

**PROPUESTA DE ESCALAMIENTO DE UN FOTOBIOREACTOR PARA LA  
MICROALGA *CHLORELLA VULGARIS* A NIVEL PILOTO**

**JHONNATHAN CAMILO TOVAR SALAMANCA  
JENNY PAOLA RUÍZ DÍAZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, D. C.  
2016**

**PROPUESTA DE ESCALAMIENTO DE UN FOTOBIOREACTOR PARA LA  
MICROALGA *CHLORELLA VULGARIS* A NIVEL PILOTO**

**JHONNATHAN CAMILO TOVAR SALAMANCA**

**JENNY PAOLA RUÍZ DÍAZ**

**Proyecto integral de grado para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director**

**DIEGO RUBIO FERNANDEZ**

**Biólogo M. Sc**

**Grupo de Investigación BiotecFua**

**Codirector**

**JUAN ANDRES SANDOVAL**

**Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ, D. C.**

**2016**

## Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado 1

---

Jurado 2

Bogotá, D.C., Junio de 2016

## DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

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.

## DEDICATORIA

*A mis padres y mi hermano, por su apoyo incondicional, por ser mi fuerza,  
mi fuente de inspiración y motivación para ser mejor cada día*

*A mis compañeros y amigos, con los que compartimos un camino en el que  
recogimos incontables experiencias e inolvidables momentos.*

*A mis profesores, con los que obtuve no sólo aprendizajes académicos  
sino de la vida en general.*

*Jhonnathan Camilo Tovar Salamanca*

*“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,  
la electricidad y la energía atómica: La voluntad”  
Albert Einstein*

## **DEDICATORIA**

*Gracias a mi madre por su apoyo incondicional, entrega y dedicación.  
Ejemplo de perseverancia en un mundo lleno de incertidumbre.*

*Jenny Paola Ruíz Díaz*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento a:

Nuestro Director Diego Rubio Fernández, por su valiosa e invaluable guía y apoyo durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Nuestro Codirector Juan Andrés Sandoval Herrera, por su oportuna y grata colaboración durante todo el proyecto.

El Ingeniero Wilmar Martínez, por su amable disposición y colaboración en la sección de monitoreo y control.

La Microbióloga Industrial Adriana Inés Páez Morales, por sus apreciables asesorías.

Nuestro compañero y amigo Nicolás Sotomayor, por su desinteresado apoyo en el proyecto.

El Ingeniero Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez, por su vital colaboración para la culminación del proyecto.



## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	24
OBJETIVOS	26
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>27</b>
1.1 ESCALAMIENTO EN INGENIERÍA	27
1.1.1 Definición	27
1.1.2 Métodos de escalamiento	27
1.1.3 Aplicaciones Del Escalamiento	29
1.2 ESCALAMIENTO EN BIOPROCESOS	29
1.2.1 Biorreactor	29
1.2.2 Fotobiorreactor	30
1.2.3 Fotobiorreactor tipo <i>airlift</i>	30
1.2.4 Ventajas del fotobiorreactor <i>airlift</i>	31
1.3 MICROALGAS Y LA ESPECIE <i>Chlorella vulgaris</i>	31
1.3.1 Microorganismos fotosintéticos y microalgas	31
1.3.2 Caracterización de la especie <i>Chlorella vulgaris</i>	33
1.3.2.1. Denominación y clasificación de la especie	34
1.3.2.2. Propiedades y Cualidades Estructurales	34
1.3.2.3. Composición Elemental de <i>Chlorella vulgaris</i>	35
1.4 PARÁMETROS DE CULTIVO	36
1.4.1 Luz	36
1.4.2 Temperatura	37
1.4.3 pH	38
1.4.4. Salinidad	39
1.4.5. Agitación	39
1.4.6. Fuente de carbono	40
1.4.7. Medio de cultivo	41
1.5 ESCALAMIENTO MICROALGAL	42
1.5.1 Relación entre el escalamiento y los parámetros	42
1.5.2 Variables de trabajo más utilizadas en escalamiento de laboratorio a nivel piloto	43
1.5.3 La luz	44
<b>2. SUSTRATOS POTENCIALES RESIDUALES PARA LA MICROALGA <i>CHLORELLA VULGARIS</i></b>	<b>46</b>
2.1 PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DE LAS MATRICES DE SELECCIÓN	46
2.1.1. Procedimiento de elaboración de la matriz inicial o primaria	46
2.1.2. Procedimiento de elaboración de las matrices por criterio o secundarias	47
2.1.3. Procedimiento de elaboración de la matriz de selección final	47

2.2	POSIBLES SUSTRATOS RESIDUALES PARA LA MICROALGA <i>Chlorella vulgaris</i>	48
2.3	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES PARA LA MATRIZ DE SELECCIÓN	51
2.3.1	Criterio de fuente de nitrógeno (NO <sub>x</sub> - NH <sub>3</sub> )	51
2.3.2	Criterio de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	51
2.3.3	Criterio de compuestos ácidos (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – HCl – HF - H <sub>2</sub> S)	51
2.3.4	Criterio de hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles (HC - COV's)	52
2.3.5	Criterio de Dioxinas y Furanos.	52
2.3.6	Criterio de Material Particulado (MP).	52
2.3.7	Criterio de Metales Pesados (Pb, Cu, Cd, Hg, entre otros).	52
2.4.	SIMPLIFICACIÓN DE POSIBLES SUSTRATOS	53
2.5	ELABORACIÓN DE LA MATRIZ INICIAL O PRIMARIA	54
2.6	ELABORACIÓN DE LAS MATRICES POR CRITERIO O SECUNDARIAS	55
2.7	ELABORACIÓN DE LA MATRIZ FINAL DE SELECCIÓN	55
<b>3.</b>	<b>MÉTODOS, VARIABLES Y MODELO DE ESCALAMIENTO</b>	<b>57</b>
3.1	PROCESO DE SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESCALAMIENTO	57
3.2	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESCALAMIENTO	57
3.3	PROCESO DE SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE ESCALAMIENTO	58
3.4	SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE ESCALAMIENTO	58
3.5	PROCESO DE SELECCIÓN DEL MODELO DE ESCALAMIENTO	61
3.6	SELECCIÓN DEL MODELO DE ESCALAMIENTO	62
<b>4.</b>	<b>DESARROLLO Y ANÁLISIS DEL MODELO DE ESCALAMIENTO SELECCIONADO</b>	<b>65</b>
4.1	IMPLICACIONES DEL MODELO DE ESCALAMIENTO	65
4.2	ECUACIONES DE ESCALAMIENTO	65
4.2.1	Fenómeno de transferencia de luz para sistemas mono-dimensionales.	65
4.2.2	Ecuaciones de Beer-Lambert en el fenómeno de transferencia de luz.	67
4.2.3	Adaptación de las hipótesis de Schuster.	68
4.3	DESCRIPCIÓN DE ECUACIONES	73
4.4	ESTABLECIMIENTO DE RANGOS DE OPERACIÓN Y PARÁMETROS REQUERIDOS	75
4.4.1	Datos de diseño base	75
4.4.2	Constantes requeridas en el modelo de escalamiento	76
4.4.3	Selección de radios	76
4.4.4	Selección de energía lumínica suministrada	77
4.4.5	Selección de concentraciones de biomasa iniciales	78
4.5	SIMULACIÓN	78
4.5.1	Diagrama de flujo para la simulación	78
4.5.2	Determinación de $\delta$ para el proceso	80
4.5.3	Uso del método numérico de Simpson	81

4.5.4	Uso paralelo de método gráfico y solución por complemento SOLVER	82
4.5.5	Determinación de la fracción iluminada	82
4.5.6	Determinación de la energía lumínica disponible en el centro del reactor	82
4.5.7	Datos de las variables para los radios seleccionados	84
4.5.8	Volumen final de reactor	85
<b>5.</b>	<b>SISTEMAS DE MONITOREO Y CONTROL PARA EL FOTOBIORREACTOR</b>	<b>87</b>
5.1.	DETERMINACIÓN DE RANGOS RECOMENDADOS PARA LAS VARIABLES DE CONTROL	87
5.2.	DIAGRAMA P&ID PARA LOS SISTEMAS DE MONITOREO Y CONTROL DEL FOTOBIORREACTOR	87
5.2.1.	Normativa de Instrumentación para Diagrama P&ID	88
5.2.2.	Nomenclatura asociada al sistema de monitoreo y control	89
5.2.3.	Descripción de los sistemas de monitoreo y control del fotobiorreactor planteados a través del Diagrama P&ID	90
5.3.	ESQUEMA DE VISTA DEL FOTOBIORREACTOR	90
5.3.1.	Descripción del esquema de vista	91
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>92</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
	BIBLIOGRAFIA	94
	ANEXOS	100

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Composición elemental de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	35
<b>Tabla 2.</b> Matriz de criterios de selección para modelo de escalamiento	64
<b>Tabla 3.</b> Datos de diseño base	75
<b>Tabla 4.</b> Constantes requeridas en el modelo de escalamiento	76
<b>Tabla 5.</b> Cuantificación energía disponible en el centro del PFR (Eb)	83
<b>Tabla 6.</b> Resultados simulación diámetro 0,114 metros	84
<b>Tabla 7.</b> Resultados simulación diámetro 0,16 metros	84
<b>Tabla 8.</b> Resultados simulación diámetro 0,22 metros	85

## LISTA DE CUADROS

	pág.
<b>Cuadro 1.</b> Clasificación métodos de escalamiento	28
<b>Cuadro 2.</b> Clasificación de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	34
<b>Cuadro 3.</b> Posibles sustratos industriales de emisión para la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> 499	
<b>Cuadro 4.</b> Reducción de Posibles sustratos industriales	53
<b>Cuadro 5.</b> Variables físicas y químicas ambientales	59
<b>Cuadro 6.</b> Modelos cinéticos para la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	60
<b>Cuadro 7.</b> Relación de parámetros involucrados en el modelo	73
<b>Cuadro 8.</b> Resultados volumen escalado	86
<b>Cuadro 9.</b> Rangos de operación recomendados	87
<b>Cuadro 10.</b> Significados de las letras de identificación	88
<b>Cuadro 11.</b> Nomenclatura de instrumentos	89

## LISTA DE GRAFICOS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Energía disponible ( $4\pi J_r/F_r$ ) Vs Z para <i>Chlorella vulgaris</i>	81

## LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
<b>Diagrama 1.</b> Proceso de simulación	79

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Biorreactor tipo Airlift con bomba para recirculación interna	31
<b>Figura 2.</b> Campo de radiación - Perfil de flux de energía lumínica radiante en geometría monodimensional.	66
<b>Figura 3.</b> Volumen de control cilindro	68
<b>Figura 4.</b> Balance de flujos directo e inverso $Fr+$ y $Fr-$	69
<b>Figura 5.</b> Energía disponible $(4\pi J_r / Fr)$ Vs $Z$	80



## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Factor de ponderación	47
<b>Ecuación 2.</b> Peso por opción de sustrato	47
<b>Ecuación 3.</b> Puntaje resultante según sustrato y criterio	48
<b>Ecuación 4.</b> Intensidad de luz	66
<b>Ecuación 5.</b> Flujo de energía radiante	67
<b>Ecuación 6.</b> Intensidad específica media	67
<b>Ecuación 7.</b> Flujo de energía medio no emisor	67
<b>Ecuación 8.</b> Balance de energía absorbida	67
<b>Ecuación 9.</b> Tasa volumétrica local de energía absorbida	67
<b>Ecuación 10.</b> Balance de energía diferencial	68
<b>Ecuación 11.</b> Balance de energía	68
<b>Ecuación 12.</b> Balance flujo $F - r$	69
<b>Ecuación 13.</b> Balance flujo $F + r$	69
<b>Ecuación 14.</b> Balance de energía	69
<b>Ecuación 15.</b> Flujo de energía radiante $F_r$	70
<b>Ecuación 16.</b> Flujo de intensidad media	70
<b>Ecuación 17.</b> Energía radiante disponible	70
<b>Ecuación 18.</b> Abscisa al eje R	70
<b>Ecuación 19.</b> Relación $E_a$ y $E_s$	70
<b>Ecuación 20.</b> Relación $\alpha$ con características de operación	70
<b>Ecuación 21.</b> Balance de energía absorbida	71
<b>Ecuación 22.</b> Energía Absorbida	71
<b>Ecuación 23.</b> Energía disponible en el centro del reactor	71
<b>Ecuación 24.</b> Abscisa energía centro del reactor	71
<b>Ecuación 25.</b> Función de Bessel	71
<b>Ecuación 26.</b> Simplificación energía centro del reactor	71
<b>Ecuación 27.</b> Crecimiento volumétrico	72
<b>Ecuación 28.</b> Crecimiento volumétrico para geometría cilíndrica	72

<b>Ecuación 29.</b> Radio de trabajo iluminado	72
<b>Ecuación 30.</b> Raíces de trabajo	72
<b>Ecuación 31.</b> Fracción iluminada	72
<b>Ecuación 32.</b> Crecimiento volumétrico promedio	72
<b>Ecuación 33.</b> Volumen de operación	76
<b>Ecuación 34.</b> Volumen del cilindro	76
<b>Ecuación 35.</b> Altura del reactor	76
<b>Ecuación 36.</b> Diámetro del riser	77
<b>Ecuación 37.</b> Integral de Simpson 1/3	82
<b>Ecuación 38.</b> Relación $E_a$ y $E_s$	110
<b>Ecuación 39.</b> Relación $\alpha$ con características de operación	110
<b>Ecuación 40.</b> Energía Absorbida	110
<b>Ecuación 41.</b> Energía radiante disponible	110
<b>Ecuación 42.</b> Abscisa al eje R	110
<b>Ecuación 43.</b> Energía disponible en el centro del reactor	111
<b>Ecuación 44.</b> Abscisa energía centro del reactor	111
<b>Ecuación 45.</b> Función de Bessel	112
<b>Ecuación 46.</b> Simplificación energía centro del reactor	112
<b>Ecuación 47.</b> Radio de trabajo iluminado	113
<b>Ecuación 48.</b> Raíces de trabajo	113
<b>Ecuación 49.</b> Fracción iluminada	115
<b>Ecuación 50.</b> Crecimiento volumétrico para geometría cilíndrica	115
<b>Ecuación 51.</b> Integral de Simpson 1/3	116
<b>Ecuación 52.</b> Crecimiento volumétrico promedio	116

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Matrices de selección	101
<b>Anexo B.</b> Muestra de cálculo de las ecuaciones para la simulación	110
<b>Anexo C.</b> Planos del fotobiorreactor	121
<b>Anexo D.</b> Sistema de monitoreo y control para el fotobiorreactor	124

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

- <A>**: Energía promedio absorbida.
- Ea**: Coeficiente de Masa de Absorción Global.
- Eb**: Energía disponible en el centro del reactor.
- Es**: Coeficiente de Masa de Dispersión Global.
- ARL**: Fotobiorreactor tipo airlift.
- Ar/Ad**: Relación de Área.
- Dd**: Diámetro *Downcomer*.
- Dr**: Diámetro del *riser*.
- E**: Iluminancia Máxima.
- E<sub>b</sub>**: Energía disponible en el centro del reactor.
- F**: Flujo luminoso.
- FBR**: Fotobiorreactor.
- H**: Altura.
- Hop**: Altura de operación.
- I**: Intensidad Lumínica.
- Lux**: Intensidad Lumínica.
- Y**: Fracción iluminada
- 4πJ<sub>r</sub>**: Energía local promedio disponible.
- α**: Relación coeficiente de absorción y dispersión.
- δ**: Relación α con características de operación.
- <R>**: Crecimiento volumétrico promedio.
- <r<sub>x</sub>>**: Crecimiento volumétrico.

