN FERNÁNDEZ, F. G. FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M. SÁNCHEZ PÉREZ, J. A. MOLINA GRIMA, E. CHISTI, Y. "Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: Assessment of design and performance". En: Chemical Engineering Science. Abril 2001. vol. 6, no. 8, p. 2721–2732.

¹⁹ TREDICI, Mario. ZITTELLI, Graciela. "Efficiency of Sunlight Utilization: Tubular Versus Flat Photobioreactors". En: Biotechnology and Bioengineering. Enero, 1998. vol. 57, no. 2, p. 187–197.

Se puede evidenciar en la Tabla 1, que el 63% de las fuentes consultadas incluyeron la productividad volumétrica dentro de las variables respuesta al momento de evaluar el funcionamiento del fotobiorreactor.

Teniendo en cuenta esto, se presenta el Diagrama 6, en donde se muestra la definición en orden de interés del sistema a partir de sus variables, con sus respectivas definiciones.

Diagrama 6. Definición del sistema desde sus variables



Fuente: GRIMA MOLINA, Emilio. ACIÉN FERNÁNDEZ, Francisco Gabriel y FERNÁNDEZ SEVILLA, José María. Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas. {16 de octubre de 2016}. Disponible en: <http://www.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html> y JANSSEN, Marcel. TRAMPER, Johannes. MUR, Luuc. WIJFFELS, René. Enclosed outdoor photobioreactors: Light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects. En: Biotechnology and Bioengineering. Octubre, 2001. vol. 81, no. 2, p. 193–210.

Partiendo de recopilaciones previas hechas por otros autores, sobre las configuraciones estándar y especiales de FBRs durante las últimas dos décadas²⁰, se estudió la superficie irradiada, la productividad volumétrica y por unidad de área, la concentración de la biomasa, la velocidad específica de crecimiento, el rendimiento de la biomasa y la eficiencia fotosintética. Haciendo uso de esta información, y teniendo en cuenta la importancia de las variables respuesta seleccionadas para el presente estudio (Diagrama 6), se seleccionó el FBR.

²⁰ OLIVIERI, Giuseppe. SALATINO, Piero. MAEZOCCELLA, Antonio. “Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: configurations, operating strategies and applications”. En: Chemical Technology and Biotechnology. Octubre 2013. vol. 89, no. 2, p. 178 – 195.

Los criterios de selección del FBR se relacionan con aspectos de la productividad del equipo a partir de la energía lumínica recibida. Dado que se quiere implementar un diseño que se fundamente en el uso de energía solar, se seleccionan los diseños que se reportan en exteriores, es decir sin fuentes adicionales o artificiales de luz, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Configuraciones de fotobiorreactores al aire libre, de acuerdo con su diseño

| DISEÑO | CONFIGURACIÓN | SUPERFICIE IRRADIADA A^{IRR} (m ²) | PRODUCTIVIDAD VOLUMETRICA P_x (g /L* d) | PRODUCTIVIDAD AREAL - Ax (g/m ² *día) | CONCENTRACIÓN DE BIOMASA X (g/L) | TASA DE CRECIMIENTO ESPECIFICO μ (d ⁻¹) | RENDIMIENTO DE LA BIOMASA $Y_{X/E}$ (g/mol ¹) | EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA PE (%) |
|--------------------|----------------------------------|---|--|---|---------------------------------------|--|--|------------------------------------|
| PARED PLANA | FPA Pulsado | 2 | 20 | 420 | 2,5 | 0,3 | 1,5 | 14 |
| | Mezclador estático plano | 0,5 | 0,6 | 14 | | | 0,5 | 5 |
| TUBULAR | TUR | 4,4 | 2,7 | 6,8 | 6 | 0,5 | 0,8 | 8 |
| | Tubular helicoidal | 1,43 | 2,3 | 15 | 3,8 | 0,6 | 0,4 | 3 |
| | TUR | 4,4 | 2,2 | 5,5 | 8 | 0,3 | 0,9 | 8 |
| | Tubular helicoidal | 20,8 | 1,8 | 51 | 1,8 | 1 | 0,8 | 8 |
| | Tubular helicoidal | 10 | 1,4 | 10 | 3 | 0,8 | 0,2 | 2 |
| | Tubular helicoidal cónico | 1 | 1,2 | 33 | 1,5 | 1,8 | 0,7 | 5 |
| | Mezclador estático tubular | 1 | 1,2 | 46 | 1,5 | 0,8 | 1,3 | 12 |
| | Mezclador estático tubular | 0,18 | 1,1 | 37 | 1,5 | 0,7 | 1 | 9 |
| | Mezclador estático tubular | 1 | 1 | 35 | 1 | 0,9 | 1 | 9 |
| | Tubular helicoidal | 4,51 | 0,9 | 17 | 2,4 | 0,4 | 0,3 | 3 |
| | Invernadero con recolector solar | 1,2 | 0,5 | 32 | 1,7 | 0,3 | 0,5 | 4 |
| | Tubular helicoidal | 10 | 0,5 | 4,1 | 1,8 | 0,3 | 0,1 | 1 |
| | Mezclador estático tubular | 15 | 0,2 | 10 | 1,7 | 0,1 | 0,3 | 3 |
| AIRLIFT | ILA | 0,06 | 1 | 19 | 3,3 | 0,6 | 0,4 | 4 |
| COLUMNA | Anular | 5,3 | 0,6 | 44 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 7 |
| ABIERTOS | ARID raceway | 50 | 0 | 3,5 | 0,9 | 0 | 0,1 | 1 |
| | TLF abierto | 224 | 4,3 | 38 | 45 | 0,1 | 0,6 | 7 |
| | TLF abierto | 0,63 | 4 | 51 | 14 | 0,5 | 1 | 11 |
| | TLF abierto | 55 | 3,1 | 23 | | | 0,5 | 6 |
| | TLF | 0,54 | 2,7 | 70 | 8,5 | 0,3 | 1,4 | 15 |
| | TLF abierto | 224 | 2,5 | 22 | 45 | 0,1 | 0,7 | 7 |
| | TLF abierto | 224 | 1,9 | 19 | 11 | 0,2 | 0,4 | 4 |
| OTROS | Cultura Adjunta | 0,12 | 0,7 | 65 | 50 | 1,3 | 1,5 | 15 |

Fuente: OLIVIERI, Giuseppe. SALATINO, Piero. MAEZOCCELLA, Antonio. "Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: configurations, operating strategies and applications". En: Chemical Technology and Biotechnology. Octubre 2013. vol. 89, no. 2, p. 178 – 195

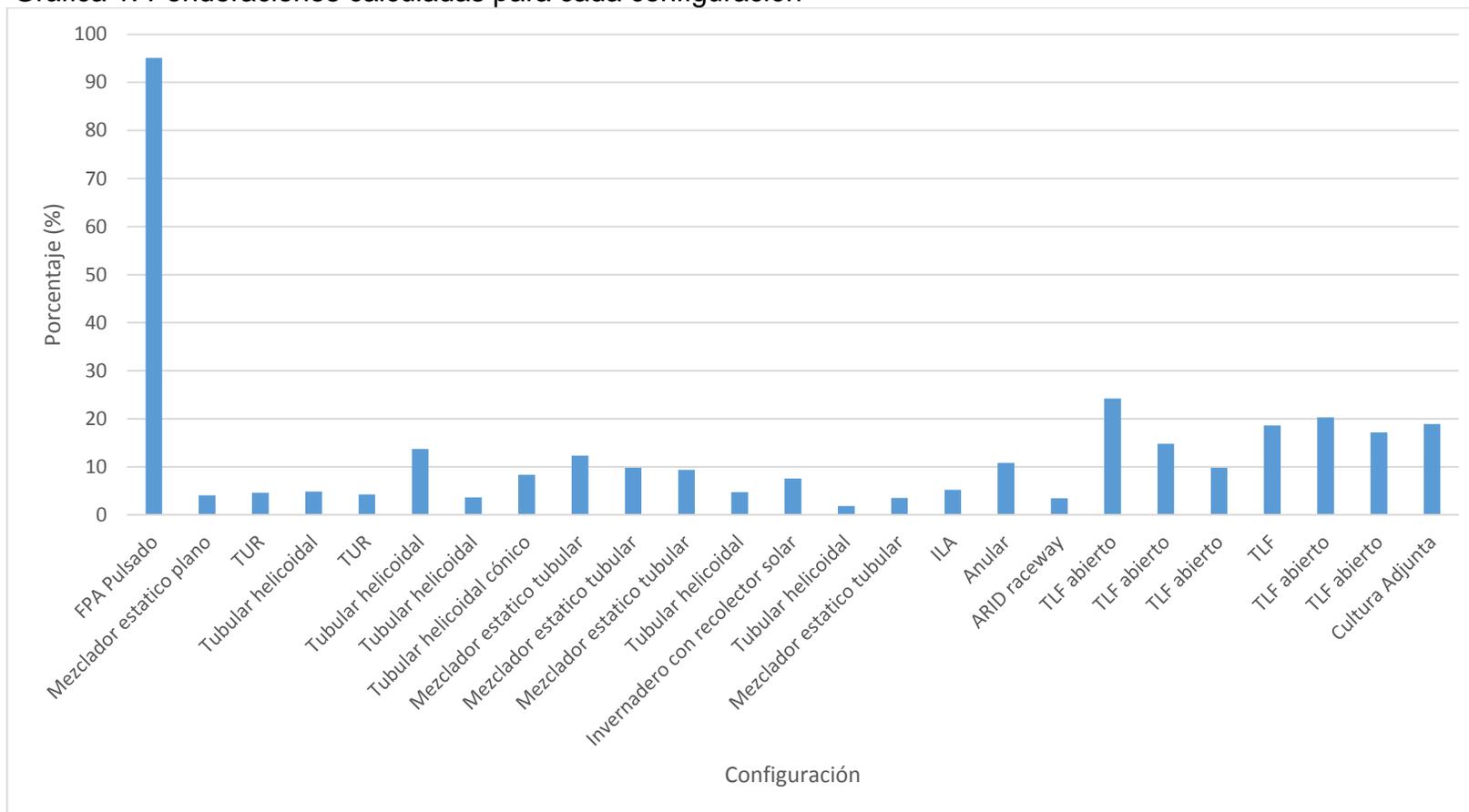
Se realizó una ponderación lineal sobre las siete variables, en donde se asignó el mayor valor a la variable principal, un valor intermedio a las variables secundarias y el menor valor a los parámetros del sistema; los valores establecidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Ponderación de cada factor

| Factor | Ponderación |
|--|-------------|
| Productividad Volumétrica (P_x) | 0.4 |
| Eficiencia Fotosintética (PE_{PAR}) | 0.2 |
| Productividad Areal (A_x) | 0.2 |
| Superficie Irradiada (A^{IRR}) | 0.05 |
| Concentración de biomasa (X) | 0.05 |
| Rendimiento de la biomasa ($Y_{X/E}$) | 0.05 |
| Tasa de crecimiento específico (μ) | 0.05 |
| TOTAL | 1 |

3.1.2 Resultados. Al aplicar las ponderaciones de la Tabla 3 en cada variable de la Tabla 2, se obtuvo una nueva puntuación ponderada, la cual se muestra en la Gráfica 1.

Gráfica 1. Ponderaciones calculadas para cada configuración



Fuente: OLIVIERI, Giuseppe. SALATINO, Piero. MAEZOCCELLA, Antonio. "Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: configurations, operating strategies and applications". En: Chemical Technology and Biotechnology. Octubre 2013. vol. 89, no. 2, p. 178 – 195

De acuerdo con la información contenida en la Gráfica 1, la configuración con más alta puntuación es la de pared plana con Airlift pulsado con el 95,12%; comparado con un 24,205% para la configuración de TLF abierto que se ubica en segunda posición. Con esta marcada diferencia, se seleccionó el diseño de un fotobiorreactor de pared plana para continuar con la metodología propuesta.

3.2 UBICACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR

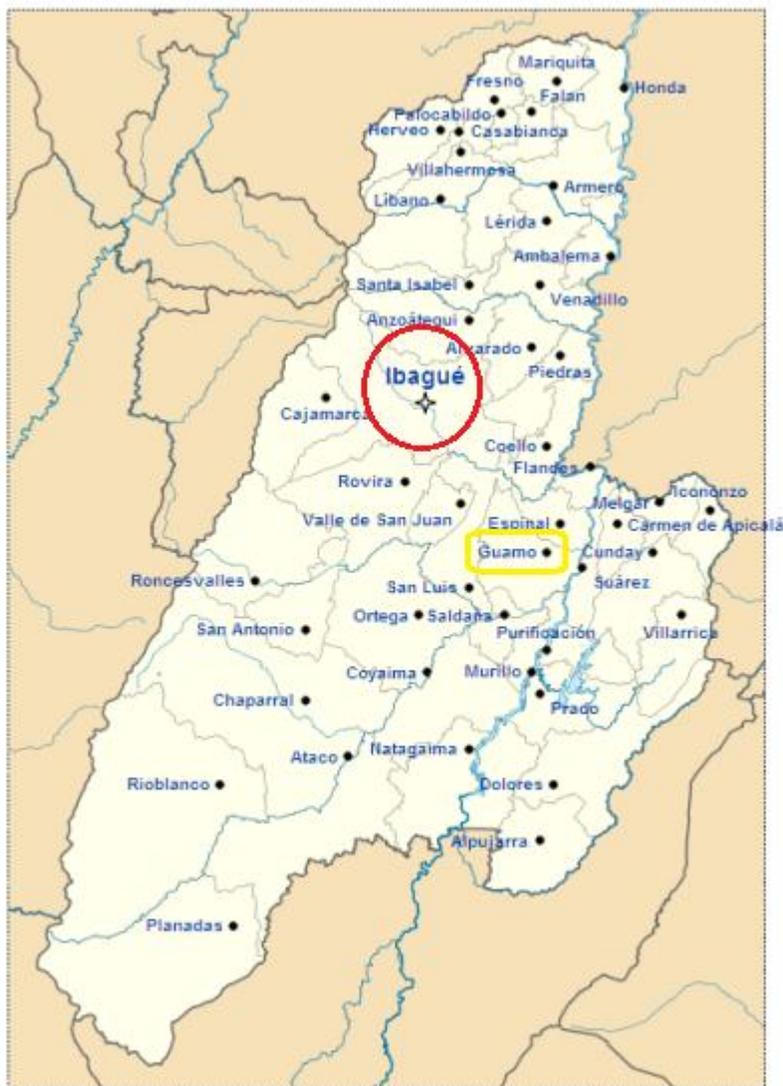
Una de las principales motivaciones para realizar este proyecto, es la disponibilidad de un terreno en el municipio del Guamo en el Tolima (Figura 11). Sin embargo, tras una revisión bibliográfica sobre la radiación solar en esta ubicación, se determinó que esta no era suficiente para la ejecución del proyecto. Producto de este análisis, se seleccionó la ciudad de Ibagué, Tolima (Figura 11). En la Tabla 4 se presentan la ubicación geográfica de este lugar.