## GLOSARIO

**ANGULO AZIMUTAL:** ángulo formado entre la dirección de referencia y una línea entre el observador y un punto de interés previsto en el mismo plano que la dirección de referencia

**ÁREA DE TRANSFERENCIA:** espacio donde se lleva a cabo la transferencia de masa gas-líquido (aire-medio de cultivo), esta influye directamente en el crecimiento y acumulación de biomasa a lo largo del equipo.

**BIOMASA:** materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

**BIORREACTORES:** recipientes en los cuales se llevan a cabo reacciones bioquímicas y/o bioprocesos, ya sea con enzimas, microorganismos o con células vegetales y animales.

**DOWNCOMER:** es la zona descendente de un reactor airlift, en donde el flujo del gas y líquido es predominantemente hacia abajo, para permitir la recirculación de los fluidos dentro del equipo.

**ELECTROVÁLVULA:** es una válvula electromecánica, diseñada para controlar el flujo de un fluido a través de un conducto.

**FOTON:** la partícula más pequeña de la que está compuesta la luz que no tiene masa, por tanto, se considera energía pura.

**ILUMINANCIA:** indica cuanto flujo luminoso recibe una superficie concreta.

**INTENSIDAD LUMINOSA:** indica la intensidad con la que se proyecta la luz en una dirección determinada.

**IRRADIACION:** es la radiación fotosintéticamente activa, es decir, el haz de luz a diferentes longitudes de onda capaz de inducir el proceso de fotosíntesis.

**ISOTROPIA:** propiedades de algunas sustancias que presentan el mismo comportamiento independientemente de la dirección.

**RISER:** zona ascendente de un reactor airlift, en esta el gas se inyecta en la parte inferior haciendo que el flujo de gas y el líquido sea predominantemente hacia arriba.

**SENSOR:** es un instrumento primario capaz de entrar en contacto con la variable capturarla y cuantificarla.

**TRANSMISOR:** instrumento que captan la variable de un proceso a través de un sensor y la transmite a distancia.

**TRANSMITANCIA:** la transmitancia o transmitencia es una magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo.

**VARIABLE CONTROLADA:** es aquella que se relaciona con la lectura de un sensor debido a la necesidad de verificarla a lo largo del tiempo, ya que su variación representa cambios críticos en el proceso.

**VARIABLE MANIPULADA:** es aquella que permite ser ajustada por medio de un dispositivo, cuyo cambio modifica la variable controlada.

**VARIABLE DE PROCESO:** es una magnitud tal como presión, flujo, nivel, luz, temperatura, etc. que van a ser controladas o supervisadas durante el desarrollo del proceso para verificar el efecto causado sobre estas por factores externos e internos.

## RESUMEN

El actual trabajo presenta el desarrollo del escalamiento partiendo de la selección de potenciales sustratos para la especie *Chlorella vulgaris* definiendo los criterios de selección tomando en cuenta la legislación para el control de fuentes industriales y los macro-micro nutrientes requeridos por el alga.

El escalamiento del fotobiorreactor tipo *Airlift* se desarrolla a partir de un diseño base por medio de un estudio de los diferentes métodos usados para reactores aplicados a bioprocesos teniendo en cuenta las características del sistema. Se tiene en cuenta la información recopilada en el diseño para definir las variables químicas y/o físicas de escalamiento con mayor incidencia en el medio de cultivo y así determinar el modelo que se ajuste a los criterios seleccionados para determinar el crecimiento algar generado por el fotobiorreactor.

Dicha selección deja un modelo basado en el acoplamiento entre fenómeno lumínico y el crecimiento microalgal, el cual posteriormente es desarrollado, obteniendo como resultado un volumen siete veces mayor que el inicial. Además de ello, se realiza un esquema preliminar de su volumen y se sugiere un sistema de monitoreo y control por medio de un diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).

**PALBRAS CLAVE:** Fotobiorreactor; luz; *Chlorella vulgaris*; sustratos residuales industriales; simulación; monitoreo; control.

## INTRODUCCION

El escalamiento posee diversas aplicaciones ya que la puesta en marcha de esta actividad en cualquier operación presenta ventajas como la simulación a pequeña escala de nuevas condiciones a implementar en la escala industrial, el uso de nuevos equipos e incluso la viabilidad de establecimiento de una nueva sección de operación o de la planta de producción en su totalidad<sup>1</sup>.

Debido a ello, el concepto de escalamiento es utilizado ampliamente en el ámbito científico e ingenieril, y su aplicación involucra tanto el cambio de valores en parámetros del proceso como el uso e interacción de diversos métodos.

La mayoría de los procesos novedosos que implican la generación de diferentes productos con valor agregado, inician en un nivel de laboratorio, lo que exige un escalado casi de forma intrínseca. El escalamiento constituye pues una herramienta de cambio a nivel industrial, como consecuencia de ser un puente entre la obtención de pequeños y grandes volúmenes de producción.

En particular, el escalamiento de procesos microbiológicos relacionados con microalgas constituye uno de los principales desafíos en la actualidad, debido principalmente a los nuevos usos que se encuentran a estos organismos, que como consecuencia de su diversificada variedad y preferencias, además de la posible manipulación de parámetros en búsqueda de las diversas sustancias de interés, llaman la atención de la industria que ve en ellos una herramienta no solo de cambio económico por su bajo costo y eficacia de producción, o social por la forma de obtención de los productos que repercuten de forma indirecta y directa en la vida cotidiana en la población mundial, sino también ambiental como motores de cambio en la actual premisa de llegar procesos ambientalmente sostenibles que contribuyan a evitar mayores daños al planeta<sup>2</sup>.

Sin embargo, muchos de estos escalamientos requieren de mucha investigación y desarrollo futuro, pues pese a los avances realizados en los últimos años, todavía no se logran productividades tan satisfactorias como las obtenidas a escala laboratorio o pequeña escala. Debido a ello, el medio científico e incluso industrial está en la búsqueda de nuevos métodos, modelos y demás recursos de orden investigativo que permitan un acercamiento cada vez más acentuado hacia la productividad y rentabilidad de estos procesos biológicos que ya llevan varios años ganando terreno en el campo industrial a gran escala<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> ANAYA-DURAND, Alejandro y PEDROZA-FLORES, Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. En: Tecnología, Ciencia, Educación. vol. 23, no. 001, p. 323

<sup>2</sup> NAJAFPOUR, GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007.

<sup>3</sup> MANSA, Rachel Fran, et al. Design of a pilot scale outdoor photobioreactor for mass cultivation of local microalga. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND PHYSICAL SCIENCE. vol. 6, p. 348-352



Este proyecto busca abordar el problema del escalamiento para un fotobiorreactor tomando como referencia un diseño base ya implementado; para llegar a un equipo de mayor volumen se usa como herramienta central la selección de un método fenomenológico que toma en cuenta la variable de la luz como eje central para el desarrollo del modelo de escalamiento que se ajusta a las condiciones de la microalga *Chlorella vulgaris* incorporando el crecimiento volumétrico promedio para cuantificar el crecimiento de biomasa. Con el volumen final determinado se propondrá un sistema de monitoreo y control junto con los rangos de operación recomendados por varios autores, además de sugerir una fuente alternativa de suministro de carbono y otros componentes que mitigue emisiones del sector industrial y a su vez disminuya los costos asociados al proceso.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Escalar un fotobiorreactor a nivel piloto para la producción de biomasa.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los sustratos potenciales para la microalga *Chlorella vulgaris*.
- Establecer las variables de escalamiento que tienen una mayor incidencia en el sistema de cultivo.
- Evaluar el escalamiento por medio de una estimación de la productividad del fotobiorreactor.
- Proponer los sistemas de inspección térmica, monitoreo y control para el fotobiorreactor.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 ESCALAMIENTO EN INGENIERÍA

**1.1.1 Definición.** Este término abarca al conjunto de reglas, criterios, métodos modelos utilizados con la finalidad de llevar un proceso previamente desarrollado a una escala de orden inferior o superior<sup>4</sup>.

**1.1.2 Métodos de escalamiento.** Complementariamente, para este proceso se han creado múltiples clasificaciones para identificar las técnicas de escalamiento más idóneas, que garanticen un desarrollo cada vez más adecuado de este concepto<sup>5</sup>. El Cuadro 1 muestra algunas clases de escalamiento basado en dos clasificaciones.

La primera clasificación que se observa tiene como criterio el origen del modelo, si este se originó de la práctica continua del proceso, se basa en un análisis del proceso o de una parte de él o si se relaciona con cuestiones afines de semejanza. La segunda clasificación se basa en el método particular empleado junto con las ecuaciones y parámetros tomados para la realización de las mismas.

---

<sup>4</sup> ANAYA-DURAND,Alejandro y PEDROZA-FLORES,Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. En: Tecnología, Ciencia, Educación. vol. 23, no. 001, p. 32

<sup>5</sup> NAJAFPOUR,GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007.

**Cuadro 1.** Clasificación métodos de escalamiento

<b>PRIMERA CLASIFICACIÓN<sup>6</sup></b>	
<i>Método Fenomenológico</i>	Tiene como eje principal la fundamentación con razonamiento teórico, pero de tipo microscópico sin involucrar consideraciones moleculares.
<i>Método Empírico</i>	Se postula sin bases teóricas y se espera solamente que ajuste la interacción entre los datos en el rango o intervalo de experimentación.
<i>Método de Similitud</i>	Obtenido a partir de un análisis de similitud con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico, etc. Busca la relación existente entre sistemas físicos y el tamaño de los mismos. Caracterizados por cualidades independientes entre sí como: tamaño, forma y composición.

<b>SEGUNDA CLASIFICACIÓN<sup>7</sup></b>	
<i>Método Fundamental</i>	Implica la solución de micro-balances de transferencia de <i>momentum</i> , masa y de calor. Por lo general contempla sistemas de ecuaciones complejas.
<i>Método Semi-Fundamental</i>	Establecido en los mismos principios del fundamental, pero con consideraciones menos estrictas. Baza el escalamiento en modelos de flujo simplificados.
<i>Método de Análisis Dimensional y de Régimen</i>	Las dimensiones son obtenidas por ecuaciones de balance dimensional o por principios de similitud. La similitud es muy difícil de lograr en el caso de reacciones microbiológicas en diferentes escalas, específicamente lo relacionado con la similitud hidrodinámica y la química.

<sup>6</sup> ANAYA-DURAND, Alejandro y PEDROZA-FLORES, Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. En: Tecnología, Ciencia, Educación. vol. 23, no. 001, p. 32

<sup>7</sup> OOSTERHUIS, Nicolaas Marius Gerard. En: Scale-Up of Bioreactors: A Scale-Down Approach.

**1.1.3 Aplicaciones Del Escalamiento.** En Ingeniería Química, estos tipos de escalamiento han sido aplicados continuamente en ingeniería química en varios procesos de producción y múltiples equipos. Por ejemplo, en el caso de torres empacadas se ha empleado la altura de empaque equivalente a un plato teórico (por sus siglas en inglés como HETP) o en su defecto la altura de una unidad de transferencia (HTU) con el fin de llegar a una torre de mayor capacidad con similares composiciones iniciales y finales de los fluidos involucrados. También se ha utilizado variables como el coeficiente de transferencia de masa  $K_{ga}$  y  $K_{la}$  en el caso de torres de absorción y extracción<sup>8</sup>.

En ambos casos teniendo como herramientas ecuaciones que implican relaciones de similitud entre parámetros, lo cual como consecuencia ha llevado al desarrollo de escalamientos por análisis dimensional y de régimen.

## 1.2 ESCALAMIENTO EN BIOPROCESOS

La industria biotecnológica usada para el aprovechamiento de recursos disponibles en sectores alimenticios y energéticos busca que sus procesos sean llevados a cabo a nivel industrial. Algunos ejemplos son los procesos relacionados en productos tradicionales como el vino y la cerveza, donde generalmente se usan biorreactores sin agitación pero con aireación, incluso es frecuente ver que muchos autores usen la palabra fermentador para referirse en realidad al biorreactor. Otro ejemplo es la conversión de la penicilina en ácido 6-aminopenicilánico en un biorreactor inmovilizado, en el cual se utilizan biocatalizadores de partículas para la producción de enzimas<sup>9</sup>.

Una de las aplicaciones más representativas es la producción de biomasa a mayor escala, la cual permite la obtención de lípidos, polisacáridos y enzimas que son tratados a través una serie de procesos físicos-químicos que permiten su purificación y finalmente su uso comercial. A raíz de la expectativa generada por el uso de la biomasa se hace necesario el desarrollo de tecnología para industrializarla y producir cantidades mayores de los productos generados, en especial, establecer una técnica que permita pasar de cultivos de pequeña a gran escala<sup>10</sup>.

**1.2.1 Biorreactor.** El biorreactor es el corazón de cualquier proceso bioquímico, en el cual un sistema compuesto por enzimas, nutrientes y organismos microbianos son utilizados en pro de obtener una amplia gama de productos

---

<sup>8</sup> ANAYA-DURAND, Alejandro y PEDROZA-FLORES, Humberto. Escalamiento, El Arte De La Ingeniería Química: Plantas Piloto, El Paso Entre El Huevo Y La Gallina. [Print(0)]: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos AC, 2008. p. 32

<sup>9</sup> NAJAFPOUR, GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007

<sup>10</sup> SUMI, Yoshihiko. Microalgae pioneering the future-application and utilization. En: Life Science Research Unit, Quarterly Review. no. 34,

biológicos útiles. Las decisiones que se tomen al momento del diseño de cualquier biorreactor pueden repercutir de manera significativa en el rendimiento general del proceso<sup>11</sup>.

**1.2.2 Fotobiorreactor.** Cuando dicho biorreactor posee como cuerpos de trabajo microorganismos fotosintéticos, es decir, seres que toman fuentes de luz natural o artificial para su desarrollo metabólico (como las microalgas), reciben el nombre de fotobiorreactores<sup>12</sup>.

Debido a ello, la realización de un fotobiorreactor va en función de múltiples factores, algunos de ellos ya nombrados anteriormente, pues este dispositivo encierra todo el proceso de crecimiento microalgal, entre ellos están la concentración de biomasa, el suministro de nutrientes, las condiciones de esterilidad, la agitaciones eficaces en todo el sistema, la inhibición que se puede generar con condiciones inadecuadas del producto de interés, el calor, el correcto manejo de la aireación, entre otros, todo ello con el propósito de crear un ambiente propicio para el metabolismo y la actividad microalgal<sup>13</sup>.

**1.2.3 Fotobiorreactor tipo airlift.** Esta clase de fotobiorreactores lleva a cabo la mezcla del medio sin ningún tipo de agitación mecánica, esto se debe a la naturaleza de estos dispositivos, que por medio de un sistema de aireación, realizan a su vez el movimiento continuo del medio, efectuando de forma indirecta la mezcla continua del medio. Esto se logra por la introducción de gas (generalmente aire o aire enriquecido con CO<sub>2</sub>) por la parte inferior del dispositivo; el componente gaseoso sube a través de un conducto denominado tubo ascendente, por el cual atraviesa gran parte de la sección transversal del biorreactor. Esto provoca una disminución momentánea de la densidad del líquido, que conlleva a que el dicho fluido suba junto con el gas, posteriormente al diluirse las burbujas formadas el líquido vuelve a su densidad promedio habitual y desciende, lo que crea un flujo constante del medio de cultivo<sup>14</sup>.

---

<sup>11</sup> NAJAFPOUR,GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007.

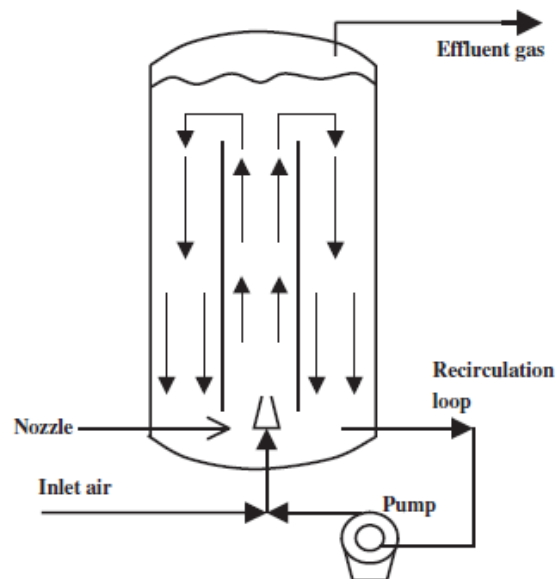
<sup>12</sup> CARVALHO,Ana P.; MEIRELES,Luis A. y MALCATA,F. Xavier. Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Design and Performances. En: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY AND AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. BIOTECHNOL PROG. 11/15/2006.vol. 22, no. 6,

<sup>13</sup> Ibid, vol. 22, no. 6

<sup>14</sup> CARVALHO,Ana P.; MEIRELES,Luis A. y MALCATA,F. Xavier. Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Design and Performances. En: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY AND AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. BIOTECHNOL PROG. 11/15/2006.vol. 22, no. 6,

**1.2.4 Ventajas del fotobiorreactor airlift.** En particular, el fotobiorreactor tipo *Airlift* como se muestra en la Figura 1., presenta ventajas frente a los otros tipos de fotobiorreactores, entre las que se encuentran el hecho de que al no existir agitación directa, se mantiene la esterilidad del medio más fácilmente, además de mejorar el transporte de nutrientes a las células y una radiación promedio homogénea en todo el cultivo. Como consecuencia de todo lo anterior, este tipo de fotobiorreactor posee unas características entre las que se encuentran un sistema de fácil control, una recolección de luz media, una transferencia de gas alta, un mezclado uniforme junto con una alta relación de superficie-volumen y una mayor concentración de la biomasa, provocando una mayor productividad en el proceso<sup>15</sup>.

**Figura 1.** Biorreactor tipo *Airlift* con bomba para recirculación interna



Fuente: (NAJAFPOUR,GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007)

### 1.3 MICROALGAS Y LA ESPECIE *Chlorella vulgaris*

**1.3.1 Microorganismos fotosintéticos y microalgas.** Las microalgas, como bien es sabido, son microorganismos fotosintéticos, puesto que procesan parte de la energía que llega a ellas en forma de luz, sin embargo no son los únicos organismos de diminuto tamaño que entran en esta denominación.

<sup>15</sup> NAJAFPOUR,GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007.

En un principio, los microorganismos fotosintéticos fueron clasificados en dos grandes grupos: las bacterias fotosintéticas y las microalgas. En cuanto a las primeras, son organismos que realizan fotosíntesis anoxigénica, es decir en ausencia de oxígeno y que además poseen bacterioclorofila, la cual es diferente químicamente hablando de la *clorofila a*, que es la sustancia que está presente en los demás organismos fotosintéticos, tanto en algas como aquellas plantas de orden superior<sup>16</sup>.

Sin embargo, existen unos microorganismos que se encuentran en medio de estas dos clasificaciones debido a sus características únicas de estructura y metabolismo: *Las cianobacterias*. Estos organismos, contrario a lo que se pensaría, no poseen bacterioclorofila sino *clorofila a* y además realizan fotosíntesis oxigénica, pese a ello su estructura de célula procariota, que por consiguiente contiene pared celular, ribosomas y ácido nucleico, las ubica en términos taxonómicos en el grupo de las bacterias<sup>17</sup>.

Como consecuencia de lo anterior, las *cianobacterias* son un puente entre las bacterias fotosintéticas y las algas eucariotas, por lo que también son conocidas como *algas verde azuladas* debido a los colores que toman y su característica singularidad intermedia entre estas dos categorías. Por otro lado, partiendo de una perspectiva amplia y un contexto biotecnológico e ingenieril como el que se trabaja en el presente proyecto de investigación, el término *microalga* hace referencia a aquellos microorganismos que posean *clorofila a* junto con otras sustancias y pigmentos que le permitan al organismo en cuestión realizar fotosíntesis oxigénica<sup>18</sup>. Desde este punto de vista, pese a su estructura procariota, las *algas verde azuladas* han sido consideradas generalmente dentro del grupo de las microalgas.

Complementariamente, como resultado de los avances en el aislamiento, amplificación e identificación de secuencias de ácidos nucleicos, se ha realizado sistemas de subtipificación basados en dicha información<sup>19</sup>. Efectivamente, se puede encontrar en la literatura una clasificación de las microalgas que las divide en cuatro categorías principales: tres referentes a las células eucariotas: *Chlorophyta* (también conocidas como algas verdes), *Bacillariophyta* (denominadas igualmente diatomeas) y la *Heterokontophyta*, junto con una

---

<sup>16</sup> ALONSO,Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. Servicio de Publicaciones, 1995.

<sup>17</sup> GARRITY,George; BOONE,David R. y CASTENHOLZ,Richard W. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology: Volume One: The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria. Springer Science & Business Media, 2012.

<sup>18</sup> ALONSO,Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. [Print(0)]: Servicio de Publicaciones, 1995.

<sup>19</sup> BROOKS,Geo. Jawetz, Melnick Y Adelberg: Microbiología Médica (25a. McGraw Hill Mexico, 2011.



categoría exclusiva para las microalgas de origen procarioto, las ya conocidas Cianobacterias<sup>20</sup>.

De hecho, muchas de las cianobacterias han sido objeto de estudio y han aportado contribuciones en la biotecnología microalgal<sup>21</sup>. Algunas incluso, como es el caso de la *Spirulina platensis*, se han utilizado en el desarrollo de diseños y escalamientos de fotobioreactores continuos a nivel de planta piloto<sup>22</sup>. Esto nos lleva a indicar que el término de *microalga*, en el contexto antes descrito, incluye dos tipos de microorganismos con diferente disposición celular: microalgas que cumplen estrictamente su taxonomía, con estructura celular eucariota y las *cianobacterias* que poseen una estructura celular procariota, pero que al igual que las primeras también poseen *clorofila a* y realizan fotosíntesis oxigénica<sup>23</sup>.

En el caso de este proyecto de investigación, será objeto de estudio la microalga *Chlorella vulgaris*, pero se profundizará en ella más adelante, como consecuencia de que su caracterización forma pieza fundamental en el desarrollo de la primera parte del mismo.

Esta aclaración de clasificación microalgal es fundamental para el presente proyecto, puesto que el modelo de escalamiento desarrollado fue inicialmente planteado para una *cianobacteria*<sup>24</sup>, pero luego se amplió su uso a microalgas eucariotas<sup>25</sup>.

**1.3.2 Caracterización de la especie *Chlorella vulgaris*.** Como es habitualmente utilizado en el campo biotecnológico y se explicó en el marco teórico, las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares y multicelulares simples, incluyendo tanto a las microalgas procariotas (*Cianobacterias*) como a las

---

<sup>20</sup> GARIBAY-HERNÁNDEZ,A., et al. Biodiesel a partir de microalgas. En: BioTecnología. vol. 13, no. 3, p. 38-61

<sup>21</sup> RODRIGUEZ,H. y GUERRERO,MG. Products and uses of cyanobacteria (blue-green algae). En: Profiles on Biotechnology.Santiago, Chile: Universidad De Santiago De Compostela. p. 247-260

<sup>22</sup> VERNEREY,A., et al. Scale-Up and Design of a Pilot-Plant Photobioreactor for the Continuous Culture of *Spirulina platensis*. En: Biotechnology Progress. vol. 17, no. 3, p. 431-438

<sup>23</sup> ALONSO,Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. [Print(0)]: Servicio de Publicaciones, 1995.

<sup>24</sup> VERNEREY,A., et al. Scale-Up and Design of a Pilot-Plant Photobioreactor for the Continuous Culture of *Spirulina Platensis*. [Print(0)]: Wiley Online Library, 2001. p. 431-438

<sup>25</sup> 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

eucariotas; esta clasificación es usada ampliamente por muchos autores<sup>26</sup> y también será aplicada en este proyecto.

**1.3.2.1. Denominación y clasificación de la especie.** Dentro de dichas microalgas eucariotas se encuentra la especie objeto de estudio: *Chlorella vulgaris*. El nombre de *Chlorella* proviene de la palabra griega chloros, que significa verde, y el sufijo latín ella hace referencia a su tamaño microscópico<sup>27</sup>.

El **Cuadro 2** muestra una clasificación más detallada de la especie de trabajo.

**Cuadro 2.** Clasificación de la microalga *Chlorella vulgaris*

<b>DOMINIO</b>	<b><i>Eukaryota</i></b>
<b>REINO</b>	Protista
<b>DIVISIÓN</b>	<i>Chlorophyta</i>
<b>CLASE</b>	<i>Trebouxiophyceae</i>
<b>ORDEN</b>	<i>Chlorellales</i>
<b>FAMILIA</b>	<i>Chlorellaceae</i>
<b>GENERO</b>	<i>Chorella</i>
<b>ESPECIE</b>	<i>Chorella vulgaris</i>

Realizada por los autores. Basada en SAFI,Carl, et al. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. En: Renewable And Sustainable Energy Reviews. Vol. 35, P. 265-278

**1.3.2.2. Propiedades y Cualidades Estructurales.** La habilidad de las especies microalgales para fijación de dióxido de carbono debería correlacionarse positivamente con la tasa de crecimiento celular y la productividad de la biomasa, desde esta perspectiva las especies *Chlorella* son consideradas candidatas promisorias para la asimilación de CO<sub>2</sub><sup>28</sup>, lo cual es debido a sus características propias, como veremos a continuación.

Se ha encontrado que las especies *Chlorella* son capaces de tolerar temperaturas por encima de los 42°C y contenidos de aire que sobrepasan el 40% en CO<sub>2</sub>, lo

<sup>26</sup> WANG,Bei, et al. CO2 bio-mitigation using microalgae. En: Applied Microbiology and Biotechnology. vol. 79, no. 5, p. 707-718

<sup>27</sup> SAFI,Carl, et al. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. vol. 35, p. 265-278

<sup>28</sup> HO,Shih-Hsin, et al. Perspectives on microalgal CO 2-emission mitigation systems—a review. En: Biotechnology Advances. vol. 29, no. 2, p. 189-198

que las hace potencialmente apropiadas para la mitigación de dióxido de carbono en gases de emisión<sup>29</sup>.

Por otro lado, se sabe que esta microalga posee una rápida tasa de crecimiento y responde a varias condiciones de crecimiento modificando su rendimiento en componentes específicos, lo que se puede deber en parte a su remarcable robusta pared celular, por lo que es ideal para la producción debido a su notable resistencia contra fuertes condiciones e invasores<sup>30</sup>.

**1.3.2.3. Composición Elemental de *Chlorella vulgaris*.** Debido a que la selección del sustrato potencial para la especie de trabajo se centra en la tolerancia de la microalga frente a los contaminantes involucrados en las emisiones, es necesario tener presente la composición elemental con la que se cuenta para *Chlorella vulgaris*, la **Tabla 1** muestra un estudio previo acerca de la mitigación de dióxido de carbono con esta microalga.

**Tabla 1.** Composición elemental de la microalga *Chlorella vulgaris*

Elemento por % en peso	% en peso	Composición Elemental por % en peso	
		Mín	Máx
<b>Macro Elementos</b>			
<b>N</b>	7.7	6.2	7.7
<b>P</b>	2.0	1.0	2.0
<b>K</b>	1.62	0.85	1.62
<b>Mg</b>	0.8	0.36	0.8
<b>S</b>	0.39	0.28	0.39
<b>Fe</b>	0.55	0.04	0.55
<b>Micro Elementos</b>			
<b>Ca</b>	0.080	0.005	0.080
<b>Zn</b>	0.005	0.0006	0.005
<b>Cu</b>	0.004	0.001	0.004
<b>Mn</b>	0.01	0.002	0.01
<b>B</b>	0.0026	-	0.0026
<b>Mo</b>	0.001	-	0.001
<b>Co</b>	0.001	-	0.001

Fuente: XINYI, E. En: Nutrients Recycling Strategy For Microalgae-Based CO<sub>2</sub> Mitigation System

<sup>29</sup> WANG, Bei, et al. CO<sub>2</sub> Bio-Mitigation using Microalgae. [Print(0)]: Springer, 2008. p. 707-718

<sup>30</sup> SAFI, Carl, et al. Morphology, Composition, Production, Processing and Applications of *Chlorella Vulgaris*: A Review. [Print(0)]: Elsevier, 2014. p. 265-278

Entre otras propiedades de composición de esta especie se encuentra su contenido total de proteínas que representa del 42-58% de la biomasa en peso seco, además del hecho de que el almidón es su polisacárido más abundante<sup>31</sup>.

## 1.4 PARÁMETROS DE CULTIVO

**1.4.1 Luz.** La luz es uno de los principales factores en cultivo de microalgas, tanto por su aporte de forma individual como por sus interacciones con otros parámetros. La radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) con la que muchos de estos microorganismos trabajan se encuentra en el espectro visible (400 – 700 nm) y la luz les representa una fuente de energía para el desarrollo de su proceso de fotosíntesis, eso junto con otros términos relacionados con este parámetro como la intensidad de luz, la longitud de onda y el fotoperiodo acompañado de sus efectos en el metabolismo de las células microalgales, hacen de la luz un parámetro a tener en cuenta en cualquier cultivo a realizar<sup>32</sup>.

La intensidad de luz juega un papel importante en este parámetro, puesto que muchas de las reacciones involucradas en el metabolismo del microorganismo son fotoquímicas, por lo que involucran cierta cantidad de luz, además de ello, el hecho de someter a las microalgas a bajas intensidades conlleva a que éstas se vean obligadas a desarrollar un mejor sistema de eficiencia en la captura, por lo que implicaría un aumento en el contenido de clorofila por célula y una intensidad de saturación menor, precisamente por esta provocada concentración a nivel celular. Por otro lado, las intensidades de luz alta dejan a las células con más recursos propios para realizar otras reacciones, como las relacionadas con la fase oscura, que involucran el previo desarrollo de síntesis enzimáticas, como la RuBP carboxilasa<sup>33</sup>. También es importante tener presente las características propias de cada especie, puesto que algunas tienen un periodo de adaptación más rápido o más lento a la intensidad lumínica suministrada, algunas inclusive son demasiado fotosensibles y un cambio brusco de este factor puede ser letal.