Tabla 4. Especificaciones para Ibagué

| | |
|---|---------|
| Altitud (metros sobre el nivel del mar) | 1.285 |
| Latitud (°) | 4.433 |
| Longitud (°) | -75.217 |
| Latitud Norte del paralelo del Ecuador (°) | 74 |
| Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich (°) | 75.5 |

Fuente: PELÁEZ, Omar, *et al.* Agenda Ambiental del Municipio de Ibagué. Ibagué. 2010. 208 p. ISBN: 978-958-99672-0-1. y DB City. [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://es.db-city.com/Colombia--Tolima--Ibagu%C3%A9>

Figura 11. División política del departamento del Tolima



Fuente: Plan Frutícola Nacional. Desarrollo de la Fruticultura en Tolima. Bogotá D.C. Noviembre, 2006.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL FOTOBIORREACTOR

Como se definió previamente, el fotobiorreactor que se empleará en el proyecto es uno de pared plana, el cual estará dispuesto en sitio de forma vertical con una orientación norte – sur, como se ilustra en la Figura 12.

Para Carvalho, Meireles y Malcara¹⁶, el principal parámetro que afecta el diseño de un fotobiorreactor de pared plana es la penetración de luz, buscando una alta relación superficie – volumen. Dicha penetración es crucial si se quiere mejorar la eficiencia fotosintética, es decir la absorción de la luz solar en el cultivo de microalgas; lo que a su vez resulta en una condición necesaria para alcanzar altas productividades de producto y biomasa.

De acuerdo con los trabajos de Janssen, Tramper y Mur¹⁷, los reactores de panel plano consisten en una caja transparente rectangular con una profundidad de baja profundidad, que varía entre 1 y 5 cm. El concepto original de estos reactores es hacer un uso eficiente de la luz solar, por lo tanto, los paneles estrechos se construyen generalmente de modo que alcancen elevadas proporciones área / volumen¹⁶. Por esta razón, se prefieren grosores pequeños¹⁴. Adicionalmente, el material de construcción de los paneles debe ser transparente, por lo que se prefiere vidrio, plexiglás o PVC¹³.

Partiendo de que el principal objetivo del presente proyecto es comprender la interacción entre la luz solar incidente sobre un cultivo de microalgas en la ciudad de Ibagué y la productividad de biomasa teórica que se obtendría; se fijarán dimensiones a escala piloto para el FBR. Teniendo en cuenta el interés por evaluar la viabilidad del proyecto a esta escala, el diseño se basó en los trabajos desarrollados por Zhang, Miyachi y Jurano²¹ y Carvalho, Meireles y Malcara¹⁶, dado que cumple con las características y restricciones mencionadas previamente.

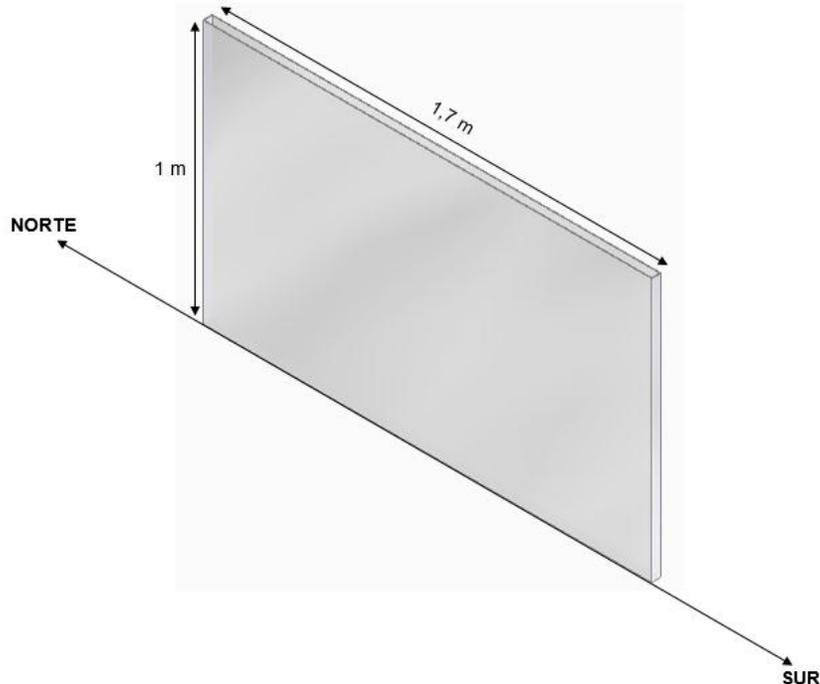
El FBR tendrá una profundidad cercana a la que se menciona en las referencias consultadas (0,03 m), un largo de 1 m, un ancho de 1,7 m y un volumen de 24 litros, como se muestra en la Figura 15. De esta manera se obtiene una relación superficie / volumen de $70,83 \text{ m}^{-1}$, (ecuación 1). Este parámetro, se encuentra

²¹ ZHANG, K.; MIYACHI, S. y KURANO, N. Evaluation of a vertical flat-plate photobioreactor for outdoor biomass production and carbon dioxide bio-fixation: effects of reactor dimensions, irradiation and cell concentration on the biomass productivity and irradiation utilization efficiency. [O]:2000.

dentro del rango sugerido en la literatura de 20 hasta 200 m⁻¹ ²²; lo que significa que se tendrá una buena distribución de luz sin que haya fotoinhibición.

$$\text{Relación } \frac{\text{superficie}}{\text{volumen}} = \frac{1,7 \text{ m} * 1 \text{ m}}{0,024 \text{ m}^3} = 70,83 \text{ m}^{-1} \quad \text{Ecuación 1}$$

Figura 12. Dimensiones del FBR de pared plana



Fuente: ZHANG, K.; MIYACHI, S. y KURANO, N. Evaluation of a vertical flat-plate photobioreactor for outdoor biomass production and carbon dioxide bio-fixation: effects of reactor dimensions, irradiation and cell concentration on the biomass productivity and irradiation utilization efficiency. [0]:2000.

3.3.1 Material del fotobiorreactor. Para elegir el tipo de material con el que se construirá el FBR se tuvieron en cuenta aspectos técnicos y financieros. Se evaluó la cantidad de luz solar que atraviesa el fotobiorreactor (transmitancia) y el precio de cada uno, como se presenta en la Tabla 5.

²² CRUZ, Camila y PIMIENTA, Wendy. Evaluación de la incidencia del nitrógeno en el medio de cultivo bold basal para la producción de biomasa de la microalga *chlorella vulgaris* en un fotorreactor, para la obtención de ácidos grasos. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Universidad de América, 2012. 136 p.

Tabla 5. Elección del material

| Material | Transmitancia (%) | Costo (\$) |
|-----------|-------------------------|-----------------------|
| Vidrio | 84 ²³ | 38.000 ²⁴ |
| PVC | 79,8 a 85 ²⁵ | 175.141 ²⁶ |
| Plexiglás | 92 ¹⁷ | 500.000 ²⁷ |

Se seleccionó el PVC, debido a que a pesar de que el vidrio es el menos costoso, tiene la menor transmitancia y aunque el plexiglás tiene la mayor transmitancia es el más costoso; mientras que el PVC tiene un precio y nivel de transmitancia promedio.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA LUZ SOLAR

Slegers, *et al.*¹⁵, explican como el crecimiento y la productividad de las algas se relacionan con el patrón de luz dentro de un FBR de panel plano de temperatura controlada y operación continua. Adicionalmente, los autores los factores que afectan el patrón de luz, como la influencia de los ciclos de luz/oscuridad y la distribución lumínica espacial (causada por la obstrucción de la cúpula del cielo por los paneles).

3.4.1 Definición de la radiación solar sobre el lugar seleccionado (Ibagué). En la Figura 13 se presentan los valores de la radiación global promedio mensual de la ciudad de Ibagué, en donde se puede observar que Julio, Agosto y Septiembre son los meses con mayor radiación solar. La Tabla 6 muestra los valores de la irradiación global horizontal media de todos los meses para esta ciudad, con una irradiación promedio de 4.5 a 5.0 kWh/m².

Figura 13. Radiación global promedio de Ibagué

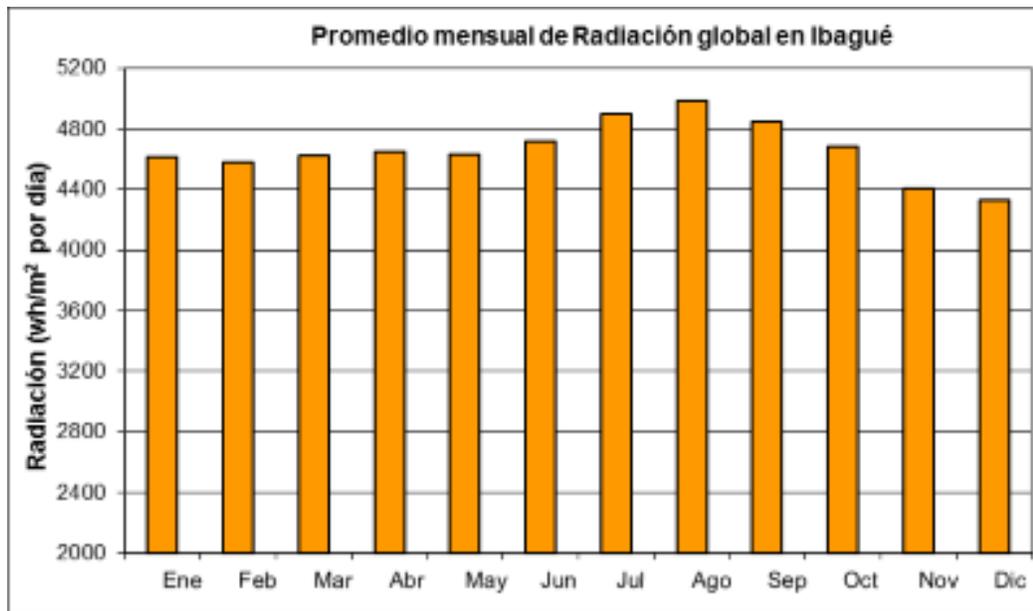
²³ CIBSE. "Environmental performance toolkit for glazed façade". Gran Bretaña.: CIBSE, 2004. p. 2 – 3. ISBN 978-1-903287-53-8.

²⁴ Vidrios y cristales GT. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <http://vidrioscristalesgt.com/>

²⁵ Prospector". Cloruro de polivinilo (PVC) Propiedades típicas Generic PVC, Flexible. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/46/c/t/cloruro-de-polivinilo-pvc-properties-processing/sp/6>

²⁶ Materials World. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <http://mwmaterialsworld.com/>

²⁷ Surtiacrylicos. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <http://surtiacrylicos.com/>



Fuente: FRANCO TORRES, Omar. MARTÍNEZ GÓMEZ, María Teresa. Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. [Consultado el Nov 16, 2016] Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

Tabla 6. Irradiación Global Horizontal media de Ibagué de todos los meses

| Mes | Irradiación Global Horizontal media diaria (kWh/m ²) |
|------------|--|
| Enero | 4.5 – 5.0 |
| Febrero | 5.0 – 5.5 |
| Marzo | 4.5 – 5.0 |
| Abril | 4.0 – 5.0 |
| Mayo | 4.5 – 5.0 |
| Junio | 4.5 – 5.0 |
| Julio | 5.0 – 5.5 |
| Agosto | 5.0 – 5.5 |
| Septiembre | 5.0 – 5.5 |
| Octubre | 4.5 – 5.0 |
| Noviembre | 4.5 – 5.0 |
| Diciembre | 4.0 – 4.5 |

Fuente: FRANCO TORRES, Omar. MARTÍNEZ GÓMEZ, María Teresa. Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.

3.4.2 Definición de la radiación solar sobre un FBR de pared plana de forma general. Para determinar la radiación solar incidente sobre un fotobiorreactor de pared plana, se debe tener en cuenta el ángulo con el que ingresa el haz de luz, tal como se muestra en la Figura 14. Dependiendo del ángulo, se obtendrá un nivel de radiación solar incidente sobre la superficie del FBR. La Tabla 7 contiene la descripción de estos ángulos.