Complementariamente, la fotoinhibición se puede denotar como el descenso en la capacidad fotosintética a elevadas intensidades de luz, muy por encima de los valores de saturación, en otras palabras, muy superiores a las requeridas para

---

<sup>31</sup> SAFI, Carl, et al. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. vol. 35, p. 265-278

<sup>32</sup> LIPS, HS y AVISSAR, YJ. Photosynthesis and ultrastructure in microalgae. En: CRC Handbook of Microalgal Culture. CRC, Boca Raton. p. 43-66

<sup>33</sup> ALONSO, Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. [Print(0)]: Servicio de Publicaciones, 1995.

obtener la tasa máxima de fotosíntesis<sup>34</sup>, lo cual tiene como consecuencia la degradación desmesurada de proteínas intracelulares, que pese a que las propias células las resintetizan, la tasa de degradación supera la de resintetización, lo que tarde o temprano conduce a la muerte del microorganismo y por lo tanto a la pérdida parcial y posteriormente total del cultivo.

En cuanto al fotoperiodo, se sabe que es el ciclo ambiental más importante en la mayoría de los sistemas microalgales, no sólo por sus consecuencias a nivel macro como la sobreexposición del cultivo a la luz, sino por sus implicaciones en procesos como la absorción de nutrientes, división celular e incluso la bioluminiscencia en algunas especies junto con su influencia en la capacidad fotosintética y en el desarrollo de reacciones fotoquímicas y enzimáticas que se dan específicamente en ciertos periodos de luz o de oscuridad.

En el caso particular de la especie objeto de estudio, se ha comprobado que las eficiencias de luz-biomasa son favorables en los rangos de crecimiento de *Chlorella vulgaris* sometidos a valores entre 650 y 22 200 Lux<sup>35</sup>.

**1.4.2 Temperatura.** La temperatura es otro parámetro fundamental en el medio de cultivo de cualquier microalga. Al aumentar tiene un efecto en la actividad biológica, que se refleja en un incremento en la tasa de crecimiento, naturalmente dependiendo la especie dentro de un rango óptimo, por encima del cual se ve comprometida dicha progresión celular, incluso conduciendo a una población nula de persistir dicho comportamiento. La mayoría de las microalgas poseen una curva de crecimiento en forma meseta en respuesta al aumento de la temperatura, es decir, adquieren un descenso posterior al alcance de la temperatura óptima junto con un efecto inhibitorio, inclusive con tan sólo 2 o 3°C arriba de este valor<sup>36</sup>, evidentemente la inhibición cobra una mayor fuerza en el caso de presentarse intensidades de luz elevadas.

En el aspecto metabólico, uno de los efectos más marcados es su repercusión en el proceso de respiración celular en la fase oscura, que aumenta de manera exponencial con el incremento térmico. Su importancia radica en la producción de biomasa, dado que al presentarse altas temperaturas, sobre todo en la fase oscura, la pérdida de biomasa puede ser considerable debido a la respiración intensiva<sup>37</sup>.

---

<sup>34</sup> POWLES, Stephen B. Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. En: Annual Review of Plant Physiology. vol. 35, no. 1, p. 15-44

<sup>35</sup> STEPHENS, Evan, et al. Future prospects of microalgal biofuel production systems. En: Trends in Plant Science. vol. 15, no. 10, p. 554-564

<sup>36</sup> RICHMOND, Amos. CRC Handbook of Microalgal Mass Culture. CRC press, 1986.

<sup>37</sup> HALL, DO. The production of biomass: a challenge to our society. En: Handbook of Microalgal Mass Culture. CRC Press, Boca Raton, Florida. p. 1-24

Por otro lado, los rangos óptimos de temperatura para el crecimiento microalgal van en función de las especies involucradas como también del producto de interés. Se ha encontrado que temperaturas entre los 20°C a 25°C son óptimas para la producción de lípidos en especies como *Nannochloropsis*, *Scenedesmus* o *Chlorella vulgaris*, mientras que mayores temperaturas reducen significativamente la cantidad de lípidos<sup>38</sup>. La tolerancia en especies delicadas, como *Isochrysis* son de temperaturas que no superen los 25°C, por el contrario microalgas más resistentes, como la especie *Chlorella*, presentan buen crecimiento hasta los 36°C<sup>39</sup>.

**1.4.3 pH.** El pH es igualmente uno de los factores más importantes en el cultivo microalgal. Debido a que las membranas plasmáticas no son totalmente permeables a los iones de hidrógeno e hidroxilo, existe un gradiente de concentración de estos componentes a través de la membrana.

Las microalgas poseen un pH óptimo dependiendo la especie en particular, aunque este valor suele estar entre siete y ocho. Una disminución del pH por fuera del rango de tolerancia puede ser fatal, sin embargo suelen ser más resistentes cuando se trata de aumentos de este factor, por lo que generalmente se consideran microorganismos neutros, sutilmente alcalófilos.

Este parámetro también se ve afectado por el consumo de nutrientes y la solubilidad de ciertos componentes como el CO<sub>2</sub>, por ello se acostumbra a usar algún tipo de *buffer*, con el fin de provocar un efecto tampón y mantener el pH en valores adecuados por el microorganismo. Uno de las sustancias tampón más usada en las microalgas es el *buffer* de fosfatos, debido a su buen desempeño en valores cercanos a la neutralidad<sup>40</sup>.

En lo concerniente a la especie de trabajo, se ha encontrado en investigaciones previas que al someter la microalga *Chlorella vulgaris* a pH entre 6.5 y 8.3 presenta un mejor crecimiento con valores de 7.0 y 7.5<sup>41</sup>, lo cual va en concordancia con el comportamiento general explicado anteriormente.

---

<sup>38</sup> CONVERTI, Attilio, et al. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. En: Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. vol. 48, no. 6, p. 1146-1151

<sup>39</sup> LAING, I. y AYALA, FRANCISCO. Commercial mass culture techniques for producing microalgae. En: Introduction to Applied Phycology, the Hague, Netherlands, SPB Academic Publishing. p. 447-477

<sup>40</sup> SUH, In Soo y LEE, Choul-Gyun. Photobioreactor engineering: design and performance. En: Biotechnology and Bioprocess Engineering. vol. 8, no. 6, p. 313-321

<sup>41</sup> HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Gregorio Alejandro y RUBIO, Diego. Evaluación De Las Incidencias De Salinidad Y Ph Sobre La Biomasa, Productividad Y Acumulación De Lípidos En Cultivos De *Chlorella Vulgaris* En Un Fotobiorreactor De Placa Plana. Bogotá D:C: Fundación Universidad de América, 2014.

**1.4.4. Salinidad.** La salinidad en el medio de cultivo es otro parámetro a tener en cuenta. La concentración de sales disueltas inorgánicas puede afectar significativamente el crecimiento de las microalgas debido a la función osmótica. El proceso relacionado, llamado osmorregulación, produce que las células se contraigan al momento de un aumento repentino de la concentración iónica de su ambiente, en el caso contrario, es decir, de presentarse una disminución de la concentración, los solutos intracelulares salen rápidamente con el fin de evitar que éstas estallen. La recuperación posterior a este proceso puede tardar varias horas, siempre y cuando el choque no haya sido muy fuerte. Las microalgas generalmente son halotolerantes o halófilicas, por lo que acostumbran a soportar rangos relativamente amplios de salinidad. Aunque este factor no se considera tan fundamental como los anteriores, adquiere importancia no sólo por la osmorregulación celular, sino porque opone resistencia a otras condiciones de estrés, como baja actividad del agua, temperaturas bajo cero e incluso calor<sup>42</sup>.

La tolerancia a la sal está igualmente sujeta a la especie involucrada, puesto que algunas soportan concentraciones de orden milimolar y otras incluso llegan a tolerar soluciones en saturación. Por ejemplo, la especie *Chlorella vulgaris* ha demostrado tener un buen desempeño a concentraciones entre 0.1 y 0.4 M, obteniendo mejores crecimientos en ese rango en valores de 0.2 y 0.3 M<sup>43</sup>.

**1.4.5. Agitación.** Un buen manejo de la agitación es necesario en cualquier medio de cultivo, principalmente por la incidencia en éste en varios aspectos de mucha importancia.

Para comenzar, una correcta agitación garantiza una apropiada distribución celular y de nutrientes, puesto que los nutrientes se acaban al cabo de un poco tiempo y la transferencia de los mismos a través del medio repercute en el crecimiento haciéndolo más lento. Igualmente, este factor ayuda el proceso de fotosíntesis, debido a que le propicia una intensidad de radiación promedio homogénea para todas las células, eso sin contar con el hecho de que genera un dinámico patrón de luz-oscuridad para las mismas, y como ya es conocido esto representa uno de los requerimientos más elementales para una productividad de biomasa satisfactoria.

Por otro lado, la agitación continua evita la sedimentación celular en el fondo del fotobiorreactor, lo que promueve el metabolismo, esto está relacionado de igual manera con la prevención del aumento de oxígeno disuelto, pues el microorganismo tiende a producir componentes gaseosos, que de aumentar su concentración, pueden crear estancamiento a nivel metabólico. Otra ventaja es la prevención de gradientes térmicos, pues dejar el medio de cultivo estático crea

---

<sup>42</sup> ALONSO, Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. [Print(0)]: Servicio de Publicaciones, 1995.

<sup>43</sup> Op. Cit. Hernández.

multicapas termales en los diferentes niveles del fotobiorreactor involucrado, lo que podría generar aglomeraciones debido a la transferencia calor y masa que se da en el proceso de enfriamiento indirecto, eso sin tener en cuenta el olor desagradable producto de células que mueren y que por si fuera poco se ubican en los lugares con menos turbulencia y se mezclan con el resto del cultivo sano, y que a su vez desprenden sustancias en forma de escama que terminan llegando finalmente a la superficie del medio<sup>44</sup>.

Sin embargo, una agitación excesiva tampoco es recomendable. Se ha observado que esto conduce a una disminución en las tasas de crecimiento como consecuencia del estrés hidrodinámico que se produce<sup>45</sup>. Generalmente se suele utilizar agitadores de diversos tipos o burbujeros, siendo el aire el más utilizado debido al suministro intrínseco de dióxido de carbono.

**1.4.6. Fuente de carbono.** El carbono es el macronutriente más importante que constituye cerca del 50% de la biomasa microalgal<sup>46</sup>. Este componente limita el crecimiento celular debido principalmente a su efecto en el desarrollo de la fotosíntesis, donde pese a no ser determinante en varias reacciones, sí lo es en procesos intracelulares tan importantes como la síntesis de carbohidratos. Por otro lado, se ha observado que el dióxido de carbono genera un aumento casi instantáneo en la tasa fotosintética, el cual no suele mantenerse en el tiempo de continuarse con concentraciones elevadas de dicho gas, debido a que el microorganismo se adapta al cabo de unas semanas, lo que es denominado aclimatación fotosintética<sup>47</sup>.

De igual manera, esta sustancia gaseosa también interviene en otras condiciones del medio, como es el caso del pH donde, como se comentó anteriormente, puede generar descensos en dicho parámetro sino se utiliza alguna sustancia *buffer*. Aunque la fuente de carbono por lo general es dióxido de carbono, también se pueden utilizar otras referentes de carácter inorgánico u orgánico, dependiendo de la naturaleza del medio y de la especie, aunque el CO<sub>2</sub> es el más utilizado en medio autótrofos. Sustancias como el bicarbonato de sodio y sales afines han sido tomadas como nuevas herramientas de fuente de carbono, sin embargo no todas

---

<sup>44</sup> ALONSO,Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. Servicio de Publicaciones, 1995.

<sup>45</sup> SUH,In Soo y LEE,Choul-Gyun. Photobioreactor Engineering: Design and Performance. [Print(0)]: Springer, 2003. p. 313-321

<sup>46</sup> ALONSO,Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. [Print(0)]: Servicio de Publicaciones, 1995.

<sup>47</sup> ASTROS FONSECA,Iván Rodrigo; NAVARRO GUTIÉRREZ,María Camila y PÁEZ MORALES,Adriana Inés. Evaluación Del Cambio En La Concentración De Dióxido De Carbono En Una Corriente De Gas Mediante El Uso De Chlorella Vulgaris. Bogotá, D.C.: Fundación Universidad de América, 2012.



las microalgas las procesan tan fácilmente y su utilización genera mayores costos de producción del cultivo<sup>48</sup>.

Incluso muchas veces las fuentes de carbono alternativas dependen de sólo de la especie sino de la permeabilidad que cada una de ellas tenga. Por ejemplo, la especie *Chlorella* cuenta con sacarosa en su estructura, pero las células no utilizan este azúcar como fuente de este componente. De la misma forma, se ha estimado que la cantidad de lípidos producidos por microalgas como *Chlorella* aumenta hasta en un factor de 8 al suministrarle aire enriquecido con dióxido de carbono en concentraciones cercanas al 2%<sup>49</sup>.

**1.4.7. Medio de cultivo.** Los medios de cultivo constituyen uno de los mayores costos de producción microalgal. La variedad en este aspecto es múltiple, debido principalmente a la búsqueda de una mejor rentabilidad del proceso y, porque no decirlo, como consecuencia del movimiento ambientalista creado actualmente por la contaminación y el calentamiento global. Esto deja un amplio catálogo que va desde utilización de medios producidos netamente de manera sintética en un laboratorio, pasando por aquellos que pese a ser sintéticos son complementados con nutrientes y minerales naturales con el propósito de mejorar las condiciones para el crecimiento del inóculo junto con medios totalmente naturales (generalmente aguas dulces o de mar, en función de la especie objetivo) y finalizando con los medios provenientes de residuos de la manufactura, como aguas residuales industriales o excedentes de fuentes agrícolas.

En este sentido, en el panorama científico encontramos diversos estudios con fuentes alternativas usadas como medio de cultivo<sup>50</sup>, junto con medios convencionales y ya comúnmente usados como la *Peptona proteasa*, el *Watanabe* o el medio basal de *Bold*, también conocido simplemente como medio BBM (por sus siglas en inglés: *Bold's Basal Medium*). Este último proviene de una modificación de otro medio anteriormente utilizado (el medio *Bristol*), y ha sido utilizado con éxito en varias especies, entre ellas la especie objeto de este trabajo: *Chlorella vulgaris*<sup>51</sup>.

---

<sup>48</sup> CHEN, Chun-Yen, et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. En: *Bioresource Technology*. vol. 102, no. 1, p. 71-81

<sup>49</sup> CHEN, Chun-Yen, et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. En: *Bioresource Technology*. vol. 102, no. 1, p. 71-81

<sup>50</sup> RIVERO GONZÁLEZ, Roger Dennis; GÓMEZ LUNA, Lilita María y ÁLVAREZ HUBERT, Inaudis. Cultivo de *Chlorella vulgaris* sobre residuales industriales: una alternativa responsable y útil. En: *Memorias del programa científico Universidad 2010*. 201004.

<sup>51</sup> ASTROS FONSECA, Iván Rodrigo; NAVARRO GUTIÉRREZ, María Camila y PÁEZ MORALES, Adriana Inés. Evaluación Del Cambio En La Concentración De Dióxido De

## 1.5 ESCALAMIENTO MICROALGAL

Aunque el potencial de materia prima, tanto a nivel de especies de microalgas como de medios de cultivo para las mismas es grande y variado, el desarrollo del escalamiento de procesos microalgales en el país no ha sido tan acelerado como en otras regiones del mundo. Muchos de los modelos, técnicas e inclusive aplicaciones propias del escalado han sido descubiertos e implementados en otros países. Por ejemplo, en otros continentes como Europa se han realizado escalamientos a plantas piloto para algunas especies de *cianobacterias*<sup>52</sup>, mientras que en locaciones anglosajonas se ha hecho lo propio con algunos escalamientos de biorreactores tubulares<sup>53</sup>.

**1.5.1 Relación entre el escalamiento y los parámetros.** El escalamiento de procesos microalgales establece una relación directa con los parámetros de escalamiento, puesto que ellos constituyen parte fundamental en el crecimiento y sostenimiento del cultivo en el fotobiorreactor. Como consecuencia, el hecho de tener en cuenta la manipulación de dichos factores además de los valores adecuados que demanda la microalga involucrada para éstos, puede conllevar a resultados satisfactorios en la producción a gran escala del proceso<sup>54</sup>.

Desde este punto de vista, muchos de estos parámetros forman parte importante de los procesos de escalado, e incluso en ciertos casos determine las variables de trabajo con el que se llevará a cabo el escalamiento<sup>55</sup>. Parámetros explicados anteriormente, como la temperatura (no superior a 36°C para el caso de la microalga *Chlorella vulgaris*) y el pH (cerca de la neutralidad para la mayoría de especies, incluyendo la trabajada en el presente proyecto), requieren ser mantenidos constantes durante el proceso de crecimiento de la microalga, independientemente de la escala<sup>56</sup>. De igual manera ocurre con los nutrientes, que pese al aumento de volumen del cultivo, se necesitan en igual concentración, pues en el medio de cultivo la microalga sigue demandando las mismas cantidades

---

Carbono En Una Corriente De Gas Mediante El Uso De *Chlorella Vulgaris*. [Print(0)]: Bogotá, D.C.: Fundación Universidad de América, 2012.

<sup>52</sup> VERNEREY,A., et al. Scale-Up and Design of a Pilot-Plant Photobioreactor for the Continuous Culture of *Spirulina Platensis*. [Print(0)]: Wiley Online Library, 2001. p. 431-438

<sup>53</sup> MOLINA,E., et al. Scale-up of tubular photobioreactors. En: Journal of Applied Phycology. vol. 12, no. 3-5, p. 355-368

<sup>54</sup> JU,L-K y CHASE,GG. Improved scale-up strategies of bioreactors. En: BIOPROCESS ENGINEERING. vol. 8, no. 1-2, p. 49-53

<sup>55</sup> Ibid p. 49-53. JU,L-K y CHASE,GG.

<sup>56</sup> CORAL CONTRERAS-FLORES,Julian, et al. AVANCES EN EL DISEÑO CONCEPTUAL DE FOTOBIORREACTORES PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS.

promedio de nutrimentos por célula, indiferente a que se encuentre en un laboratorio o en un fotobiorreactor de gran tamaño<sup>57</sup>.

Por el contrario, otros factores como la agitación, el flujo requerido de algún componente que sirva como fuente de carbono y la luz requieren un manejo de mayor envergadura<sup>58</sup>.

Como se explicó anteriormente, el mezclado continuo del medio de cultivo representa múltiples beneficios al sistema microalgal, pero para el caso particular de un escalamiento involucraría un equipo de mayor potencia, con el fin de corresponder al mayor volumen de agitación generado. Complementariamente a esto, la fuente de carbono tendría que ser más amplia (ya fuera de carácter orgánico o inorgánico), esto con el objeto de cumplir con las necesidades nutricionales y de carácter metabólico de la microalga<sup>59</sup>.

Pese a ello, algunos fotobiorreactores realizan el proceso de agitación y de suministro de carbono de forma paralela (como es el caso del utilizado como base en el presente proyecto) al hacer circular alguna corriente de gas que contenga carbono en alguno de sus componentes y como se sabe, la principal fuente inorgánica por excelencia es el dióxido de carbono o en su defecto aire enriquecido con dicho compuesto, lo cual implicaría mayores costos al proceso. Este asunto se vincula a través de procesos de diseño y escalado con emisiones industriales como fuentes alternativas de carbono provenientes de residuos industriales, los cuales debido a su condición natural de producción continua como resultado mismo del proceso manufacturero, se generan en gran cantidad y se podrían adquirir a un bajo costo, tanto por el volumen disponible de los mismos como por la actual inutilidad que representa para muchas de las compañías<sup>60</sup>.

**1.5.2 Variables de trabajo más utilizadas en escalamiento de laboratorio a nivel piloto.** En el desarrollo de cualquier escalamiento se considera muy frecuente el uso de variables de trabajo que sean determinantes en el proceso, con el objetivo de que constituyan una relación directa entre las dos escalas involucradas, permitiendo de esta manera una mayor facilidad en el tratamiento del problema. Dichas variables seleccionadas se relacionan con la energía

---

<sup>57</sup> ALONSO, Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones. [Print(0)]: Servicio de Publicaciones, 1995.

<sup>58</sup> ZHU, Xin-Guang; LONG, Stephen P. y ORT, Donald R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? En: CURRENT OPINION IN BIOTECHNOLOGY. vol. 19, no. 2, p. 153-159

<sup>59</sup> Optimization of CO<sub>2</sub> bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*. Mariana Anjos, Bruno D. Fernandes, António A. Vicente, José A. Teixeira, Giuliano Dragone

<sup>60</sup> VELÁSQUEZ, Alberto Séijas, et al. Escalamiento de fotobiorreactor solar secuestrante de CO<sub>2</sub> de gases de combustión optimizando producción de "espirulina". En: SCIÉND. vol. 15, no. 1,

consumida, el volumen, la transferencia de masa, el mezclado del medio, entre otros aspectos.

Los modelos de escalamiento toman en cuenta propiedades relacionadas con fenómenos de transferencia ya sea de luz, masa, calor, hidrodinámicos, de sustratos específicos de crecimiento y la combinación de ellos paralelamente, todos estos asociados al medio de cultivo y a la geometría empleada en el FBR. El procedimiento usual para el escalamiento se basa en conceptos bien conocidos a partir de dos escalas de operación<sup>61</sup>.

Muchos autores hacen alusión a ellas, e incluso algunos coinciden en varias, debido a que éstas permiten que el procedimiento de aumento de escala sea más fácil de atacar. Entre ellos, Najafpour hace un compendio de las que son más utilizadas:

- Similaridad por Número de Reynolds o factores de *momentum*.
- Constante de consumo de Potencia por unidad de volumen de líquido ( $P_g/V$ ).
- Constante de Velocidad Tangencial del Impulsor ( $ND_i$ ).
- Tiempos iguales de mezclado y recirculación de líquidos.
- Constante Volumétrica de Transferencia de Masa ( $K_{La}$ )

Sin embargo, en la literatura y en la ingeniería aplicada se encuentran muchas otras que han sido empleadas con éxito, y por consiguiente no son las únicas variables de posible uso. Entre ellas se encuentran variables como el volumen iluminado o factores relacionados con la luz<sup>62</sup>, debido a la repercusión tan marcada que tiene en el crecimiento microalgal (como se describió anteriormente) y el efecto general que posee en el escalamiento del proceso, como se verá a continuación.

**1.5.3 La luz.** Un problema para el escalamiento. La luz constituye uno de los principales requerimientos en un fotobiorreactor microalgal, esto es consecuencia de su importancia en los procesos metabólicos de este tipo de microorganismos<sup>63</sup>. Sin embargo, el suministro periódico de este factor puede tener dos orígenes, es decir, de forma general se cuenta con dos clases de fuentes de luz: La luz artificial y la luz natural. La primera implica un mayor gasto económico, sobre todo en cultivos de gran tamaño, aunque también viene acompañada de un mayor control, pues es posible manipular con mayor eficacia la intensidad, los tiempos de exposición y los ciclos de luz/oscuridad, cuestión que se pierde significativamente al optar por la segunda fuente, pues la luz natural dependerá de los factores climáticos e inclusive de la latitud en donde se lleve a cabo el cultivo en el

---

<sup>61</sup> NAJAFPOUR, GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007.

<sup>62</sup> GRIMA, E. Molina, et al. Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. En: JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY. vol. 70, no. 1, p. 231-247

<sup>63</sup> POWLES, Stephen B. Photoinhibition of Photosynthesis Induced by Visible Light. [Print(0)]: Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, 1984. p. 15-44

fotobiorreactor, por lo que esta fuente es muy usada en lugares donde la luz es relativamente estable, asumiendo de paso un menor referente económico pero a su vez un menor control de los factores lumínicos involucrados<sup>64</sup>.

Igualmente, la luz entra en contacto con otros parámetros de gran envergadura. Por ejemplo, la temperatura generalmente se encuentra muy relacionada con la intensidad de luz, puesto que la temperatura óptima para el proceso de fotosíntesis aumenta cuando también lo hace la intensidad de luz<sup>65</sup>.

Por otro lado, el requerimiento lumínico promedio en un fotobiorreactor por célula generalmente no aumenta, pero al involucrar una mayor población microalgal (que es lo que ocurre particularmente al llevar el proceso a una escala superior, también conocido como *Scale-up*, por su nombre en inglés), si lo hace el requerimiento luminoso global del cultivo<sup>66</sup>. Esto conlleva a la necesidad de reformular el suministro de fuentes lumínicas en el fotobiorreactor, pues la única fuente inagotable y que no implica mayores costos es la luz natural, pero ésta como se vió anteriormente, involucra también un menor control.

Desde esta perspectiva, la luz conforma una problemática a la realización del escalamiento y se convierte de esta forma en un parámetro relacionado de manera directa con el aumento de escala, lo que hace de este factor un excelente candidato para asociarlo a variables de trabajo del escalado. Por ello, no es de extrañar que la luz se encuentre relacionada con las variables utilizadas para escalar, como se puntualizó anteriormente.

De allí que este proyecto haya seleccionado a este parámetro como eje fundamental del modelo de escalamiento. Además de ello, el desarrollo de un escalamiento basado en la luz puede conducir a valores importantes relacionados con el proceso, que pueden servir como puente para llegar a la escala de orden superior con mayor facilidad, tales como el volumen total iluminado o la tasa fotosintética<sup>67</sup>

---

<sup>64</sup> ZIJFFERS, Jan-Willem F., et al. Design process of an area-efficient photobioreactor. En: MARINE BIOTECHNOLOGY. vol. 10, no. 4, p. 404-415

<sup>65</sup> LEE, YK; TAN, HM y HEW, CS. The effect of growth temperature on the bioenergetics of photosynthetic algal cultures. En: Biotechnology and Bioengineering (USA).

<sup>66</sup> MANSA, Rachel Fran, et al. Design of a pilot scale outdoor photobioreactor for mass cultivation of local microalga. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND PHYSICAL SCIENCE. vol. 6, p. 348-352

<sup>67</sup> <sup>67</sup> MURPHY, Thomas E. y BERBEROĞLU, Halil. Effect of algae pigmentation on photobioreactor productivity and scale-up: a light transfer perspective. En: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. vol. 112, no. 18, p. 2826-2834

## 2. SUSTRATOS POTENCIALES RESIDUALES PARA LA MICROALGA *Chlorella vulgaris*

Con el ánimo de dar cumplimiento al primer objetivo del presente proyecto, se realizará una investigación enfocada en el comportamiento de la microalga de estudio *Chlorella vulgaris* frente a diversos contaminantes emitidos por las diferentes industrias. Posterior a ello, se efectuará una búsqueda de los contaminantes emitidos por las industrias a nivel nacional, la cual se desarrolla sobre un marco normativo del ente gubernamental de control ambiental correspondiente.

Subsecuentemente, se realiza un procedimiento de selección de potenciales sustratos residuales industriales para la microalga *Chlorella vulgaris* por medio del cruce de información entre las dos investigaciones previas, con lo cual se establece una serie de criterios que relacionan los diversos contaminantes industriales con la microalga de trabajo.

### 2.1 PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DE LAS MATRICES DE SELECCIÓN

A partir de dichos criterios se establece una matriz de selección, la cual es una herramienta frecuentemente usada en las industrias para la selección de materias primas y equipos. En este caso, por medio de una fuente que hace uso de dicha herramienta, se utilizan las escalas de comparación y los conceptos asociados a la matriz<sup>68</sup>, aunque la presentación y nomenclatura de las ecuaciones subsiguientes son una propuesta del presente trabajo. Por medio de esta matriz se realiza una comparación entre los diferentes sustratos industriales residuales y los criterios definidos anteriormente, dando finalmente como resultado un potencial sustrato residual de origen industrial para la especie objeto de estudio *Chlorella vulgaris*.

**2.1.1. Procedimiento de elaboración de la matriz inicial o primaria.** Como primera medida, se realiza una matriz inicial donde se comparan cada uno de los criterios entre sí a partir de la información recopilada anteriormente. Para ello se toma una escala discrecional escogida por el autor para la comparación entre dichos criterios, como sigue:

10 = Mucho más importante	1/5 = Menos importante
5 = Más importante	1/10 = Mucho menos importante
1 = Igual	

---

<sup>68</sup> Instituto para el Desarrollo Empresarial y Administrativo. Matriz De Selección. Herramientas De Calidad. [Consultado el Marzo 20162016]. Disponible en: [www.idea.edu.pe/herramientas/6taherramientadecalidadmatrizdeseleccion.doc](http://www.idea.edu.pe/herramientas/6taherramientadecalidadmatrizdeseleccion.doc)

Posterior a la matriz inicial de comparación se obtiene la sumatoria por cada criterio, valor que es dividido por la sumatoria total obtenida en la matriz, lo que da como resultado un Factor de Ponderación FP, el cual denota la importancia de cada criterio en comparación con los demás. Esto matemáticamente se representaría:

**Ecuación 1.** Factor de ponderación

$$FP_{\text{Criterio X}} = \frac{\sum_{n=1}^7 Q_X}{\sum(\sum_{n=1}^7 Q_X)}$$

Donde n es cada uno de los criterios de los siete criterios y  $Q_x$  es el valor obtenido de comparar el criterio X con cada uno de los criterios restantes.

**2.1.2. Procedimiento de elaboración de las matrices por criterio o secundarias.** Luego de esto, se realiza una matriz por cada criterio, comparando entre sí cada posible fuente de sustrato residual con respecto a uno de los criterios en particular. En consecuencia, para el caso en particular tratado se obtendrán siete matrices. Nuevamente, se toma una escala de comparación discrecional escogida por el autor que vaya en concordancia con la anterior, como sigue:

10 = Mucho mejor	1/5 = Peor
5 = Mejor	1/10 = Mucho peor
1 = Igual	

De igual manera, se realiza la sumatoria por cada posible sustrato y se divide cada uno de estos valores en la sumatoria total resultante, obteniendo un Peso por Opción de Sustrato (PO) para cada criterio. Esto matemáticamente se representaría:

**Ecuación 2.** Peso por opción de sustrato

$$PO_{X-\text{Sustrato Y}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} Q_{YX}}{\sum(\sum_{m=1}^{12} Q_{YX})}$$

Donde m es cada uno de los posibles sustratos de origen industrial y  $Q_{YX}$  es el valor obtenido al comparar el sustrato Y con cada uno de los sustratos restantes con respecto al criterio X.