Figura 14. Esquema para cualquier fotobiorreactor de pared plana con relación a la luz solar

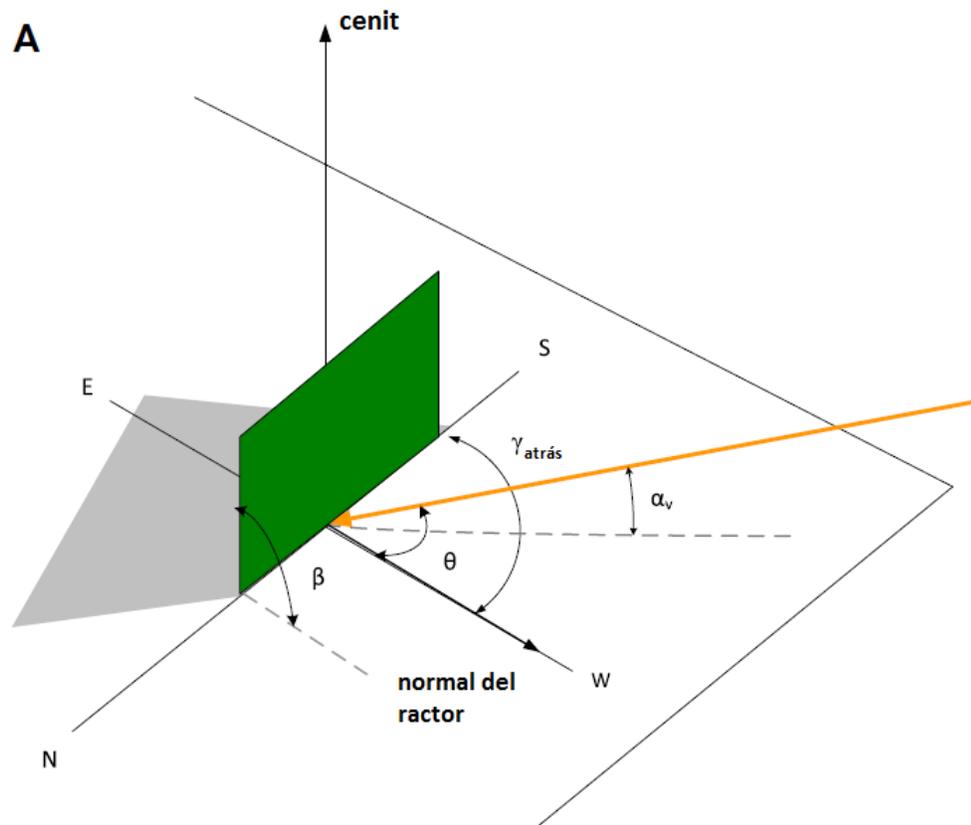
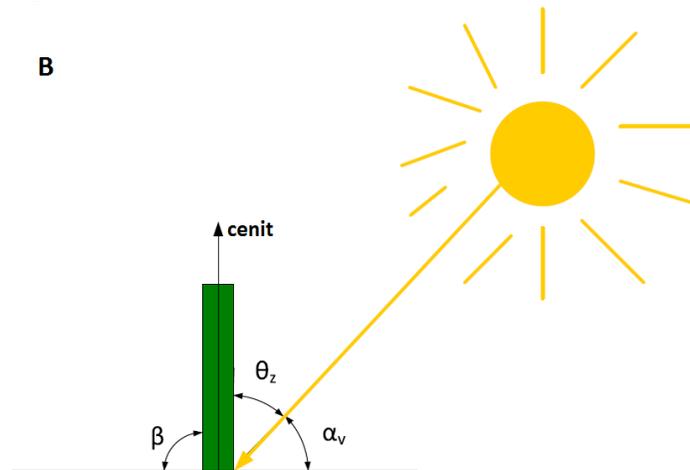


Figura 14. (Continuación)



Fuente: SLEGGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

Tabla 7. Descripción de los ángulos mostrados en el plano del FBR

| Nombre | Nomenclatura | Definición | Unidades |
|-----------------------------------|--------------|--|-----------------------|
| Ángulo de incidencia solar | θ | El ángulo entre los rayos del sol y la normal de la superficie del reactor | Grados ($^{\circ}$) |
| Pendiente del reactor | β | Ángulo que hace la superficie del reactor con la superficie de la tierra | Grados ($^{\circ}$) |
| Ángulo de azimut de la superficie | γ | Ángulo entre la normal de la superficie del reactor y la línea hacia el sur, con ángulos negativos para las superficies hacia el oriente y ángulos positivos para el occidente | Grados ($^{\circ}$) |
| Ángulo cenital | θ_z | El ángulo de incidencia sobre una superficie horizontal | Grados ($^{\circ}$) |
| Ángulo de elevación del sol | α_v | Ángulo entre la dirección del sol y la horizontal (el complemento del ángulo cenital) | Grados ($^{\circ}$) |

Fuente: SLEGGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353 y MOLINA GRIMA, E., *et al.* Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. En: JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY. vol. 70, no. 1, p. 231-247.

3.4.3 Definición de la radiación solar sobre el FBR de pared plana seleccionado. Como se mencionó anteriormente, la luz solar se propaga a partir de los fenómenos de reflexión, transmisión y absorción.

Cuando la luz incidente llega a un punto determinado del FBR esta empieza a denominarse haz. Cuando el haz pasa por el cultivo de microalgas una parte será absorbida, otra parte será reflejada y otra parte transmitida, tal como se representa en la Figura 15. Adicionalmente, es necesario tener bajo consideración, que una parte de la luz absorbida se extenderá hacia el cultivo, mientras que otra se quedará en las paredes del fotobiorreactor⁵ (Diagrama 7).

Figura 15. Propagación de la luz

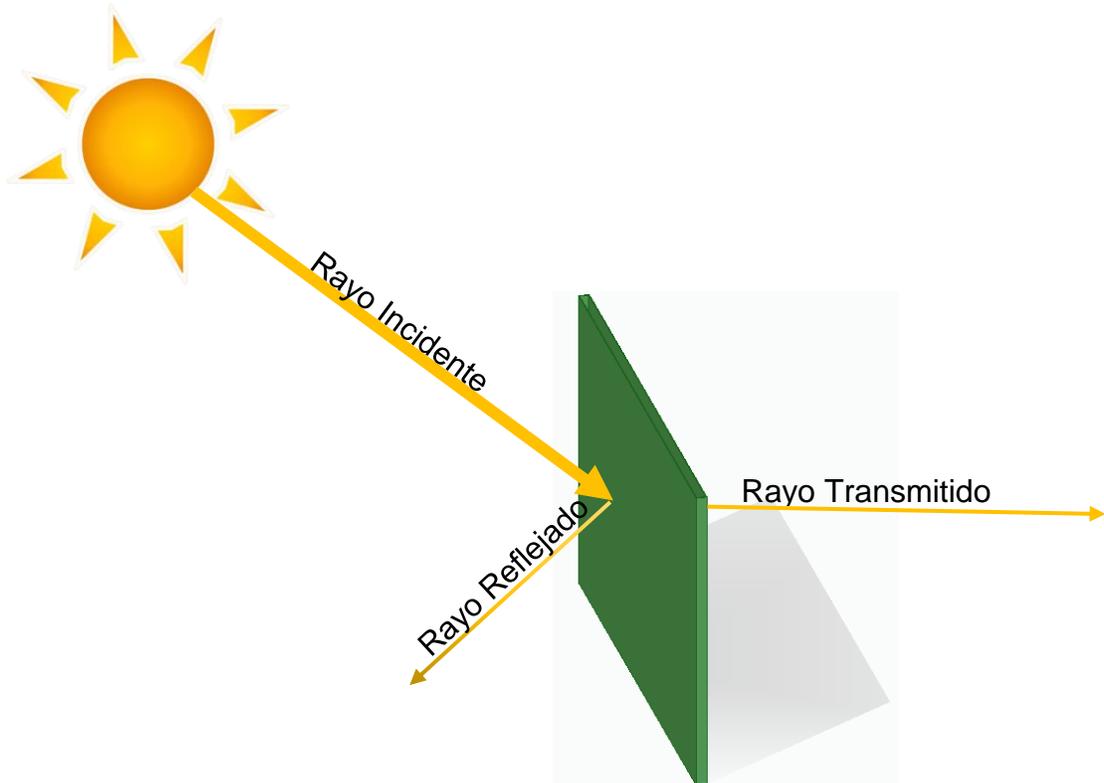
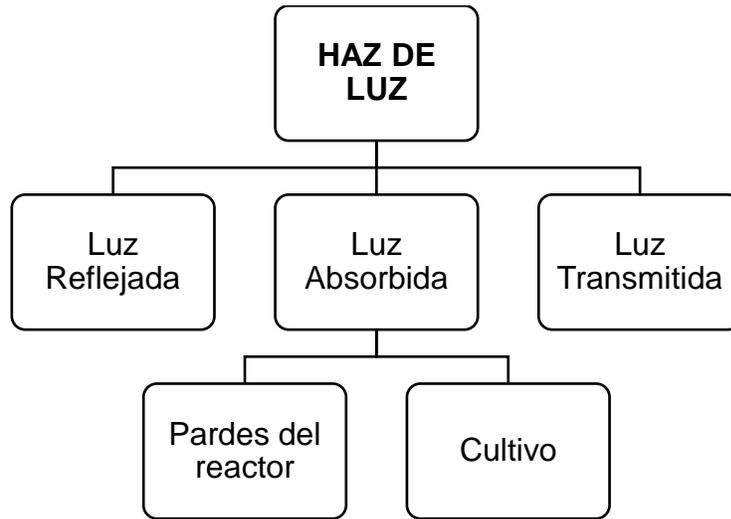


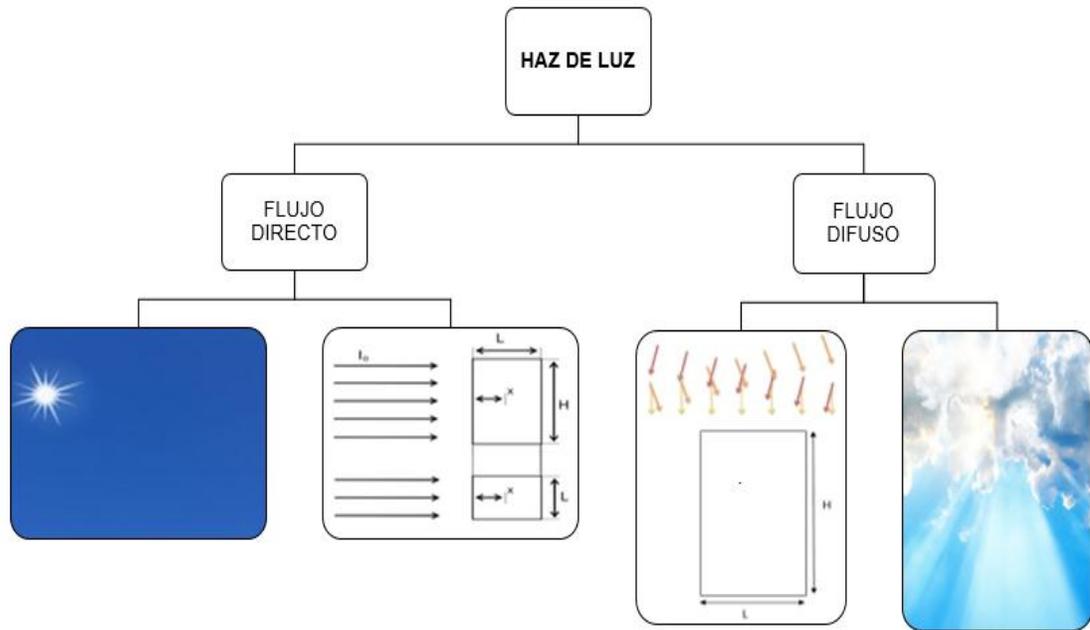
Diagrama 7. Propagación de la luz solar en el fotobiorreactor



Fuente: GRIMA MOLINA, Emilio. ACIÉN FERNÁNDEZ, Francisco Gabriel y FERNÁNDEZ SEVILLA, José María. Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas. [Consultado el Oct 16, 2016]. Disponible en: <http://www.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>.

De igual manera, para conocer como la luz solar interactúa sobre el FBR se debe mencionar y diferenciar los dos tipos principales de propagación de la luz. El primero, corresponde al flujo de luz directo, en el cual, el haz de luz no se ve afectado por ningún tipo de interrupción y llega a un determinado punto del FBR con una sola dirección. El segundo es conocido como el flujo de luz difuso, en el cual los haces de luz encuentran interrupciones en su camino, debido por ejemplo a la presencia de nubes. Una representación esquemática de estos fenómenos se presenta en el Diagrama 8.

Diagrama 8. Modelo de transmisión de la luz



Fuente: GRIMA MOLINA, Emilio. ACIÉN FERNÁNDEZ, Francisco Gabriel y FERNÁNDEZ SEVILLA, José María. Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas. [Consultado el Oct 16, 2016]. Disponible en: <http://www.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>.

Debido al tipo de biorreactor (al aire libre) y a la ubicación geográfica seleccionada para su ubicación, en donde las altas nubosidades no son usuales; se supondrá un flujo de luz directo.

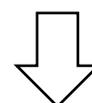
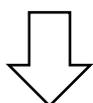
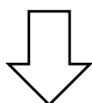
4. DESARROLLO DEL BALANCE DE ENERGÍA PARA EL SISTEMA

4.1 BALANCE DE ENERGÍA

Según Posten y Walter²⁸, para incrementar la productividad de un cultivo de microalgas, se debe tener en cuenta principalmente la temperatura y la disponibilidad de la luz dentro del fotobiorreactor. En este sentido, cuando se establece una estrategia de control de temperatura eficiente, la disponibilidad de la luz es el principal factor que gobierna y determina el crecimiento celular.