**2.1.3. Procedimiento de elaboración de la matriz de selección final.** Finalmente se realiza la Matriz de Selección Final, en la que cada Factor de Ponderación (FP) obtenido en la matriz inicial es multiplicado por su respectivo

Peso de Opción (PO) dependiendo el sustrato en cuestión, los cuales fueron el resultado de las matrices secundarias. Esto matemáticamente se representaría:

**Ecuación 3.** Puntaje resultante según sustrato y criterio

$$P_{XY} = FP_X * PO_{XY}$$

Donde  $P_{XY}$  representa el puntaje resultante para el sustrato Y en el criterio X,  $FP_X$  el factor de ponderación para el criterio X y  $PO_{XY}$  el peso de opción del sustrato Y en el criterio X.

La sumatoria de las multiplicaciones correspondientes a cada fuente de sustrato residual industrial indicará cuales de ellas son las más apropiadas para la microalga *Chlorella vulgaris*.

## **2.2 POSIBLES SUSTRATOS RESIDUALES PARA LA MICROALGA *Chlorella vulgaris***

Por medio del Protocolo Para El Control y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas emitido por el Ministerio de Ambiente, se presenta un recopilado de las principales industrias de emisión de dióxido de carbono y gases tóxicos junto con los contaminantes más representativos de cada una de ellas, que por consiguiente requieren de un mayor control ambiental.



**Cuadro 3.** Posibles sustratos industriales de emisión para la microalga *Chlorella vulgaris*

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>CONTAMINANTE</b>
Producción de ácido nítrico	NO <sub>x</sub>
Producción de ácido sulfúrico	SO <sub>2</sub> Neblina ácida o trióxido de azufre (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
Producción de ácido clorhídrico	HCl
Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HC <sub>T</sub>
Producción de mezclas asfálticas	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Procesamiento de asfalto y producción de productos de asfalto	MP
Fundición de acero	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Dioxinas y Furanos
Manufactura de acero para uso Estructural	MP, HCl
Fundición primaria de cobre	MP, SO <sub>2</sub> , Cu, y Dioxinas y Furanos
Plantas de producción de bronce y latón	MP
Fundición de plomo	MP, SO <sub>2</sub> , Pb, Cu, Cd
Fundición de Zinc	MP, SO <sub>2</sub> , Dioxinas y Furanos
Galvanotecnia	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, Pb, Cd, Cu
Producción de cal	MP
Fabricación de fibra de vidrio	MP
Hornos de fundición de vidrio	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HF y HCl
Producción de pulpa para papel a la soda	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Preparación de carbón	MP
Producción de coque	MP, SO <sub>2</sub> , HC <sub>T</sub> y Dioxinas y Furanos
Fabricación de fertilizantes	MP, HF, NO <sub>x</sub>
Producción de aleaciones ferrosas	MP
Plantas de acero	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Procesamiento de minerales	MP
Reducción primaria de aluminio	MP, HF
Procesamiento de roca de Fosfato	MP

**Cuadro 3.** (Continuación)

ACTIVIDAD	CONTAMINANTE
Manufactura de sulfato de amonio	MP
Producción de caprolactama	NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>
Producción de sulfato de sodio	MP, SO <sub>2</sub>
Producción de nitrato de potasio	MP
Calcinación y secado en la industria mineral	MP
Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	MP, NO <sub>x</sub> , HC <sub>T</sub> , Dioxinas y Furanos
Puertos	MP
Fabricación de productos farmacéuticos	MP
Artes gráficas	COV's
Procesamiento y transformación de caucho natural y sintético	COV's
Recubrimiento de superficies	COV's
Producción de pigmentos inorgánicos a base de caolín, carbonato de sodio y azufre	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Generación de vapor	MP, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>
Turbinas de gas para generación de energía	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Refinación de petróleo	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Producción de cemento	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	MP, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HF
Termoeléctricas	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Hornos para calcinación de subproductos de animales	MP, NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S
Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Dioxinas y Furanos, Hidrocarburos totales dados como CH <sub>4</sub> , Hg, HF, HCl, COT, Cadmio y talio y sus compuestos, sumatoria de metales

Fuente: (Ministerio de Ambiente. Protocolo Para El Control y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas. Versión 2. 2010; modificado por el autor)

## 2.3 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES PARA LA MATRIZ DE SELECCIÓN

A través del uso del marco normativo ambiental y de la información recopilada en la investigación, se establecen los siguientes criterios de clasificación de contaminantes para los posibles sustratos industriales para la microalga. Algunos de dichos criterios asocian a varios contaminantes debido ya sea a su naturaleza química o a su efecto análogo en la especie objeto de trabajo.

**2.3.1 Criterio de fuente de nitrógeno (NO<sub>x</sub> - NH<sub>3</sub>).** El nitrógeno en forma de nitrato, amonio y urea (o combinaciones de éstos) son las fuentes de nitrógeno más comunes<sup>69</sup>. Incluso el uso de compuestos como el nitrato de potasio KNO<sub>3</sub> y la urea CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> han mostrado no afectar significativamente la tasa de crecimiento de la especie de estudio<sup>70</sup>. De igual manera, algunos estudios han demostrado la efectiva remoción del amonio por parte de *Chlorella vulgaris*<sup>71</sup>.

**2.3.2 Criterio de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).** Se ha encontrado que componentes tipo SO<sub>x</sub> pueden causar inhibición en la microalga mientras esta se adapta, lo que provoca que disminuya la fijación fotosintética del CO<sub>2</sub> y que a su vez ocasiona un leve estancamiento en la tasa de crecimiento de la microalga<sup>72</sup>. Sin embargo, este efecto se da sólo durante un corto lapso de adaptación y a largo plazo la inclusión de este componente puede mejorar la productividad de la biomasa en *Chlorella vulgaris*<sup>73</sup>.

**2.3.3 Criterio de compuestos ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - HCl - HF - H<sub>2</sub>S).** Como se expuso en el primer capítulo, las microalgas poseen un pH óptimo dependiendo la especie en particular, aunque este valor suele estar entre siete y ocho. Igualmente se apuntó que una disminución del pH por fuera del rango de tolerancia puede ser fatal y también que la especie de estudio trabaja a pH cercano a la neutralidad, por lo que estos compuestos pueden ser perjudiciales al provocar un aumento en la acidez.

---

<sup>69</sup> WANG,Bei, et al. CO<sub>2</sub> Bio-Mitigation using Microalgae. [Print(0)]: Springer, 2008. p. 707-718

<sup>70</sup> XINYI,E. En: Nutrients Recycling Strategy for Microalgae-Based CO<sub>2</sub> Mitigation System.

<sup>71</sup> DE-BASHAN,Luz E., et al. Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. En: WATER RESEARCH. vol. 36, no. 12, p. 2941-2948

<sup>72</sup> CHIU,Sheng-Yi, et al. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. En: Bioresource Technology. vol. 102, no. 19, p. 9135-9142

<sup>73</sup> ALVEAR ZAPATA,Juan Felipe. Evaluación De La Disminución En La Concentración De CO<sub>2</sub> Proveniente De Una Emisión Del Tratamiento Tpermico De Residuos Mitigado Mediante El Uso De La Microalga *Chlorella Vulgaris*. Fundación Universidad de América, 2016.

**2.3.4 Criterio de hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles (HC - COV's).** Según las Naciones Unidas, los compuestos orgánicos volátiles (o en siglas COV's) comprenden una amplia gama de sustancias entre las que figuran los hidrocarburos (alcanos, alquenos y aromáticos), los halocarburos (por ejemplo, el tricloroetileno) y los oxigenatos (alcoholes, aldehídos y cetonas). Todos ellos son componentes orgánicos suficientemente volátiles como para existir en forma de vapores en la atmósfera en condiciones normales<sup>74</sup>. Por otro lado, se ha encontrado que la fijación de CO<sub>2</sub> por *Chlorella vulgaris* no es afectada por dichos compuestos presentes en la corriente de aire<sup>75</sup>.

**2.3.5 Criterio de Dioxinas y Furanos.** Se ha encontrado en estudios previos que sustancias asociadas a estos compuestos y mucho más complejas como las dibenzo dioxinas y dibenzo furanos policlorados (PCCDD/F por sus siglas en inglés) han sido removidas efectivamente en gases de emisión por parte de la microalga objeto de estudio *Chlorella vulgaris*<sup>76</sup>.

**2.3.6 Criterio de Material Particulado (MP).** El material particulado es una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. El material particulado forma parte de la contaminación del aire. Su composición es muy variada y se puede encontrar, entre sus principales componentes, sulfatos, nitratos, el amoníaco, el cloruro sódico, el carbón, el polvo de minerales, cenizas metálicas y agua. Dichas partículas además producen reacciones químicas en el aire. Aunque es complejo la medición de su remoción, es importante tenerlo en cuenta, debido a la cantidad de compuestos que contiene, los cuales pueden aportar nutrientes o contaminantes según la fuente de origen industrial a la microalga objeto de estudio<sup>77</sup>.

**2.3.7 Criterio de Metales Pesados (Pb, Cu, Cd, Hg, entre otros).** La especie empleada ha demostrado en múltiples estudios ser efectiva en la remoción de muchos de estos metales. Se ha encontrado que la microalga es capaz de bajar

---

<sup>74</sup> Naciones Unidas (ONU). Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente. Realidades De Contaminantes: Contaminantes: Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs). [Print(0)]. [Consultado el Marzo2016]. Disponible en: [http://www.unep.org/tnt-unep/toolkit\\_esp/pollutants/vocs.html](http://www.unep.org/tnt-unep/toolkit_esp/pollutants/vocs.html)

<sup>75</sup> KEFFER, JE y KLEINHEINZ,GT. Use of *Chlorella vulgaris* for CO<sub>2</sub> mitigation in a photobioreactor. En: JOURNAL OF INDUSTRIAL MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 29, no. 5, p. 275-280

<sup>76</sup> DOUSKOVA,I., et al. Simultaneous flue gas bioremediation and reduction of microalgal biomass production costs. En: Applied Microbiology and Biotechnology. vol. 82, no. 1, p. 179-185

<sup>77</sup> Fundación para la Salud Geoambiental. Material Particulado. [Consultado el Marzo2016]. Disponible en: <http://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>

los niveles de Estaño (Sn), Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) hasta niveles permisibles<sup>78</sup>. Incluso algunas investigaciones han comprobado el crecimiento efectivo de *Chlorella vulgaris* en concentraciones de cromo y zinc superiores a las que se encuentran en los desechos industriales<sup>79</sup>.

#### 2.4. SIMPLIFICACIÓN DE POSIBLES SUSTRATOS

Como se observó anteriormente, la mayoría de los posibles sustratos contiene uno o dos contaminantes que son objeto de control. Sin embargo, debido a las ya descritas y considerables características de resistencia de la especie de trabajo y en procura de un enfoque ambiental, se busca mitigar la mayor cantidad de contaminantes. Desde esta perspectiva, se realizará el proceso de selección con aquellas fuentes industriales que posean cuatro o más contaminantes de control, lo cual deja los siguientes posibles sustratos para la realización de la matriz de selección.

**Cuadro 4.** Reducción de Posibles sustratos industriales

ACTIVIDAD	CONTAMINANTE
Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HC <sub>T</sub>
Fundición de acero	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Dioxinas y Furanos
Fundición primaria de cobre	MP, SO <sub>2</sub> , Cu, y Dioxinas y Furanos
Fundición de plomo	MP, SO <sub>2</sub> , Pb, Cu, Cd
Fundición de Zinc	MP, SO <sub>2</sub> , Dioxinas y Furanos
Galvanotecnia	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, Pb, Cd, Cu
Hornos de fundición de vidrio	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HF y HCl
Producción de coque	MP, SO <sub>2</sub> , HC <sub>T</sub> y Dioxinas y Furanos
Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	MP, NO <sub>x</sub> , HC <sub>T</sub> , Dioxinas y Furanos
Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	MP, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HF

<sup>78</sup> DOUSKOVA, I., et al. Simultaneous flue gas bioremediation and reduction of microalgal biomass production costs. En: Applied Microbiology and Biotechnology. vol. 82, no. 1, p. 179-185

<sup>79</sup> [Anónimo] Aspectos Aplicados De La Biotecnología. México: Instituto Politécnico Nacional, 2010. 9781449224424

**Cuadro 4.** Continuación

ACTIVIDAD	CONTAMINANTE
Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HC <sub>T</sub>
Fundición de acero	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Dioxinas y Furanos
Fundición primaria de cobre	MP, SO <sub>2</sub> , Cu, y Dioxinas y Furanos
Fundición de plomo	MP, SO <sub>2</sub> , Pb, Cu, Cd
Fundición de Zinc	MP, SO <sub>2</sub> , Dioxinas y Furanos
Galvanotecnia	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, Pb, Cd, Cu
Hornos de fundición de vidrio	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HF y HCl
Producción de coque	MP, SO <sub>2</sub> , HC <sub>T</sub> y Dioxinas y Furanos
Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	MP, NO <sub>x</sub> , HC <sub>T</sub> , Dioxinas y Furanos
Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	MP, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HF
Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Dioxinas y Furanos, Hidrocarburos totales dados como CH <sub>4</sub> , Hg, HF, HCl, COT, Cadmio y talio y sus compuestos, sumatoria de metales

Fuente: (Ministerio de Ambiente. Protocolo Para El Control y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas. Versión 2. 2010; modificado por el autor)

## 2.5 ELABORACIÓN DE LA MATRIZ INICIAL O PRIMARIA

A partir de la metodología mencionada en el capítulo anterior, se realiza la matriz inicial o primaria, la cual brinda los factores de ponderación por medio de la comparación de los criterios ya definidos. Dicha matriz se encuentra en la sección de Anexos (Anexo A).

A manera de ejemplo, la **Ecuación 1** muestra el cálculo del primer factor de ponderación, correspondiente al criterio de fuente de nitrógeno:

$$FP_{\text{CRITERIO 1}} = \frac{55,00}{169,7} = 0,32$$

Como se puede apreciar en la matriz, los valores obtenidos como factores de ponderación van en concordancia con la caracterización realizada en capítulo

previo, en particular en lo concerniente a la composición elemental de la especie *Chlorella vulgaris*, donde se indica que el nitrógeno es uno de los principales macro elementos, seguido de otros elementos como el azufre. Además, también se destacó la cualidad de esta microalga en tolerar metales pesados, e incluso algunos de ellos se encuentran en la composición elemental de la microalga como micro elementos.

## 2.6 ELABORACIÓN DE LAS MATRICES POR CRITERIO O SECUNDARIAS

En concordancia con el procedimiento descrito previamente, se elaboran las matrices secundarias para cada uno de los criterios establecidos en el segundo capítulo. Debido a que se determinaron siete criterios de comparación, se generan en total siete matrices secundarias que se encuentran en la sección de Anexos (**Anexo A**).

A manera de ejemplo se muestra el cálculo del primer valor de peso de opción PO, **Ecuación 2**, correspondiente al sustrato industrial proveniente de la actividad de producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético en lo que respecta al criterio de fuente de nitrógeno específicamente:

$$PO_{\text{SUSTRATO 1- CRITERIO 1}} = \frac{31,0}{244} = 0,13$$

La obtención de dichos valores se puede apreciar en el sección de **Anexos A**. Como es posible observar en cada una de dichas matrices, se comparan cada uno de los posibles sustratos entre sí con respecto a cada criterio en particular, a partir de la información recopilada sobre los contaminantes de control que cada uno de ellos posee y que fue condensada en tablas anteriores, las cuales fueron adaptadas del Protocolo Para El Control y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas emitido por el ente gubernamental correspondiente.

## 2.7 ELABORACIÓN DE LA MATRIZ FINAL DE SELECCIÓN

A partir de la matriz inicial y las matrices secundarias, las cuales dan como resultado los factores de ponderación FP y los pesos de opción PO por cada sustrato en cada criterio ya estipulado, respectivamente, se genera la matriz de selección final que se encuentra en la sección de Anexos (Anexo A). Dicha matriz muestra los resultados del producto de las ecuaciones explicadas en capítulo previo a través de dichos parámetros de comparación.

A manera de ejemplo se muestra el cálculo del primer valor de puntaje en la matriz final, **Ecuación 3**, que corresponde al puntaje final (PF) del sustrato industrial proveniente de la actividad de producción de llantas y cámaras de caucho natural

y sintético en lo que respecta al criterio de fuente de nitrógeno específicamente, puntaje que es el producto resultante entre el factor de ponderación (FP) obtenido para dicho criterio en la matriz primaria y el peso de opción (PO) para dicho sustrato en fuente de nitrógeno, resultante de la primera matriz secundaria:

$$P_{\text{SUSTRATO 1-CRITERIO 1}} = FP_{\text{CRITERIO 1}} * PO_{\text{SUSTRATO 1-CRITERIO 1}}$$

$$P_{\text{SUSTRATO 1-CRITERIO 1}} = 0,32 * 0.13 = 0.0412$$

Los resultados finales muestran que la fuente residual más adecuada para *Chlorella vulgaris* es la industria relacionada a la actividad de Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos, seguida por la industria de la galvanotecnia.

Estos resultados van en concordancia con varios estudios realizados con esta especie en particular para la bio-rremediación de gases emitidos por fuentes incineradoras de residuos municipales (MWI por sus siglas en inglés), donde se han obtenido resultados más que satisfactorios en la disminución de contaminantes, al lograr la remoción de casi todos hasta niveles permisivos por la normativa ambiental, incluso pese a que se pensaría necesario un tratamiento previo del gas debido a la alta toxicidad que esta industria en particular emite, la microalga *Chlorella vulgaris* ha mostrado efectividad en la remoción de contaminantes tanto en gases pre tratados como en gases sin tratar o de baja calidad<sup>80</sup>.

Esto también es respaldado por la caracterización previa realizada a la microalga, que resalta entre otras cosas su resistencia a fuertes condiciones de cultivo como temperaturas altas y niveles considerables de diversos contaminantes. Incluso un estudio reciente a nivel local logró una fijación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del 60% de una emisión que tenía como fuente una industria de tratamiento térmico de residuos, que a su vez también resalta que la productividad se ve beneficiada por compuestos tipo SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub><sup>81</sup>, los cuales se encuentran entre los contaminantes de control tomados en cuenta para esta industria en el presente proyecto y que a su vez van en concordancia con los dos criterios que evidenciaron mayor factor de ponderación en el proceso de selección del sustrato residual industrial realizado anteriormente.

---

<sup>80</sup> DOUSKOVA, I., et al. Simultaneous Flue Gas Bioremediation and Reduction of Microalgal Biomass Production Costs. [Print(0)]: Springer, 2009. p. 179-185

<sup>81</sup> ALVEAR ZAPATA, Juan Felipe. Evaluación De La Disminución En La Concentración De CO<sub>2</sub> Proveniente De Una Emisión Del Tratamiento Térmico De Residuos Mitigado Mediante El Uso De La Microalga *Chlorella Vulgaris*. [Print(0)]: Fundación Universidad de América, 2016.



### 3. MÉTODOS, VARIABLES Y MODELO DE ESCALAMIENTO

#### 3.1 PROCESO DE SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESCALAMIENTO

El método de escalamiento se eligió a partir de la teoría propuesta para métodos comunes de escalamiento de N. M Oosterhuis<sup>82</sup> para procesos de tipo químico o bioquímico tratándose de la implementación de organismos microscópicos. Allí se describen los tipos de método más usados para reactores y se asocia a escalamientos de fotobiorreactores tomando en cuenta las variables del medio de cultivo y operacionales como potencia de consumo de la bomba del reactor, información que también es recopilada por otros autores como G.D. Najafpour<sup>83</sup>.

De igual manera, se tiene en cuenta la teoría propuesta por A. Anaya-Durand, acerca del tipo de escalamiento utilizado según el proceso a escalar en cuestión, el equipo y la cantidad de datos disponibles para dicho fin. A partir de todo lo anterior, se busca la mejor opción de acuerdo al diseño base del fotobiorreactor resultante del trabajo de grado de Sierra y Ruiz<sup>84</sup>.

#### 3.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESCALAMIENTO

A partir de los métodos de escalamiento habitualmente aplicados en procesos biotecnológicos e ingeniería que se referenciaron en el primer capítulo, las recomendaciones teóricas sugeridas anteriormente junto con la disponibilidad de datos del diseño base a escalar, se realiza la selección del método de escalamiento.

Tomando en cuenta lo anterior y haciendo alusión a la primera clasificación de escalamiento mencionada en el marco teórico, se selecciona un método fenomenológico, debido a que el método empírico se basa en la experimentación del proceso en cuestión y el método de similaridad requiere de un análisis de varios factores que no son fáciles de evaluar a nivel teórico. En lo referente a la segunda clasificación enunciada previamente se optará por un método semi-fundamental, debido a que el método fundamental requiere la resolución de ecuaciones complejas<sup>85</sup>, que podrían involucrar usos de software fuera del alcance presupuestal del presente proyecto, de igual manera el método de análisis dimensional o de régimen requiere una caracterización más completa del proceso,

---

<sup>82</sup> OOSTERHUIS, Nicolaas Marius Gerard. [Print(0)]: TU Delft, Delft University of Technology, 1984.

<sup>83</sup> NAJAFPOUR, GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007

<sup>84</sup> RUIZ FONSECA, Steven; SIERRA HERRERA, Jennifer Alexandra y RUBIO, Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo y Generación De Biomasa. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.

<sup>85</sup> OOSTERHUIS, Nicolaas Marius Gerard. En: Scale-Up of Bioreactors: A Scale-Down Approach.

lo que implicaría más datos del diseño base a escalar, con los cuales no se cuenta.

En consecuencia, se optará por la búsqueda de modelos fenomenológicos y semi-fundamentales, es decir, aquellos que efectúen el escalado a partir de un fenómeno particular e importante a nivel global del proceso y que a su vez realicen consideraciones válidas en el proceso que permitan las resoluciones efectivas del escalamiento por medio de modelos de flujo simplificadas.

### **3.3 PROCESO DE SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE ESCALAMIENTO**

La selección de la variable de escalamiento se desarrolla a partir de una revisión bibliográfica sobre cuáles son las principales variables a tener en cuenta para el método seleccionado y algunas aplicaciones para modelos cinéticos<sup>86</sup>, que relacionan ya sea variables físicas o químicas.

El diseño base de Sierra y Ruiz<sup>87</sup> desarrollado por la línea de investigación BIOTECFUA, deja recomendaciones concernientes al montaje y operación del fotobiorreactor que se relacionan a los métodos de escalamiento de G.D. Najafpour<sup>88</sup> y su aplicación como lo describe C.U. Ugwu<sup>89</sup> al realizarse la ampliación de fotobiorreactores tubulares. Teniendo en cuenta estas dos referencias se selecciona la variable de escalamiento.

### **3.4 SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE ESCALAMIENTO**

Los modelos de escalamiento toman en cuenta propiedades relacionadas con fenómenos de transferencia ya sea de luz, masa, calor, hidrodinámicos, de sustratos específicos de crecimiento o la combinación de ellos paralelamente, todos estos asociados al medio de cultivo y a la geometría empleada en el FBR. El procedimiento usual para el escalamiento se basa en conceptos conocidos a partir de dos escalas de operación<sup>90</sup>. El modelo base muestra las características y recomendaciones concernientes por los autores para el desarrollo del FBR y hace

---

<sup>86</sup> LEE,Eunyoung; JALALIZADEH,Mehregan y ZHANG,Qiong. Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. En: Algal Research. vol. 12, p. 497-512

<sup>87</sup> RUIZ FONSECA,Steven; SIERRA HERRERA,Jennifer Alexandra y RUBIO,Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo y Generación De Biomasa. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.

<sup>88</sup> NAJAFPOUR,GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007. [Print(0)]: Elsevier, Amsterdam,

<sup>89</sup> UGWU,CU; AOYAGI,H. y UCHIYAMA,H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. En: Bioresource Technology. vol. 99, no. 10, p. 4021-4028

<sup>90</sup> NAJAFPOUR,GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007. [Print(0)]: Elsevier, Amsterdam,

énfasis en el estudio de la relación entre la fenomenología lumínica con el microorganismo empleado.

Sierra y Ruiz<sup>91</sup> recomiendan analizar los efectos de luz en el crecimiento algal, debido a que la intensidad lumínica es la base principal para el crecimiento algal en un FBR, ya que se requiere un gran control sobre esta variable porque puede llegar a foto-inhibir el alga. Cuando un fotobiorreactor tubular se amplía mediante el aumento del diámetro de los tubos, la superficie de iluminación en relación al volumen disminuiría, las células en la parte inferior del tubo no recibirán suficiente luz para el crecimiento celular a menos que haya un buen sistema de mezcla<sup>92</sup>.

Factores del ambiente como la transferencia de energía juega un papel relevante y más cuando el microorganismo con el que se trabaja tiene una fuerte influencia de este y se desea trabajar con menores costos energéticos a partir del aprovechamiento de fuentes renovables como la energía solar.

Se tiene especial atención a las condiciones ambientales del microorganismo en el reactor siendo las más importantes:

**Cuadro 5.** Variables físicas y químicas ambientales

VARIABLES QUÍMICAS	VARIABLES FÍSICAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidad de carbono, nitrógeno y fósforo.</li> <li>• Concentración de Oxígeno.</li> <li>• Formación de productos.</li> <li>• pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura.</li> <li>• Viscosidad.</li> <li>• Entrada de energía Lumínica.</li> <li>• Esfuerzo cortante.</li> <li>• Morfología microbiana.</li> </ul>

La columna vertebral de este enfoque es tratar de mantener todas estas variables constantes que puedan influir en el sistema microalgal. Debido a la inestabilidad del microambiente en la escala de producción es imposible mantener todos los aspectos del microambiente constante en las diferentes escalas.

<sup>91</sup> HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Gregorio Alejandro y RUBIO, Diego. Evaluación De Las Incidencias De Salinidad Y Ph Sobre La Biomasa, Productividad Y Acumulación De Lípidos En Cultivos De Chlorella Vulgaris En Un Fotobiorreactor De Placa Plana. [Print(0)]: Bogotá D:C: Fundación Universidad de América, 2014. RUIZ FONSECA, Steven; SIERRA HERRERA, Jennifer Alexandra y RUBIO, Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo Y Generación De Biomasa. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.

<sup>92</sup> UGWU, CU; AOYAGI, H. y UCHIYAMA, H. Photobioreactors for Mass Cultivation of Algae. [Print(0)]: Elsevier, 2008. p. 4021-4028

Atendiendo a los balances relacionados al sistema de cultivo y los fenómenos macro-cinéticos involucrados con las variables de la tabla anterior, se ha desarrollado varios modelos cinéticos para *Chlorella vulgaris* abordando diferentes factores que intervienen en el crecimiento algar y determinan sus rendimientos, como se muestra a continuación:

**Cuadro 6.** Modelos cinéticos para la microalga *Chlorella vulgaris*

FACTOR	CARACTERÍSTICAS MODELO CINÉTICO	DATOS
<b>Único Sustrato</b>	Bajo condiciones de constantes, el crecimiento de micro-algas depende la disponibilidad de nutrientes, tales como nitrógeno, fosforo y fuentes de carbono en ambientes acuáticos. La mayoría de los modelos cinéticos de crecimiento se expresan como una función de una sola concentración de nutrientes.	<p><i>Chlorella vulgaris</i>-Nitrógeno (a 4100 lx, pH 7.0, 20 °C)  <math>K_j = \mu_{max}/Y_N = 1.5 \text{ mg mg}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>  <math>K_s = 31.5 \text{ mg L}^{-1}</math></p> <p><i>Chlorella vulgaris</i>-Fosforo (a 4100 lx, pH 7.0, 20 °C)  <math>K_j = \mu_{max}/Y_P = 0.5 \text{ mg mg}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>  <math>K_s = 10.5 \text{ mg L}^{-1}</math></p>
<b>Luz</b>	Para microalgas autótrofas en condiciones de saturación de nutrientes, la luz es un factor crítico para la actividad fotosintética en relación con metabolismo energético, porque la insuficiencia de luz limita el crecimiento algar. Las microalgas requieren un nivel de luz específica con el fin de alcanzar la tasa de crecimiento máximo, llamado nivel de luz saturada. Si la intensidad de luz está muy por encima del nivel de saturación, se inhibirá el crecimiento por la luz (foto-inhibición); por otro lado, si la intensidad de luz está por debajo del nivel de saturación, el crecimiento se verá limitado por la luz (foto- limitación).	<p><i>Chlorella vulgaris</i>  <math>\mu_{max} = 0.040 \text{ h}^{-1}</math>  <math>K_j = 2.8 \text{ mW L}^{-1}</math></p>
<b>Múltiples Factores</b>	La limitación de ambos, nutrientes y la luz sobre el crecimiento de micro-algas, llamado colimitación, se observa comúnmente en entornos naturales para algas heterótrofas limitadas por N, P y C orgánico.	<p><i>Chlorella vulgaris</i>  <math>\mu_{max} = 0.8 \text{ h}^{-1}</math>  <math>K_j = 0.14 \text{ } \mu\text{E s}^{-1} 10^9 \text{ cell}^{-1}</math>  <math>K_{s,CO_2} = 1.28 \times 10^{-5} \text{ mol } 10^9 \text{ cell}^{-1}</math></p>

Fuente LEE, Eunyong; JALALIZADEH, Mehregan y ZHANG, Qiong. Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. En: ALGAL RESEARCH. vol. 12, p. 497-512 – Modificado por el autor

De acuerdo a la fenomenología seleccionada se utiliza un modelo cinético que describa la velocidad de crecimiento algal así como su comportamiento en función de los factores antes descritos (variables físicas o químicas), debido a que muchos de estos modelos tienen como principal objetivo simular condiciones hipotéticas y determinar rendimientos que permitan obtener un mejor beneficio-costos del proceso. El **Cuadro 6** muestra el resumen de diferentes estudios realizados que pueden ser de utilidad para el presente trabajo.

La *Chlorella vulgaris* al ser tratada como un organismo fotoautótrofo por el trabajo de Sierra y Ruiz<sup>93</sup> para la conversión de dióxido de carbono presenta una gran dependencia de la cantidad de luz suministrada, más que para otras variables como pH y temperatura ya que, en la mayoría de los casos, se manejan en rangos dependiendo el microorganismo.

A partir de lo anterior se toma como variable de escalamiento la luz como principal fuente de energía suministrada al fotobiorreactor y se pretende predecir su comportamiento en el medio de cultivo relacionándola a su vez con el crecimiento microalgal, por lo que se realizará una búsqueda enfocada en modelos relacionados con la luz y acoplados con el crecimiento de la microalga en el fotobiorreactor.