De acuerdo con la información presentada en el Diagrama 2, la ecuación 2 rige la disponibilidad de luz solar para que el cultivo de microalgas pueda llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. Producto de esto, se consumirán los sustratos, mientras que se incrementara la densidad de biomasa.

Luz Solar que Entra – Luz Solar que Sale = Luz Solar que se Acumula Ecuación 2



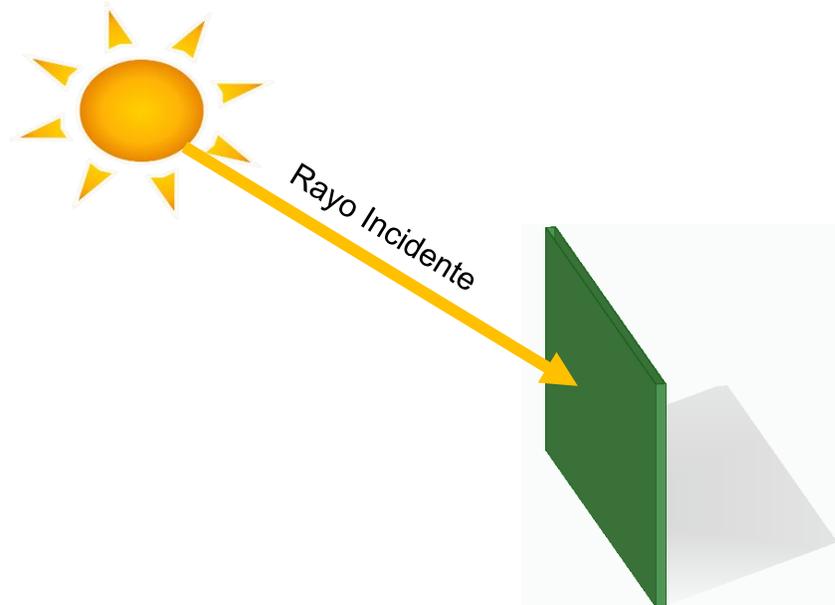
Irradiancia Incidente Irradiancia Transmitida Irradiancia Promedio

El balance de energía se realizó para todo el año 2016 de la ciudad de Ibagué. Sin embargo, es necesario aclarar que, para la demostración de los cálculos, solo se presentará la información correspondiente a un solo día.

4.1.1 Cálculo de la irradiancia incidente (luz que entra). La irradiancia incidente (I_0), como se muestra en la Figura 16, es la cantidad de luz solar disponible en la zona geográfica en la cual se situará el FBR. En este caso, se trata de la ciudad de Ibagué, Tolima.

²⁸ POSTEN, Clemens. WALTER, Chistian. Microalgal Biotechnology: Potential and Production. Berlín/Boston.: Guyter, 2012. 266 p. ISBN: 978-3-11-022501-3

Figura 16. Irradiancia Incidente



Los valores de la irradiación incidente fueron proporcionados por el IDEAM²⁹. La Tabla 8 contiene los datos para un día del 2016, seleccionado de manera aleatoria. Sin embargo, debido a la baja variabilidad de la irradiación, este dato puede considerarse como una buena representación del comportamiento esperado para cualquier día del año. La información se discrimina, a lo largo de las 12 horas de luz solar que recibirá el FBR (6 de la mañana hasta las 6 de la tarde).

²⁹ IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://ideam.gov.co>

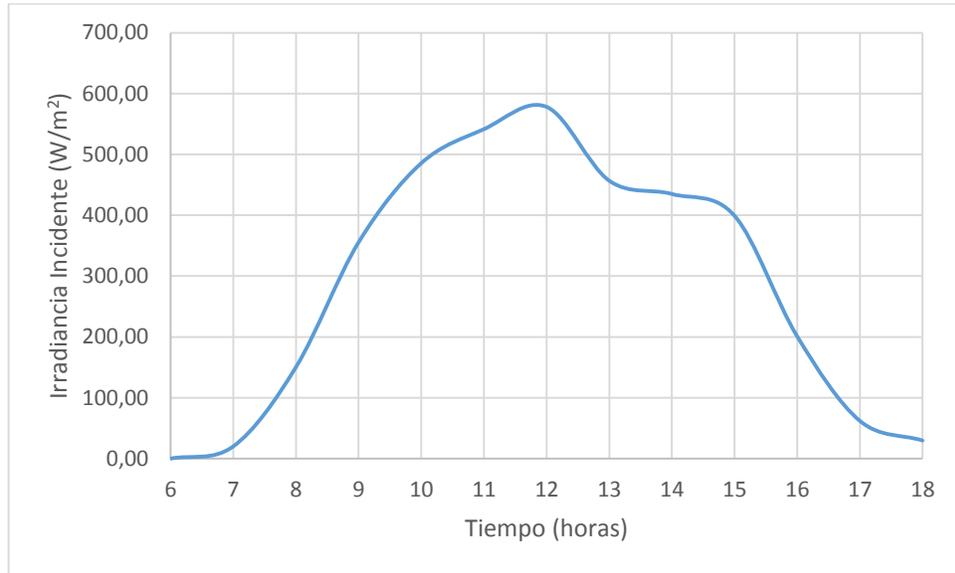
Tabla 8. Irradiancia Incidente de Ibagué para el día de muestra

| Hora | Irradiancia Incidente (I_0) (W/m^2) |
|-------|---|
| 6:00 | 0 |
| 7:00 | 27,530 |
| 8:00 | 205,875 |
| 9:00 | 487,157 |
| 10:00 | 665,502 |
| 11:00 | 742,107 |
| 12:00 | 792,378 |
| 13:00 | 626,003 |
| 14:00 | 596,079 |
| 15:00 | 547,004 |
| 16:00 | 275,298 |
| 17:00 | 84,983 |
| 18:00 | 40,696 |

Fuente: IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://ideam.gov.co>

En la Gráfica 2, se puede observar que la mayor irradiancia para el día muestra, se presenta a las 12 del mediodía, con 792,378 W/m^2 . Cabe resaltar, que, tras analizar la totalidad de los datos del año, la máxima irradiancia se presenta entre las 12 m y la 1 pm.

Gráfica 2. Irradiancia incidente para el día de muestra



4.1.2 Cálculo de la Irradiancia Transmitida. Para calcular la luz solar que atraviesa el FBR, es decir la irradiancia transmitida (I) (Figura 17), se deben tener en cuenta las diferentes interfaces que la luz encuentra al atravesar el FBR (Figura 18 y 19). La primera es la que se refiere al aire y la pared del reactor y la segunda es la relacionada con la pared del reactor y la suspensión de microalgas.

Figura 17. Irradiancia Transmitida

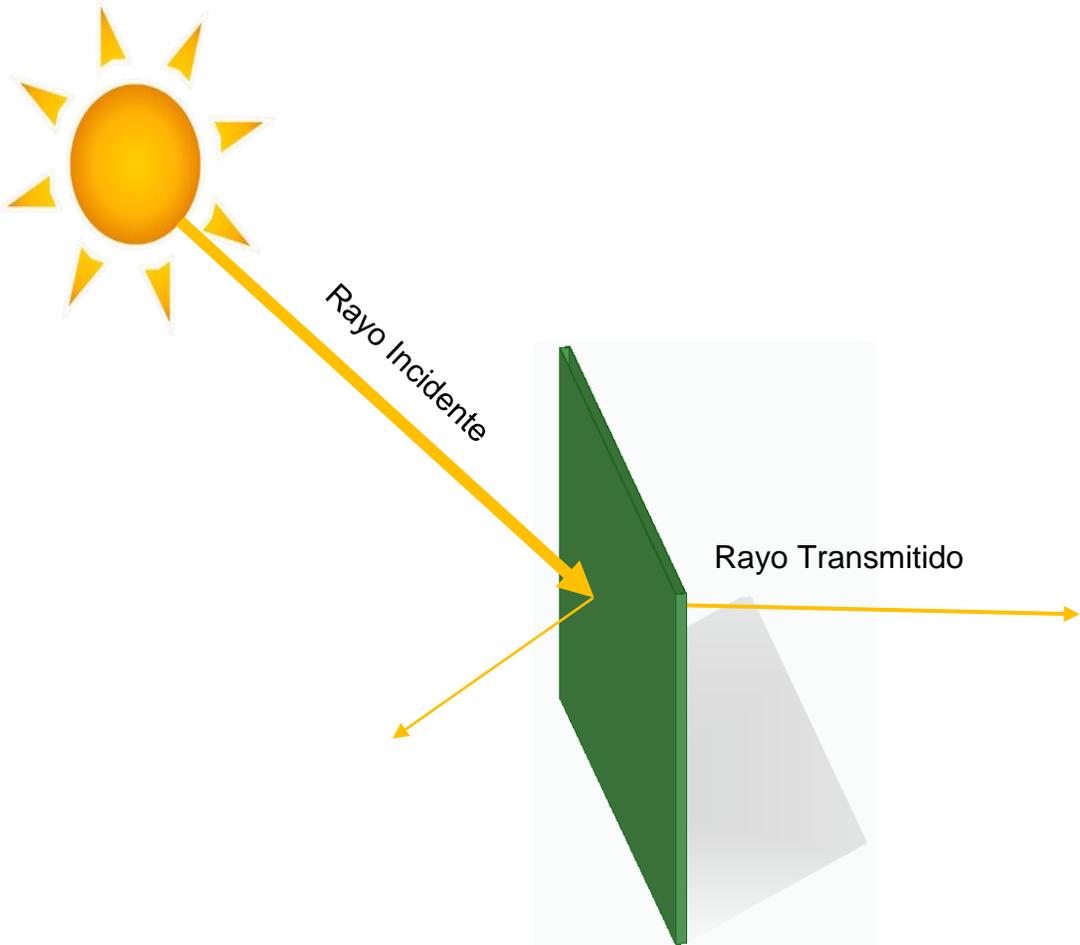


Figura 18. Interfase 1 - aire y pared exterior del FBR

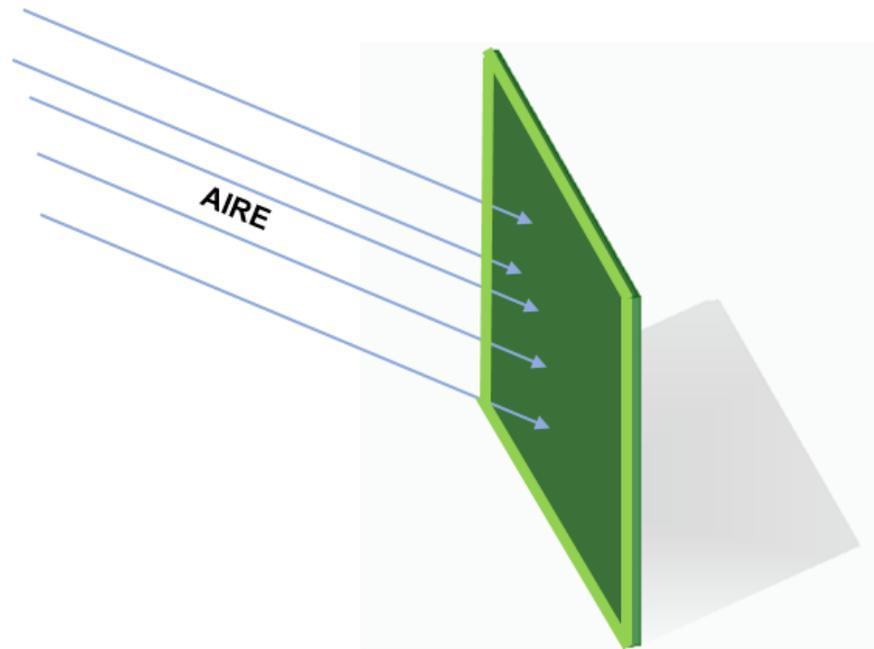
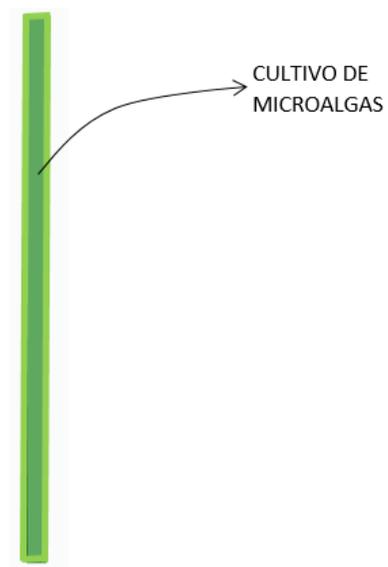


Figura 19. Interfase 2 - pared interna del FBR y el cultivo de microalgas



4.1.2.1 Ecuaciones para la irradiancia transmitida. Las ecuaciones 3 y 4 describen el comportamiento de las dos interfases, propuestas por Slegers, *et al.*¹⁵. Estas tienen su origen en las ecuaciones de Fresnel, que describen la reflexión y trasmisión de las ondas electromagnéticas de la luz en una superficie, en este caso sobre el FBR.

$$R_s = \left[\frac{n_i \cos(\theta_i) - n_t \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \operatorname{seno}(\theta_i)\right)^2}}{n_i \cos(\theta_i) + n_t \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \operatorname{seno}(\theta_i)\right)^2}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$R_p = \left[\frac{n_i \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \operatorname{seno}(\theta_i)\right)^2} - n_t \cos(\theta_i)}{n_i \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \operatorname{seno}(\theta_i)\right)^2} + n_t \cos(\theta_i)} \right]^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

- R_s y R_p son la reflexión de la luz polarizada
- n_i es el índice de reflexión de la primera interface entre el aire y la pared del FBR
- n_t es el índice de reflexión de la segunda interface entre la pared del reactor y el cultivo
- θ_i es el ángulo de incidencia de la luz solar

Como se explicó en el apartado 1.2.1.2 y se presentó en la Figura 8, cuando la luz solar toca un objeto transparente, una parte de esta luz se va a reflejar y quedará parcialmente polarizada. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la luz solar normal no presenta este fenómeno y es por esto que se debe hacer uso de una corrección de los coeficientes R_s y R_p . Con este fin, se define un coeficiente de reflexión R' , propuesto por Slegers, *et al.*¹⁵, de acuerdo con la ecuación 5.

$$R' = \frac{R_p + R_s}{2} \quad \text{Ecuación 5}$$

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos del uso de las ecuaciones 3, 4 y 5.

Tabla 9. Coeficientes de reflexión para las interfases

| Interfase 1: Aire y Pared de Reactor | |
|---|---------------|
| ni = n _{aire} | 1,0008 |
| nt = n _{pared (PVC)} | 1,490 |
| θ _i (°) | 60 |
| R _s | 0,1727 |
| R _p | 0,9093 |
| R'1 | 0,5410 |
| Interfase 2: Pared de Reactor y microalgas | |
| ni = n _{pared (PVC)} | 1,490 |
| nt = n _{disolución del alga (agua)} | 1,33 |
| θ _i (°) | 60 |
| R _s | 0,1569 |
| R _p | 0,8425 |
| R'2 | 0,4997 |

Fuente: SLEGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353 y BURBANO DE ERCILLA, Santiago. BURBANO GARCÍA, Enrique y GARCÍA MUÑOZ, Carlos. Física General. 32 ed. Madrid.: Tébar, 2003. 800 p.

Finalmente, para calcular la irradiancia total transmitida al cultivo, I (W/m²), se hace uso de la ecuación 6, propuesta también por Slegers, *et al.*¹⁵.

$$I = I_0 * (1 - R'_1 * R'_2) * T_m \quad \text{Ecuación 6}$$

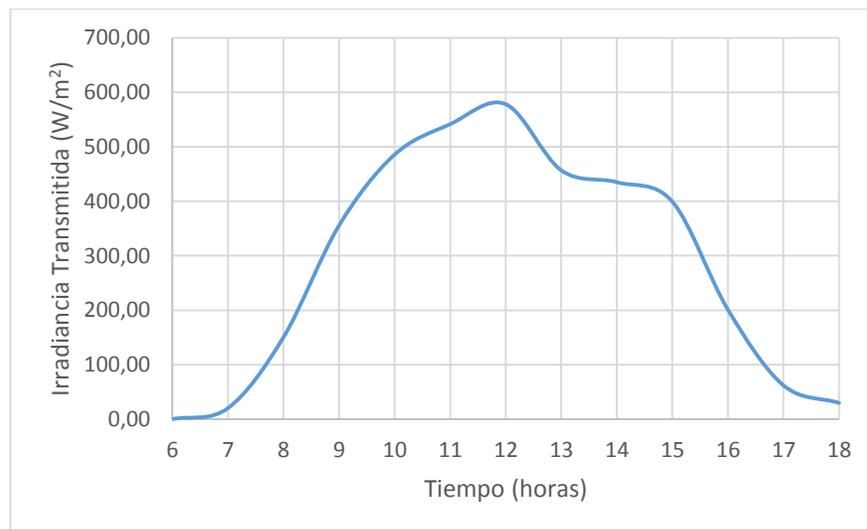
Donde, I₀, es la irradiancia incidente (W/m²), R'1 y R'2 son los coeficientes de reflexión para las dos interfases, T_m es la luz adicional que se puede perder debido a la baja transparencia del material. Para este caso en particular, este valor se fijará en 1 debido a la naturaleza del material de construcción seleccionado¹⁵.

Tabla 10. Irradiancia Transmitida para el día de muestra

| Hora | Irradiancia Incidente (I_0) (W/m^2) | Irradiancia Transmitida (I) (W/m^2) |
|-------|---|---|
| 6:00 | 0,00 | 0,00 |
| 7:00 | 27,53 | 20,09 |
| 8:00 | 205,87 | 150,22 |
| 9:00 | 487,16 | 355,47 |
| 10:00 | 665,50 | 485,60 |
| 11:00 | 742,11 | 541,50 |
| 12:00 | 792,38 | 578,18 |
| 13:00 | 626,00 | 456,78 |
| 14:00 | 596,08 | 434,95 |
| 15:00 | 547,00 | 399,14 |
| 16:00 | 275,30 | 200,88 |
| 17:00 | 84,98 | 62,01 |
| 18:00 | 40,70 | 29,70 |

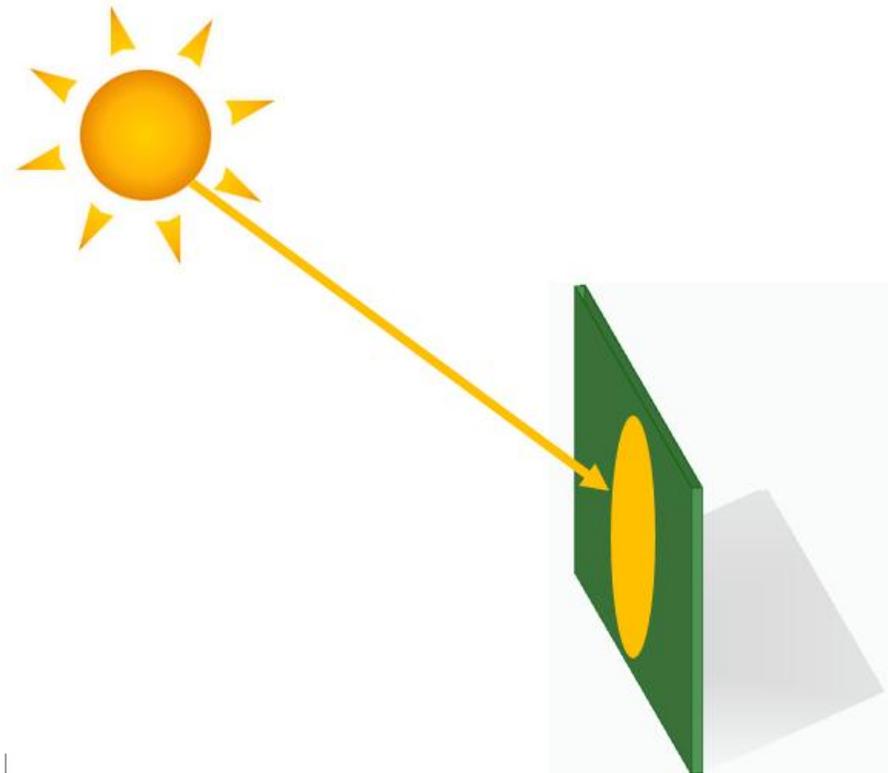
En la Gráfica 3 se muestra que al mediodía del día muestra, es cuando mayor cantidad de luz solar logra atravesar el FBR, con un valor de $578,18 W/m^2$, debido a que en esta hora es cuando mayor irradiancia incidente se tiene. Este patrón se repite para el resto de los días del año.

Gráfica 3. Irradiancia transmitida para el día de muestra



4.1.3 Cálculo de la Irradiancia Promedio. La irradiancia promedio, según Molina, Acién Fernández y Fernández Sevilla⁵, puede definirse como la cantidad de iluminación que incide realmente sobre el cultivo de microalgas, como se ilustra en la figura 20.

Figura 20. Irradiancia Promedio (acumulada)



Para calcular esta irradiancia, se debe tener en cuenta el tipo de geometría del FBR y el tipo de flujo de la luz solar, teniendo en consideración la ubicación; es decir si se trata de un fenómeno directo o difuso. La Tabla 11 muestra la variación de la irradiancia de acuerdo con la geometría y el flujo.

Tabla 11. Ecuaciones para calcular la irradiancia promedio según la geometría del FBR

| GEOMETRÍA PLANA⁵ | | |
|---|---|------------|
| Flujo de luz Directo | $I_{av} = \frac{I_o}{ka * Cb * L} * (1 - e^{-ka*Cb*L})$ | Ecuación 7 |
| Flujo de luz Difuso | $I_{av} = \frac{I_o * \cos(\alpha)}{ka * Cb * L} * (1 - e^{-ka*Cb*\frac{L}{\cos(\alpha)}})$ | Ecuación 8 |
| GEOMETRÍA CILÍNDRICA⁵ | | |
| Flujo de luz Directo y Difuso | $I_{av} = \frac{1}{R^2} * \int_0^R I(r) * 2r * dr$ | Ecuación 9 |

4.1.3.1 Ecuaciones para la irradiancia promedio. En el tercer capítulo se definió que el tipo de geometría que tendría el fotobiorreactor sería plana y que el tipo de flujo se asumiría como directo. Partiendo de estas definiciones, se empleó la ecuación 7 para calcular la irradiancia promedio.

$$I_{av} = \frac{I_o}{ka*Cb*L} * (1 - e^{-ka*Cb*L})$$

En donde

- I_o : irradiancia incidente (W/m^2)
- ka : coeficiente de absorción de las microalgas (m^2/g)
- Cb : concentración inicial de la biomasa (g/m^3)
- L : distancia de penetración de la luz o ancho del FBR (m)

La concentración inicial de la biomasa (Cb), también conocida como inóculo, fue tomada del artículo de Barajas, *et al*³⁰, quienes recomiendan un valor de $18 g/m^3$. Esta selección se hizo en función de la especie de alga empleada (*Chlorella Vulgaris*). La distancia de penetración de la luz o ancho del FBR (L) es de 0,03 m, como se mencionó en el apartado 3.3.

³⁰ Barajas, *et al*. BIOPROSPECCIÓN DE MICROALGAS COLOMBIANAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL. [1]:

El coeficiente de absorción de las microalgas (k_a), se calcula mediante la ecuación de Lambert – Beer, como se muestra en la ecuación 10, el cual es constante para todos los días.

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = k_a * C_b * L \rightarrow k_a = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{C_b * L} \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde

- I_0 : irradiancia incidente (W/m^2)
- I : irradiancia transmitida (W/m^2)
- C_b : concentración inicial de la biomasa (g/ m^3)
- L : distancia de penetración de la luz o ancho del FBR (m)

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos de la irradiancia promedio para el día de muestra, teniendo en cuenta el coeficiente de absorción, el cual es el mismo para todos los días.

Tabla 12. Irradiancia promedio del día de muestra

| Hora | Irradiancia Incidente (I_0) (W/m^2) | Irradiancia Transmitida (I) (W/m^2) | Coefficiente de absorción (k_a) (m^2/g) | Irradiancia Promedio (I_{av}) (W/m^2) |
|-------|---|---|---|---|
| 6:00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 7:00 | 27,53 | 20,09 | 0,58 | 23,61 |
| 8:00 | 205,87 | 150,22 | 0,58 | 176,59 |
| 9:00 | 487,16 | 355,47 | 0,58 | 417,86 |
| 10:00 | 665,50 | 485,60 | 0,58 | 570,83 |
| 11:00 | 742,11 | 541,50 | 0,58 | 636,54 |
| 12:00 | 792,38 | 578,18 | 0,58 | 679,66 |
| 13:00 | 626,00 | 456,78 | 0,58 | 536,95 |
| 14:00 | 596,08 | 434,95 | 0,58 | 511,29 |
| 15:00 | 547,00 | 399,14 | 0,58 | 469,19 |
| 16:00 | 275,30 | 200,88 | 0,58 | 236,14 |
| 17:00 | 84,98 | 62,01 | 0,58 | 72,89 |
| 18:00 | 40,70 | 29,70 | 0,58 | 34,91 |

Como se puede observar en la Tabla 12, la cantidad de luz solar que recibirá el cultivo de microalgas será el 86% de la radiación solar externa (relación entre la

irradiancia promedio y la irradiancia incidente). Esta circunstancia se repite para todos los meses del año 2016. En términos de la productividad del cultivo, este valor resulta beneficioso, dado que como se ha mencionado anteriormente, la luz es el principal motor de crecimiento celular. De otro lado, la radiación que no es aprovechada por las microalgas, corresponde solo al 14%, y puede deberse a la reflectividad del suelo, del material del FBR y del mismo cultivo.

De igual manera, se debe saber que la luz es un factor limitante por el reto que implica lograr una buena penetración dentro de todo el cultivo, evitando la generación de zonas oscuras. Es por esto, que para el cálculo de la irradiancia promedio se tuvo en consideración la existencia de zonas oscuras e iluminadas; debido a que a pesar que la alta cantidad de luz solar que incidirá al cultivo de microalgas, esto no implica la desaparición total de las zonas oscuras. Para disminuir este efecto, es necesario incluir el diseño de un sistema de mezclado de alta eficiencia.

A partir de esta irradiancia promedio, se puede conocer cuanta biomasa es posible obtener, lo cual será tratado en el siguiente capítulo.

5. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD TEÓRICA DEL SISTEMA

5.1 DETERMINACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD

Según Slegers, *et al.*¹⁵, y como se presentó en el Diagrama 3, la productividad de un cultivo de microalgas dependerá directamente de la ubicación geográfica seleccionada, del diseño elegido para el FBR, la especie de microalga empleada y la cantidad de luz incidente sobre el cultivo.

5.1.1 Cálculo de la tasa de crecimiento. La tasa velocidad específica de crecimiento (μ) para un cultivo de microalgas, es gobernada por la cantidad de luz incidente, por ende depende de la irradiancia promedio³¹. Esta relación ha sido descrita por varios autores como Steele³², Bannister³³ y Aiba³⁴; los cuales se fundamentan en la ecuación de Monod.

Normalmente, existe una relación directa entre la irradiancia promedio y la velocidad específica de crecimiento, hasta que se alcanza una tasa de crecimiento máxima ($\mu_{m\acute{a}x}$). Para valores extremadamente altos de irradiancia, se puede incurrir en fotoinhibición del crecimiento de las microalgas, debido a una reducción en la actividad fotosintética³⁵.

Teniendo en cuenta esto, se utilizó la ecuación 11, propuesta por Sasi, *et al.*³⁶ para calcular la velocidad específica de crecimiento, teniendo en cuenta el efecto de la fotoinhibición.

$$\mu = \frac{\mu_{m\acute{a}x} * I_{av}}{K_i + I_{av}} \quad \text{Ecuación 11}$$

En donde,

$\mu_{m\acute{a}x}$: tasa de crecimiento específico máximo (h^{-1})

I_{av} : irradiancia promedio (W/m^2)

K_i : constante de inhibición (W/m^2)

³¹ MOLINA GRIMA, E., *et al.* Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. En: JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY. vol. 70, no. 1, p. 231-247

³² STEELE, J.I.I. Microbial Kinetics and Dynamics in Chemical Reactor Theory. Englewood Cliffs, Estados Unidos.: Prentice-Hall, 1977. 405 – 483 p.

³³ BANNISTER, T. T. Quantitative description of steady state, nutrient-saturated algal growth, including adaptation. En: LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY. Jan.vol. 24, no. 1, p. 76-96

³⁴ AIBA, Shuichi. A New Growth Kinetics Model for Photosynthetic Microorganisms. Institution of Engineers, Australia, 1993. p. 397-402

³⁵ POSADA, Fanor. Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. Una revisión. [0]:2007

³⁶ SASI, Divya, *et al.* Growth kinetics and lipid production using *Chlorella vulgaris* in a circulating loop photobioreactor. En: JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 86, no. 6, p. 875-880.

La irradiancia promedio fue calculada en el apartado 4.1.3, mientras que los valores de $\mu_{m\acute{a}x}$ y K_i fueron tomados de Sasi, *et al.*³⁶, para la especie *Chlorella Vulgaris*; tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de las constantes para la especie *Chlorella Vulgaris*

| Especie | $\mu_{m\acute{a}x}$ (h⁻¹) | Ki (W/m²) |
|---------------------------|--|-----------------------------|
| <i>Chlorella Vulgaris</i> | 0,049 | 2,8 |

Fuente: SASI, Divya, et al. Growth kinetics and lipid production using *Chlorella vulgaris* in a circulating loop photobioreactor. En: JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 86, no. 6, p. 875-880.

La Tabla 14 y la Gráfica 4 presentan los resultados de la velocidad específica de crecimiento para las doce horas de luz solar del día muestra, en donde se puede apreciar que al aumentar la irradiancia promedio, también lo hace μ . Sin embargo, esta se convierte en una constante a partir de un punto específico.

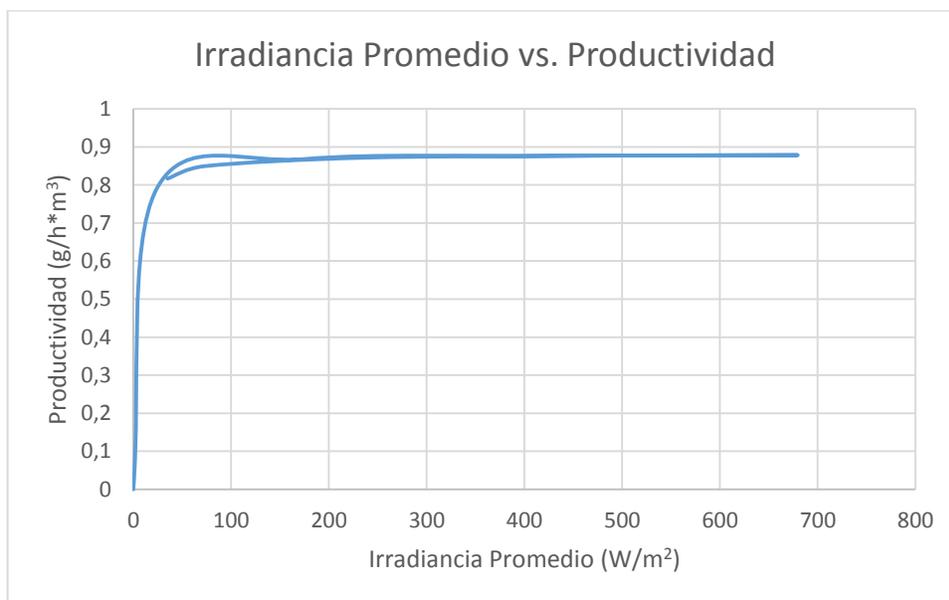
5.1.2 Cálculo de la productividad del sistema. Como se mostró en el Diagrama 3, los principales factores que controlan la productividad de un cultivo de microalgas, son la disponibilidad y la intensidad de la luz. Para Molina Grima, *et al.*³¹ la productividad de la biomasa (ρ) es función de la concentración de la biomasa (C_b) y de la velocidad específica de crecimiento (μ). Dicho esto, es posible obtener la ecuación 12.

$$\rho = \mu * C_b \quad \text{Ecuación 12}$$

Tabla 14. Tasa de crecimiento específico y productividad del día de muestra

| Hora | Irradiancia Promedio (I_{av}) (W/m^2) | Tasa de crecimiento específico (μ) (h^{-1}) | Productividad (ρ) ($g/h \cdot m^3$) |
|-------|---|---|--|
| 6:00 | 0,00 | 0,000 | 0,00 |
| 7:00 | 23,61 | 0,044 | 0,79 |
| 8:00 | 176,59 | 0,048 | 0,87 |
| 9:00 | 417,86 | 0,049 | 0,88 |
| 10:00 | 570,83 | 0,049 | 0,88 |
| 11:00 | 636,54 | 0,049 | 0,88 |
| 12:00 | 679,66 | 0,049 | 0,88 |
| 13:00 | 536,95 | 0,049 | 0,88 |
| 14:00 | 511,29 | 0,049 | 0,88 |
| 15:00 | 469,19 | 0,049 | 0,88 |
| 16:00 | 236,14 | 0,048 | 0,87 |
| 17:00 | 72,89 | 0,047 | 0,85 |
| 18:00 | 34,91 | 0,045 | 0,82 |

Gráfica 4. Relación de la productividad con respecto a la irradiancia promedio del día de muestra



Según la teoría, lo que se espera, es que al aumentar la irradiancia incidente y la velocidad específica de crecimiento, la productividad de la biomasa debería incrementarse también. En concordancia, la Tabla 14 y la Gráfica 4, muestran que la máxima productividad, en este caso para el día muestra, es de $0,88 \text{ g/h}\cdot\text{m}^3$, la cual se alcanzó con la máxima velocidad específica de crecimiento ($0,049 \text{ h}^{-1}$) y con la máxima cantidad de irradiancia incidente de $792,38 \text{ W/m}^2$.

En la Tabla 15 se presentan las productividades más altas obtenidas para todos los meses del año 2016.

Tabla 15. Productividades más altas de todos los meses del 2016

| Mes | Día | Hora | Irradiancia Incidente (I_0) (W/m^2) | Irradiancia Transmitida (I) (W/m^2) | Irradiancia Promedio (I_{av}) (W/m^2) | Productividad (ρ) ($\text{g/h}\cdot\text{m}^3$) |
|------------|-----|-------|--|--|--|--|
| ENERO | 3 | 13:00 | 1044,93 | 762,46 | 896,29 | 0,88 |
| FEBRERO | 18 | 12:00 | 1025,78 | 748,49 | 879,87 | 0,88 |
| MARZO | 24 | 13:00 | 1049,72 | 765,96 | 900,40 | 0,88 |
| ABRIL | 19 | 12:00 | 1030,57 | 751,98 | 883,97 | 0,88 |
| | 21 | 12:00 | 1030,57 | 751,98 | 883,97 | 0,88 |
| | 21 | 13:00 | 1030,57 | 751,98 | 883,97 | 0,88 |
| MAYO | 25 | 13:00 | 1046,13 | 763,34 | 897,32 | 0,88 |
| JUNIO | 5 | 11:00 | 983,89 | 717,92 | 843,93 | 0,88 |
| JULIO | 31 | 13:00 | 1036,56 | 756,35 | 889,11 | 0,88 |
| AGOSTO | 6 | 13:00 | 1036,56 | 756,35 | 889,11 | 0,88 |
| SEPTIEMBRE | 13 | 12:00 | 1041,34 | 759,84 | 893,21 | 0,88 |
| | 20 | 13:00 | 1041,34 | 759,84 | 893,21 | 0,88 |
| OCTUBRE | 21 | 13:00 | 1047,33 | 764,21 | 898,35 | 0,88 |
| NOVIEMBRE | 6 | 11:00 | 1032,96 | 753,73 | 886,03 | 0,88 |
| DICIEMBRE | 9 | 14:00 | 1049,72 | 765,96 | 900,40 | 0,88 |

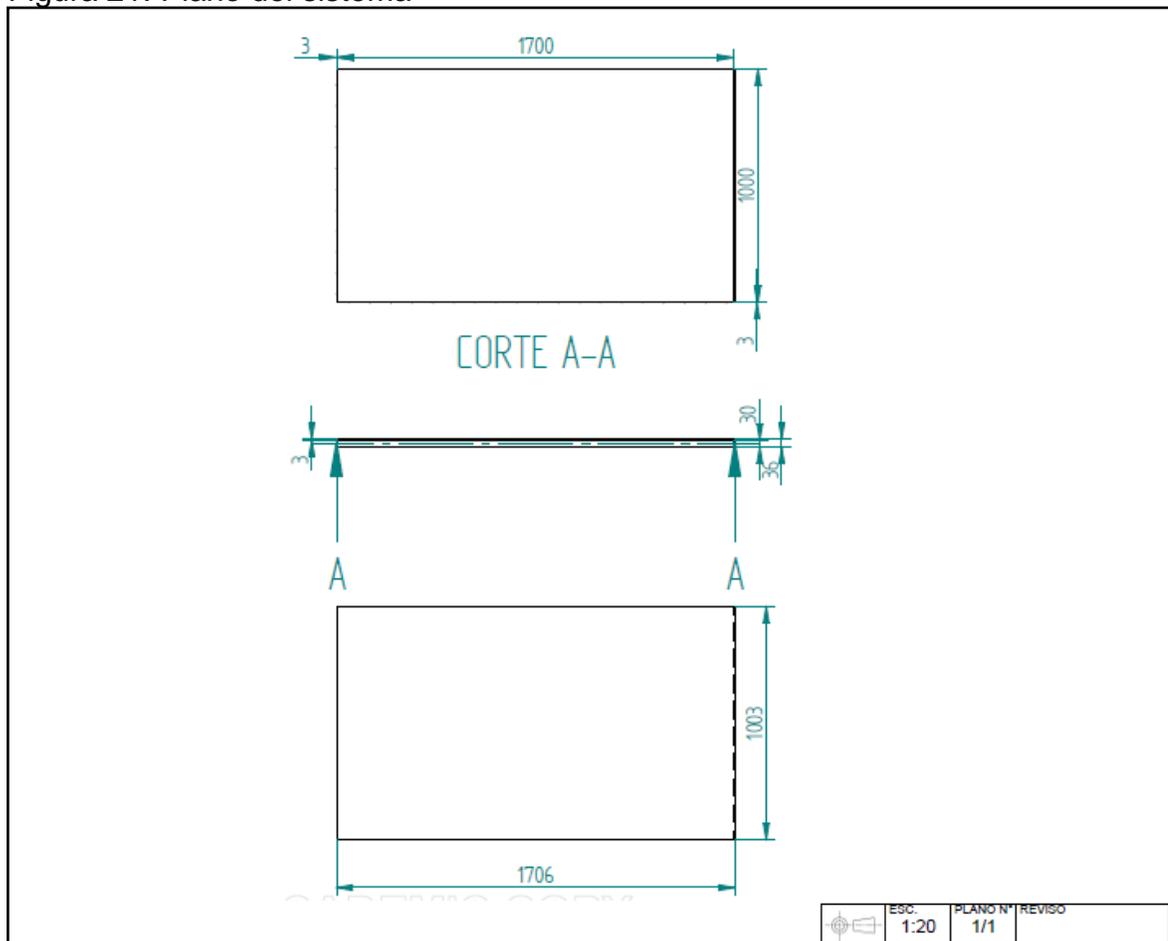
La productividad más alta obtenida en el año 2016 es de $0,88 \text{ g/h}\cdot\text{m}^3$, la cual se obtiene con la mayor cantidad de luz incidente y por ende la mayor irradiancia promedio que se obtuvo en cada día; es decir, que en una hora en un metro cúbico se alcanzan 0,88 gramos de biomasa.

6. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA

6.1 PLANO DEL SISTEMA

Para realizar la representación del sistema se tuvo en cuenta el Diagrama 4, en donde se hizo uso del programa Solid Edge y se tuvieron en cuenta las dimensiones establecidas en el apartado 3.3 (largo de 1,7 m, ancho de 0,03 m y alto 1 m). Para la representación física, se hizo uso del sistema isoamericano, es decir que representa la vista de corte (en la cual se observa el espesor), superior y frontal del FBR. Las unidades del plano están dadas en milímetros y la escala es de 1:20; lo que significa que el tamaño en el plano es veinte veces más pequeño que el tamaño real.

Figura 21. Plano del sistema



Las vistas superior y lateral del FBR se presentan en las Figuras 22 y 23, en donde se muestran los ángulos a partir de la incidencia solar, los cuales fueron detallados en la Tabla 7.

Figura 22. Vista Superior

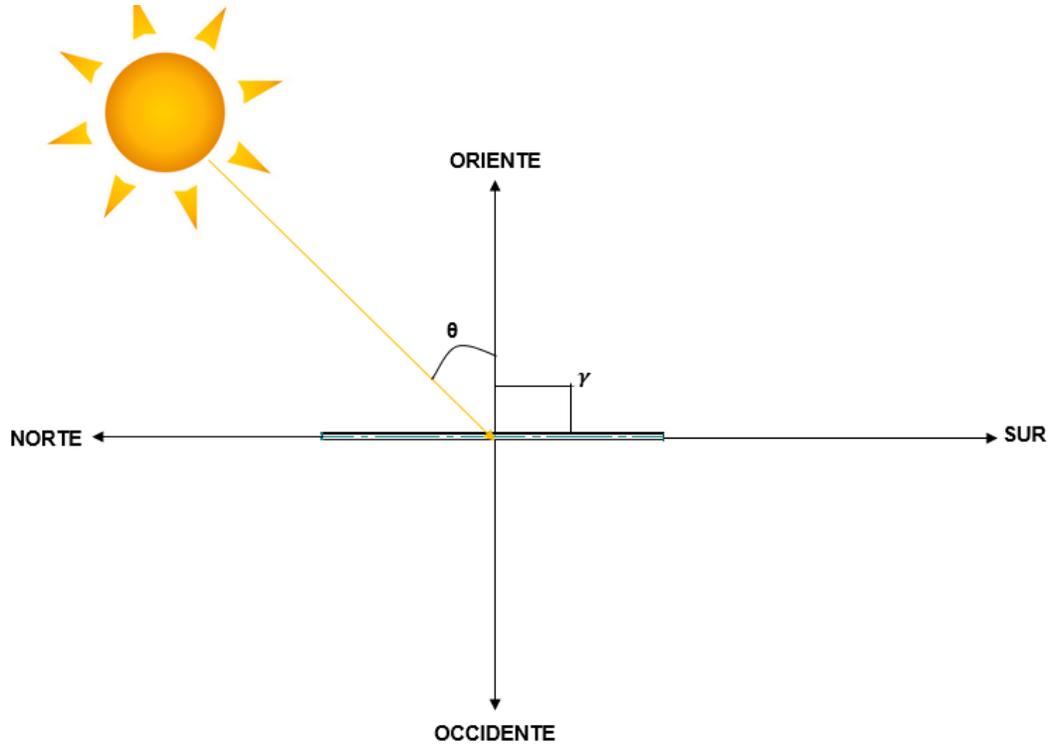
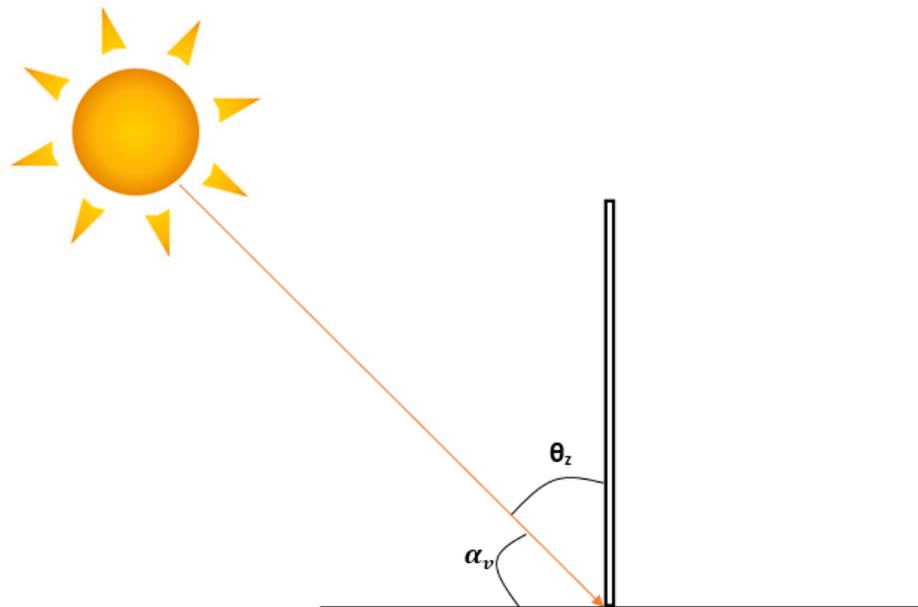


Figura 23. Vista lateral



7. DISCUSIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, existen diversos tipos de fotobiorreactores que varían tanto en configuración como en la fuente de luz empleada. De acuerdo con los requerimientos de cada proyecto o región en particular, las ventajas y desventajas de unos y otros determinarán cualquier decisión.

De acuerdo con el análisis de las bondades y desventajas de cada tipo de FBR estudiado y las condiciones particulares de la zona seleccionada para su construcción, se eligió el diseño de pared plana. Como criterios de decisión, se emplearon los parámetros que describen tanto la salud como la productividad del cultivo (productividad volumétrica de biomasa, eficiencia fotosintética, productividad por área, superficie irradiada, concentración y rendimiento de biomasa y la velocidad específica de crecimiento).

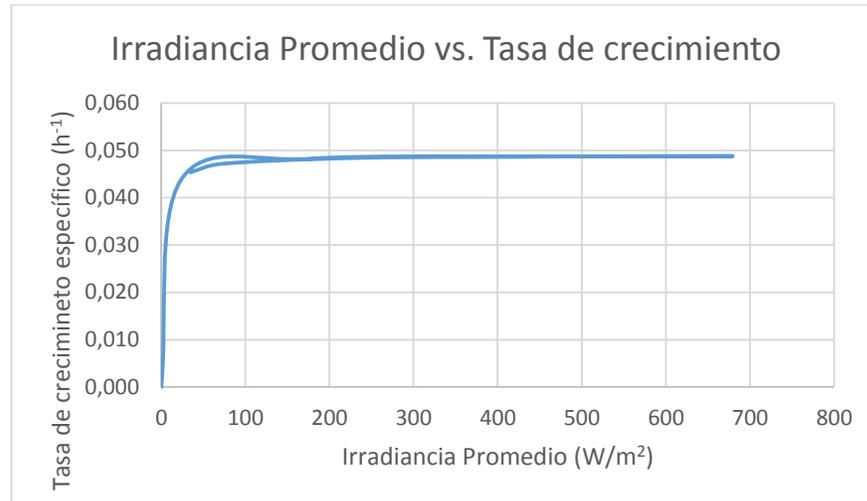
Los fotobiorreactores de pared plana se caracterizan por su facilidad de escalado, a través de un aumento de la longitud; lo que no implica mayores modificaciones adicionales al diseño original. Adicionalmente, se pueden construir con materiales sencillos y económicos y pueden ser inclinados maximizar la captación de luz. En este sentido, como ya ha sido ampliamente discutido, la intensidad de la luz incidente es un parámetro crítico a la hora de calcular la productividad del proceso. Sin embargo, durante la etapa de escalado, se debe incluir una restricción de diseño asociada con la longitud máxima permisible, debido a la dificultad que presentan este tipo de FBR para soportar la presión hidrostática.

Con el ánimo de aprovechar las ofertas de luz solar del territorio colombiano, se seleccionó la ciudad de Ibagué en el departamento del Tolima, con una radiación solar de entre 4.5 y 5.0 kWh/m²³⁷.

Como se mencionó en el apartado 5.1.1 y 5.1.2 y según las gráficas 4 y 5 construidas a partir de los datos del día de muestra, existe una relación directa entre la intensidad de la radiación incidente y la velocidad específica de crecimiento de las microalgas. De nuevo, se ratifica la criticidad del parámetro de la intensidad de la luz sobre el comportamiento del cultivo.

³⁷ FRANCO TORRES, Omar. MARTÍNEZ GÓMEZ, María Teresa. Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. [Consultado el Nov 16, 2016] Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

Gráfica 5. Tasa de crecimiento de las microalgas para el día de muestra



De acuerdo con los datos de intensidad lumínica recolectados para la ciudad de Ibagué durante el año 2016, se obtuvo una productividad de biomasa teórica máxima de $0,88 \text{ g/h}\cdot\text{m}^3$. Comparado con valores reportados previamente por Slegers, *et al.*¹⁵, es 5% menor. En el trabajo en mención, se evaluó el potencial del cultivo de microalgas para la producción de biocombustibles y otros productos. El análisis se extendió por varios lugares alrededor del mundo, bajo diferentes condiciones de iluminación y una variedad de configuraciones de bioreactores. La Tabla 16 presenta un resumen de las condiciones usadas para la ejecución de dicho estudio.

Tabla 16. Resumen de variables de decisión involucradas en el crecimiento de algas

| Variable de Decisión | Valor |
|---------------------------|--|
| Locación | 51.97°N, 4.93°E (Países Bajos) 44.08°N, 5.06°E (Francia) 22.78°N, 5.51°E (Argelia) |
| Especie de alga | <i>Phaeodactylum tricornutum</i> <i>Thalassiosira pseudonana</i> |
| Tipo de reactor | Fotobiorreactor de pared plana |
| Configuración del reactor | Paredes verticales, con una orientación norte - sur |
| Camino de luz | 0,005 – 0,10 m |
| Área total iluminada | 2 m ² |
| Concentración de biomasa | 1000-5000 g/ m ³ (<i>T. pseudonana</i>) 2500-13000 g/ m ³ (<i>P. tricornutum</i>) |

Fuente: SLEGGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

En la tabla 17 se presenta una recopilación de toda la información obtenida a lo largo del proyecto.

Tabla 17. Resumen de información

| Variable de Decisión | Valor |
|---------------------------|---|
| Locación | 4°26'20" N, 75°13'55" O |
| Especie de alga | <i>Chlorella Vulgaris</i> |
| Tipo de reactor | Fotobiorreactor de pared plana |
| Configuración del reactor | Paredes verticales, con una orientación norte - sur |
| Camino de luz | 0,03 m |
| Área total iluminada | 1,7 m ² |
| Concentración de biomasa | 18 g/m ³ |

Al comparar las Tablas 16 y 17, se puede observar que las especies de microalgas utilizadas son diferentes y por ende el inóculo también lo es. Diversos autores han evaluado el efecto de este parámetro sobre el desarrollo del cultivo, especialmente sobre la productividad de biomasa. En conclusión, se ha encontrado una relación importante, lo que motivaría futuras investigaciones que profundicen en este tema.

La Tabla 18 muestra la comparación de las productividades obtenidas por cada especie de microalga de acuerdo con las diferentes locaciones seleccionadas para el estudio. Fruto de este análisis, los autores encontraron que la especie *P. tricornutum* obtuvo los valores más altos; con un 32% por encima de *C vulgaris* y un 51% sobre *T. pseudonana*.

Sin embargo, es necesario aclarar que la intensidad de luz a la que fueron expuestas las especies *P. tricornutum* y *T. pseudonana* no fue la misma usada con *C. vulgaris*. Esto, debido a que los países de ubicación de las dos primeras tienen estaciones, mientras que la tercera no. Durante las estaciones ocurren diferentes condiciones que deben ser tenidas en cuenta. Por ejemplo, durante el invierno, los tiempos de exposición solar son reducidos, lo que facilita la aparición de grandes zonas oscuras en el FBR y la pérdida de biomasa debido a la respiración oscura. Si bien la situación es menos crítica durante el otoño y la primavera; la cantidad de luz solar disponible sigue sin ser suficiente para que las microalgas crezcan

debidamente. Es solamente en verano, cuando la exposición a la luz solar es lo suficiente alta, durante periodos que van desde las 13 hasta las 16 horas.

En un país como Colombia, el cual no tiene estaciones, la cantidad de luz solar en las zonas calientes, es alta y constante; pero también se debe tener en cuenta que son especies distintas con inóculos diferentes.

Tabla 18. Producción de biomasa en las ubicaciones

| Ubicación | <i>P. tricornutum</i> | <i>T. pseudonana</i> |
|-------------------|---------------------------|----------------------|
| Paises Bajos | 1 g/h*panel | 0,61 g/h*panel |
| Francia | 1,21 g/h*panel | 0,70 g/h*panel |
| Argelia | 1,38 g/h*panel | 0,76 g/h*panel |
| Colombia (Ibagué) | <i>C. vulgaris</i> | |
| | 0,88 g/h*panel | |

Fuente: SLEGGERS, P. M. WIJFFELS, R. H. VAN STRATEN, G. VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

7.1 APLICACIONES

La producción de microalgas hoy en día se utiliza principalmente para aplicaciones de alto valor añadido, debido a su alto contenido de proteínas, pigmentos, carbohidratos, minerales y vitaminas³⁸. Adicionalmente, son reconocidas como fuentes sustentables y eficientes de lípidos y ácidos grasos de cadenas largas, precursores de compuestos que pueden ser usados como ingredientes funcionales en alimentos para mejorar el valor nutricional. Todo esto, sustentando desde el origen natural y la compatibilidad con la alimentación humana.

Por ejemplo, existen varios tipos de microalgas que tienen una alta cantidad de ácido graso linolénico, el cual es un ácido esencial que contiene omega 3. Este compuesto es reconocido por sus efectos antiinflamatorios y recientemente ha sido vinculado a estudios para el tratamiento del cáncer³⁹.

Es así, como gran parte de la biomasa producida se destina a alimentos medicinales en forma de tabletas o polvo como aditivos. Adicionalmente, también han encontrado aplicación en la industria del cuidado personal y los cosméticos

³⁸ MARTÍN-SASTRE, Carlos; GONZÁLEZ ARECHAVALA, Yolanda y SANTO, Ana María. Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. En: ANALES DE MECÁNICA Y ELECTRICIDAD. vol. 91, p. 20-28

³⁹ MATOS, Angelo. Essential fatty acids from microalgae. En: INFORM: INTERNATIONAL NEWS ON FATS, OILS, AND RELATED MATERIALS. Nov 1., vol. 27, no. 10, p. 22-26

como antioxidantes. Finalmente, biofertilizantes han sido evaluados para la depuración de aguas residuales y disminuir las emisiones de dióxido de carbono. Otra aplicación muy importante que tienen las microalgas hoy en día es la producción de biocombustibles, en donde se destaca el biodiesel. Sin embargo, también se puede producir biogás, bioetanol o biohidrógeno. Según Aresta, Dibenedetto y Dumeignil⁶, dependiendo la calidad y la composición que la biomasa tenga, se determina su uso; si la biomasa es rica en lípidos será adecuada para producir bio-aceites y biodiesel, pero si presenta una gran cantidad de azúcares, será apta para producir bioetanol; por otro lado, mediante una fermentación anaeróbica de azúcares, proteínas y ácidos orgánicos se obtendrá el biogás.

Este tipo de algas, son muy ricas en lípidos (hasta un 70-80% de peso seco, con un buen promedio medio de 30-40%)⁴⁰, lo que hace que la producción de estos biocombustibles sea adecuada, además las pruebas en el laboratorio y a escala piloto que se han venido desarrollando, corroboran la potencialidad que las microalgas tienen para obtener estos tipos de combustibles³⁸; pero a nivel industrial esta tecnología se encuentra en una fase temprana de desarrollo, ya que existen diversos problemas para utilizar la biomasa con fines energéticos, como lo son el alto costo de producción y la falta del balance energético neto para el proceso, adicionalmente, la técnica que se está implementando, indica que al cultivar y sacar productos de las microalgas, se requiere una demanda de energía muy alta³⁹; es por esto que para que la obtención de algún combustible a partir de microalgas sea económicamente viable y medioambientalmente sostenible, los balances de energía deben ser beneficiosos, los costos de producción se deben disminuir drásticamente³⁸, se debe mejorar la productividad de los fotobiorreactores e incrementar el uso adecuado de esta materia prima³⁹.

⁴⁰ POSTEN, Clemens y WALTER, Christian. Microalgal Biotechnology - Integration and Economy. Berlín/Boston.: Guyter, 2012. 306 p. ISBN: 978-3-11-029827-7

8. CONCLUSIONES

- Se seleccionó el fotobiorreactor de pared plana para caracterizar la incidencia de la radiación solar, debido a los altos valores de las variables de diseño de funcionamiento de los fotobiorreactores.
- Se caracterizó la luz solar en la ciudad de Ibagué y su efecto en el fotobiorreactor de pared plana, teniendo en cuenta la propagación y transmisión de la radiación solar.
- La irradiancia promedio durante el año 2016 fue estimada en un 86% y fue propuesta como la principal fuente de energía para el cultivo de microalgas
- Se obtuvo una productividad teórica de $0,88 \text{ g/h}\cdot\text{m}^3$, determinada por la velocidad específica de crecimiento y el inóculo de microalgas
- El alto rendimiento teórico encontrado se constituye como un importante incentivo para futuros estudios y una posterior implementación de este tipo de fotobiorreactores, aprovechando las condiciones climáticas de varias regiones del país.
- Se definió la geometría básica del reactor y se esquematizó, haciendo uso del programa SOLID EDGE®.

9. RECOMENDACIONES

- Variar la concentración inicial de biomasa de microalgas y el espesor del fotobiorreactor para estudiar el impacto de estas variables en el rendimiento del cultivo.
- Evaluar las variaciones de temperatura y la humedad en la ciudad seleccionada y el efecto que tendrían sobre la eficiencia del cultivo en fotobiorreactor.

BIBLIOGRAFÍA

ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G, *et al.* "Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: Assessment of design and performance". En: Chemical Engineering Science. Abril 2001. vol. 6, no. 8, p. 2721–2732.

AIBA, Shuichi. A New Growth Kinetics Model for Photosynthetic Microorganisms. Institution of Engineers, Australia, 1993. p. 397-402.

ARESTA Michele, DIBENEDETTO Angela y DUMEIGNIL Franck. "Biorefineries – An Introduction". Alemania.: Walter de Gruyter GmbH, 2015. p 58 – 65. ISBN 978-3-11-033153-0.

BANNISTER, T. T. Quantitative description of steady state, nutrient-saturated algal growth, including adaptation. En: LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY. Jan.vol. 24, no. 1, p. 76-96.

Barajas, *et al.* BIOPROSPECCIÓN DE MICROALGAS COLOMBIANAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL. [1]:

BHATTACHARYA, D.K. y TANDON, Poonam Engineering Physics. India.: Oxford University Press. 2015. p 91. ISBN: 978-0-19-945281-1.

BURBANO DE ERCILLA, Santiago. BURBANO GARCÍA, Enrique y GARCÍA MUÑOZ, Carlos. Física General. 32 ed. Madrid.: Tébar, 2003. 800 p.

CARVALHO, Ana. MEIRELES, Luis y MALCATA, Xavier. "Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances". En: Biotechnology Progress, 22(6), 1490–1506.

CHACÓN. Sergio. La fotografía. [Consultado el Ene 20, 2017]. Disponible en: <http://fotografiaenfasis.blogspot.com.co/2016/04/transmision-de-la-luz.html>

CISBE. "Buildings for Extreme Environments – Arid". Gran Bretaña.: CISBE, 2014. p 21 – 22. ISBN 978-1-906846-43-5.

CLEVELAND Cutler y MORRIS Christopher. "Dictionary of Energy (Expanded Edition)". Gran Bretaña.: Elsevier, 2009. p 274 – 414. ISBN 978-0-08-096491-1.

CRUZ, Camila y PIMIENTA, Wendy. Evaluación de la incidencia del nitrógeno en el medio de cultivo bold basal para la producción de biomasa de la microalga *Chlorella vulgaris* en un fotorreactor, para la obtención de ácidos grasos. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Universidad de América, 2012. 136 p.

DB City. [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://es.db-city.com/Colombia--Tolima--Ibagu%C3%A9>

DE VREE, Jeroen, *et al.* "Comparison of four outdoor pilot-scale photobioreactors". En: *Biotechnology for Biofuels*. Agosto 2015. vol. 8, no. 1, p. 215.

DORAN, Pauline M. *Bioprocess Engineering Principles*. 1st ed. Oxford: Academic Press, 1995.

FIGOLI, Alberto. CASSANO, Alfredo y BASILIE, Angelo. *Membrane Technologies for Biorefining*. Gran Bretaña.: Elsevier, 2016. p. 12 – 13. ISBN 978-0-08-100451-7.

FRANCO TORRES, Omar. MARTÍNEZ GÓMEZ, María Teresa. *Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia* [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

GRIMA MOLINA, Emilio. ACIÉN FERNÁNDEZ, Francisco Gabriel. FERNÁNDEZ SEVILLA, José María. *Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas*. [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://www.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [Consultado el Nov 18, 2016]. Disponible en: <http://ideam.gov.co>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación*. Bogotá D.C. NTC 1486. 2008. 6 ed. 41 p.

_____. *Referencias documentales para fuentes de información electrónica*. Bogotá D.C. NTC 4489. 1998. 27 p.

_____. *Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura*. Bogotá D.C. NTC 5614. 2008. 38 p.

JANSSEN, Marcel, *et al.* *Enclosed outdoor photobioreactors: Light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects*. En: *Biotechnology and Bioengineering*. Octubre, 2001. vol. 81, no. 2, p. 193–210.

JANSSEN, M. G. J. *Microalgal Photosynthesis and Growth in Mass Culture*. En: *Anonymous Advances in Chemical Engineering*. 2016.

MARTÍN-SASTRE, Carlos; GONZÁLEZ ARECHAVALA, Yolanda y SANTO, Ana María. *Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas*. En: *ANALES DE MECÁNICA Y ELECTRICIDAD*. vol. 91, p. 20-28.

Materials World. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <http://mwmaterialsworld.com/>

MATOS, Angelo. Essential fatty acids from microalgae. En: INFORM: INTERNATIONAL NEWS ON FATS, OILS, AND RELATED MATERIALS. Nov 1, vol. 27, no. 10, p. 22-26

MOLINA GRIMA, E., *et al.* Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. En: JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY. vol. 70, no. 1, p. 231-247.

OLIVIERI, Giuseppe. SALATINO, Piero y MAEZOCCELLA, Antonio. "Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: configurations, operating strategies and applications". En: Chemical Technology and Biotechnology. Octubre 2013. vol. 89, no. 2, p. 178 – 195.

PANDEY Ashok, *et al.* "Industrial Biorefineries and White Biotechnology". Alemania.: Elsevier, 2015. p 48 - 55. ISBN 978-0-444-63453-5.

PASQUEVICH, Daniel. La creciente demanda mundial de energía frente a los riesgos ambientales. Asociación Argentina para el progreso de las ciencias. Argentina. 2011.

PELÁEZ, Omar, *et al.* Agenda Ambiental del Municipio de Ibagué. Ibagué. 2010. 208 p. ISBN: 978-958-99672-0-1.

Plan Frutícola Nacional. Desarrollo de la Fruticultura en Tolima. Bogotá D.C. Noviembre, 2006.

POSADA, Fanor. Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. Una revisión. [0]:2007.

POSTEN, Clemens y WALTER, Chistian. Microalgal Biotechnology - Integration and Economy. Berlín/Boston.: Guyter, 2012. 306 p. ISBN: 978-3-11-029827-7

POSTEN, Clemens y WALTER, Chistian. Microalgal Biotechnology: Potential and Production. Berlín/Boston.: Guyter, 2012. 266 p. ISBN: 978-3-11-022501-3.

Prospector. Cloruro de polivinilo (PVC) Propiedades típicas Generic PVC, Flexible. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/46/c/t/cloruro-de-polivinilo-pvc-properties-processing/sp/6>

RAMÍREZ MÉRIDA, Luis Guillermo. QUEIROZ ZEPKA, Leila y JACOB-LOPES, Eduardo. "Fotobiorreactor: Herramienta para cultivo de cianobacterias". En:

Ciencia Y Tecnología. 2013. vol. 6, no. 2, p. 9–19.

SASI, Divya, et al. Growth kinetics and lipid production using *Chlorella vulgaris* in a circulating loop photobioreactor. En: JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 86, no. 6, p. 875-880.

SLEGERS, P. M, et al. Design scenarios for flat panel photobioreactors. En: Applied Energy. Octubre 2010. vol. 88, no. 10, p.3342–3353.

SLEGERS, P. M., et al. Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. [1]: Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2013.

SMALLMAN, R. E. NGAN, A. H. W. Physical Metallurgy and Advanced Materials. 7 Ed. Gran Bretaña.: Elsevier, 2007. p. 284 – 285. ISBN 978 0 7506 6906 1.

STEELE, J.I.I. Microbial Kinetics and Dynamics in Chemical Reactor Theory. Englewood Cliffs, Estados Unidos.: Prentice-Hall, 1977. 405 – 483 p.

Surtiacrylicos. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <http://surtiacrylicos.com/>

TREDICI, Mario y ZITTELLI, Graciela. "Efficiency of Sunlight Utilization : Tubular Versus Flat Photobioreactors". En: Biotechnology and Bioengineering. Enero, 1998. vol. 57, no. 2, p. 187–197.

Vidrios y cristales GT. [Consultado el Ene 20,2017]. Disponible en: <http://vidrioscristalesgt.com/>

WANG, Bei. LAN, Christopher y HORSMAN, Mark. "Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses". En: Biotechnology Advances. Agosto, 2012. vol. 30, no. 4, p. 904–912.

ZHANG, K.; MIYACHI, S. y KURANO, N. Evaluation of a vertical flat-plate photobioreactor for outdoor biomass production and carbon dioxide bio-fixation: effects of reactor dimensions, irradiation and cell concentration on the biomass productivity and irradiation utilization efficiency. [0]:2000.

| | | |
|--|--|--------------|
|  Fundación Universidad de América | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | Código: |
| | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA | Versión 0 |
| | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Yo **Lina Rocío Gutiérrez Barragán** en calidad de titular de la obra **Diseño de un fotobiorreactor para la producción de biomasa**, elaborada en el año 2016, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el **Repositorio Digital Institucional – Lumieres**, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (*Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras*).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la *licencia Creative Commons* que se señala a continuación:

| | | |
|--|--|--------------|
|  Fundación Universidad de América | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | Código: |
| | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA | Versión 0 |
| | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |

| | | |
|---|--|-------------------------------------|
|  | Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor. | <input type="checkbox"/> |
|  | Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor. | <input type="checkbox"/> |
|  | Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma. | <input checked="" type="checkbox"/> |

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

| AUTORIZO (AUTORIZAMOS) | SI | NO |
|---|----|----|
| La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso | X | |
| La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación | X | |

| Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso. | SI | NO |
|---|----|----|
| | | X |

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 24 días del mes de Julio del año 2017.

EL AUTOR:

Autor 1

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Nombres | Apellidos |
| Lina Rocio | Gutiérrez Barragán |
| Documento de identificación No | Firma |
| 1.015.442.950 | Lina Rocio Gutiérrez B. |