### **3.5 PROCESO DE SELECCIÓN DEL MODELO DE ESCALAMIENTO**

Para la definición de los límites entre una escala y otra existe una gran diversidad de criterios y en muchos casos se ha utilizado el volumen de los equipos como el criterio fundamental, particularmente en lo relacionado con la industria biotecnológica donde el incremento paulatino del volumen asegure un crecimiento adecuado del microorganismos junto con las condiciones requeridas en un tiempo dado.

La selección del modelo toma en cuenta los objetivos anteriores para ser usado en una matriz de evaluación que especifica los siguientes aspectos:

---

<sup>93</sup> HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Gregorio Alejandro y RUBIO, Diego. Evaluación De Las Incidencias De Salinidad Y Ph Sobre La Biomasa, Productividad Y Acumulación De Lípidos En Cultivos De *Chlorella Vulgaris* En Un Fotobiorreactor De Placa Plana. [Print(0)]: Bogotá D:C: Fundación Universidad de América, 2014. RUIZ FONSECA, Steven; SIERRA HERRERA, Jennifer Alexandra y RUBIO, Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo Y Generación De Biomasa. [Print(0)]: Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.

- **Disponibilidad de información.** Hace referencia a que las fuentes de información involucradas en el modelo estén disponibles, es decir, que los parámetros necesarios puedan encontrarse teóricamente a partir del mismo modelo como recurso primario o de fuentes secundarias junto con el hecho de que las referencias bibliográficas sean claras en el desarrollo del modelo.
- **Grado de Complejidad del Sistema de Ecuaciones.** Indica la factibilidad práctica de las ecuaciones abarcadas en el modelo. Allí se tienen en cuenta factores como métodos complejos de resolución de las ecuaciones involucradas en el balance general del proceso, el tiempo de resolución de cálculos, la necesidad de tener a disposición un software, entre otros.
- **Validez o validación del modelo.** Hace alusión a la factibilidad del montaje a nivel físico en futuros proyectos como prueba de validez para el desarrollo teórico del modelo, teniendo en cuenta si existen aplicaciones de este a un nivel similar de tamaño y/o volumen.
- **Consideraciones y estimaciones.** Se deben tener en cuenta que supuestos realiza el modelo seleccionado, en que fundamentos teóricos se basa, si estas consideraciones son acordes al tipo de escalamiento que se pretende hacer a nivel biotecnológico, entre otros aspectos; esto con el fin de evitar inconvenientes en el desarrollo del escalamiento. Las consideraciones del diseño base de Sierra y Ruiz deben ser tenidas en cuenta ya que es imprescindible que estén acorde con el modelo empleado.

### 3.6 SELECCIÓN DEL MODELO DE ESCALAMIENTO

Los modelos de escalamiento seleccionados parten de la fenomenología de la luz y a partir de esta se desarrolla el modelamiento. Tres modelos afines se estudiaron:

**Modelo 1:** Se presenta el estudio de la transferencia de la luz acoplando los modelos numéricos de tasas fotosintéticas para determinar la concentración y tamaño de los microorganismos basado en la pigmentación de algas para lograr la máxima productividad.

En primer lugar, los modelos empíricos de las tasas de fotosíntesis específicos se obtuvieron de los datos experimentales como una función de la irradiación local utilizando métodos inversos. A continuación, estos modelos se acoplaron con la ecuación de transferencia radiactiva (RTE) para predecir tanto las tasas de fotosíntesis locales y totales en un fotobiorreactor de pared plana (PBR)<sup>94</sup>.

---

<sup>94</sup> MURPHY, Thomas E. y BERBEROĞLU, Halil. Effect of Algae Pigmentation on Photobioreactor Productivity and Scale-Up: A Light Transfer Perspective. [Print(0)]: Elsevier, 2011. p. 2826-2834

**Modelo 2:** Relaciona la cuantificación de la interacción entre la iluminación interior, la distribución de luz interna y el crecimiento celular.

En este artículo se hace una aproximación a la ampliación de un fotobiorreactor para el cultivo de *Spirulina platensis* basado en un modelo matemático que describe esta interacción; se describe el enfoque seguido de la ampliación, el análisis de las diferentes restricciones de diseño, la física de la realización del nuevo diseño del biorreactor, el uso innovador de las paredes de material plástico para mejorar la seguridad de los reactores, y, finalmente, la corroboración de su funcionamiento satisfactorio<sup>95</sup>.

**Modelo 3:** Se basa en el efecto de la frecuencia de ciclo de luz/oscuridad en la productividad del cultivo de algas en diferentes condiciones de irradiación promedio para *Phaeodactylum tricornutum* cultivadas en fotobiorreactores tubulares exteriores. El problema de la ampliación del reactor se analizó mediante el establecimiento y de la frecuencia de los ciclos de luz-oscuridad de las células procurando que la frecuencia del ciclo se mantuviera sin cambios en el aumento de escala.

La hidrodinámica y la geometría se relacionan por medio de los ciclos luz/oscuridad al demostrar que la cantidad de luz que entra al cultivo es idéntica cuando la velocidad lineal de cultivo en el dispositivo de gran y pequeña escala está relacionada por un factor<sup>96</sup>.

La selección del modelo de escalamiento se llevó a cabo a partir de una matriz de evaluación de uno y cinco, como mínimo y máximo valor de apreciación, respectivamente. Se toma en cuenta la disponibilidad de información del modelo, grado de complejidad del sistema de ecuaciones, reproducibilidad a nivel piloto, estimaciones y consideraciones involucradas en el modelo junto con la similaridad operacional con el modelo base.

---

<sup>95</sup> VERNEREY,A., et al. Scale-Up and Design of a Pilot-Plant Photobioreactor for the Continuous Culture of *Spirulina Platensis*. [Print(0)]: Wiley Online Library, 2001. p. 431-438

<sup>96</sup> MOLINA,E., et al. Scale-Up of Tubular Photobioreactors. [Print(0)]: Springer, 2000. p. 355-368

**Tabla 2.** Matriz de criterios de selección para modelo de escalamiento

<b>ITEM/MODELO</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Disponibilidad de información del modelo	2	4	3
Grado de complejidad del sistema de ecuaciones	3	3	4
Validación a nivel Piloto	3	4	3
Estimaciones y consideraciones involucradas	3	3	2
Similaridad operacional con el modelo base.	3	4	3
<b>TOTAL</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>15</b>

A partir de cuadro anterior se selecciona el modelo de A. Vernerey<sup>97</sup> como modelo de escalamiento, el cual toma en cuenta la cuantificación de luz disponible para el alga y crecimiento volumétrico promedio para la determinación de un volumen operacional, que constituiría la variable a dimensionar para lograr el escalamiento.

---

<sup>97</sup> VERNEREY, A., et al. Scale-Up and Design of a Pilot-Plant Photobioreactor for the Continuous Culture of *Spirulina platensis*. En: BIOTECHNOLOGY PROGRESS. vol. 17, no. 3, p. 431-438. 2001



## 4. DESARROLLO Y ANÁLISIS DEL MODELO DE ESCALAMIENTO SELECCIONADO

### 4.1 IMPLICACIONES DEL MODELO DE ESCALAMIENTO

A. Vernerey toma como modelo de escalado la luz desarrollado por Cornet<sup>98</sup>, este se emplea para una geometría específica, en este caso un sistema cilíndrico empleado en el diseño base por Sierra y Ruiz<sup>99</sup> para la producción de Biomasa con *Chlorella vulgaris*.

El fenómeno de transferencia de luz involucra dos factores dentro del reactor para sistemas de ambientes líquidos que son: absorción por los pigmentos celulares y la dispersión provocada por la biomasa. La absorción celular toma como base las ecuaciones de Lambert-Beer y la hipótesis de Shuster's para lograr simplificaciones en el balance de energía y desarrollar del modelo matemático propuesto. Estas simplificaciones sostienen que la luz permanece isotrópica a través del reactor y que los fenómenos de absorción y dispersión son independientes entre sí, los cuales son expresados por dos constantes  $E_a$  y  $E_s$  respectivamente. En consecuencia, todas las ecuaciones correspondientes a este capítulo provienen del modelo seleccionado previamente, el cual es planteado por Cornet<sup>100</sup>.

### 4.2 ECUACIONES DE ESCALAMIENTO

#### 4.2.1 Fenómeno de transferencia de luz para sistemas mono-dimensionales.

La atenuación de la luz en sistemas de cultivo en lotes o continuos en fotobiorreactores crea un campo de radiación heterogénea dentro del cultivo afectando la cinética local. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta los efectos sobre el crecimiento tasa de la intensidad de la luz disponible en cada punto del reactor.

Las geometrías mono-dimensional simplifica el problema de resolución mediante la reducción de los conocimientos necesarios para la proyección de los vectores a lo largo de un solo eje, el eje  $r$ . Esta aproximación sólo es posible para

---

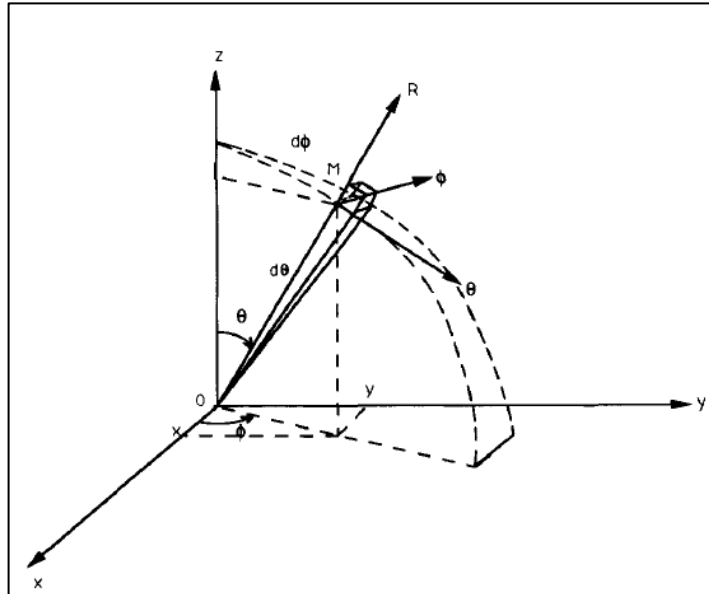
<sup>98</sup> CORNET,J-F, et al. A simplified monodimensional approach for modeling coupling between radiant light transfer and growth kinetics in photobioreactors. En: Chemical Engineering Science. vol. 50, no. 9, p. 1489-1500

<sup>99</sup> RUIZ FONSECA,Steven; SIERRA HERRERA,Jennifer Alexandra y RUBIO,Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo Y Generación De Biomasa. [Print(0)]: Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.

<sup>100</sup> CORNET,JF; DUSSAP,CG y DUBERTRET,G. A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: I. Coupling between light transfer and growth kinetics. En: Biotechnology and Bioengineering. vol. 40, no. 7, p. 817-825

fotobiorreactores en los que se proporciona luz sobre un lado o dos lados opuestos. La intensidad de la luz específica de una longitud de onda,  $\lambda$ ,  $I_\lambda(r, \theta, \varphi)$ , en cada punto del eje r, en la dirección que forma un ángulo  $\theta$  con el eje r, con  $\varphi$  como el ángulo azimutal en coordenadas esféricas, la **Figura 2** caracteriza el campo de radiación:

**Figura 2.** Campo de radiación - Perfil de flux de energía lumínica radiante en geometría monodimensional.



Fuente: CORNET,JF; DUSSAP,CG y DUBERTRET,G. A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: I. Coupling between light transfer and growth kinetics. En: *Biotechnology and Bioengineering*. vol. 40, no. 7, p. 817-825.

A medida que la intensidad de la luz radiante específica,  $I_\lambda$ , depende de la dirección de observación, es recomendable usar las variables integradas en todas las direcciones del espacio y el espectro visible en la formulación matemática modelada. El flujo de energía radiante (F) o la intensidad específica media (J) se define por la siguiente doble integral en el espectro total ( $\theta$  que indica el ángulo entre la luz incidente y dispersada):

**Ecuación 4.** Intensidad de luz

$$I = \int_0^{\infty} I_\lambda d\lambda$$

**Ecuación 5.** Flujo de energía radiante

$$\mathbf{F} = \int_0^{\infty} \int_{4\pi} I_{\lambda} \cos \theta \, d\omega \, d\lambda$$

**Ecuación 6.** Intensidad específica media

$$J = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\infty} \int_{4\pi} I_{\lambda} \, d\omega \, d\lambda.$$

El flujo de energía radiante que contienen un medio no emisor de células está dada por la ecuación integro-diferencial de transporte radiativo en su forma integrada desde la intensidad específica:

**Ecuación 7.** Flujo de energía medio no emisor

$$-\nabla \cdot \mathbf{F} = (E_a + E_s) C_x \int_{4\pi} I \, d\omega \quad - E_s C_x \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \int_{4\pi} p(\theta, \theta') I \, d\omega' \, d\omega$$

Mediante el cálculo de los términos integral de la **Ecuación. (4)** se establece el balance de energía en un volumen diferencial dando la tasa volumétrica local de energía radiante absorbida por las células en cada punto del medio  $\langle A \rangle$ .

**Ecuación 8.** Balance de energía absorbida

$$-\nabla \cdot \mathbf{F} = 4\pi E_a C_x J = \mathcal{A}$$

**Ecuación 9.** Tasa volumétrica local de energía absorbida

$$\langle \mathcal{A} \rangle = E_a C_x \frac{1}{V} \int_V 4\pi J \, dV.$$

**4.2.2 Ecuaciones de Beer-Lambert en el fenómeno de transferencia de luz.**

La ley de Beer-Lambert por lo general se ha utilizado para expresar la atenuación exponencial del flujo de energía radiante, que resulta de la absorción por el medio del cultivo. Se utiliza ampliamente en la fotometría y se basa en dos supuestos: el campo de luz en paralelo a través del recipiente y la dispersión de las partículas sólidas se pueden despreciar.

Un balance de energía diferencial radiante sobre una sección área transversal lleva a:

**Ecuación 10.** Balance de energía diferencial

$$dF_r = -E_{ar} C_x F_r dr$$

Después de la integración:

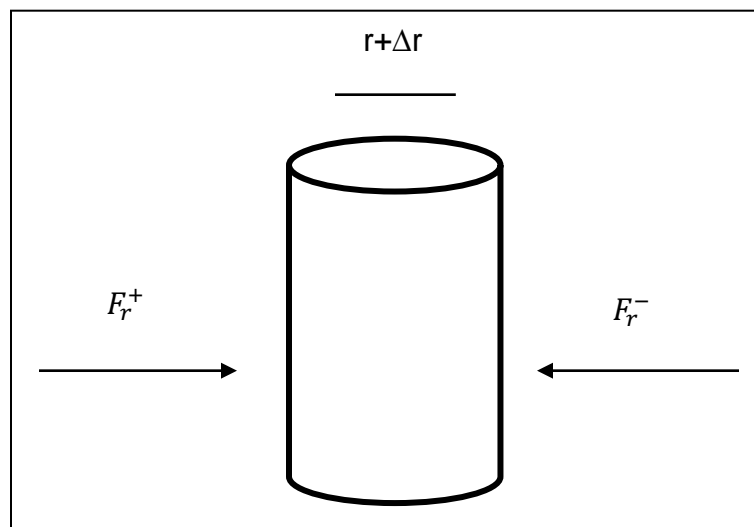
**Ecuación 11.** Balance de energía

$$F_r = F_o \exp(-E_{ar} C_x r)$$

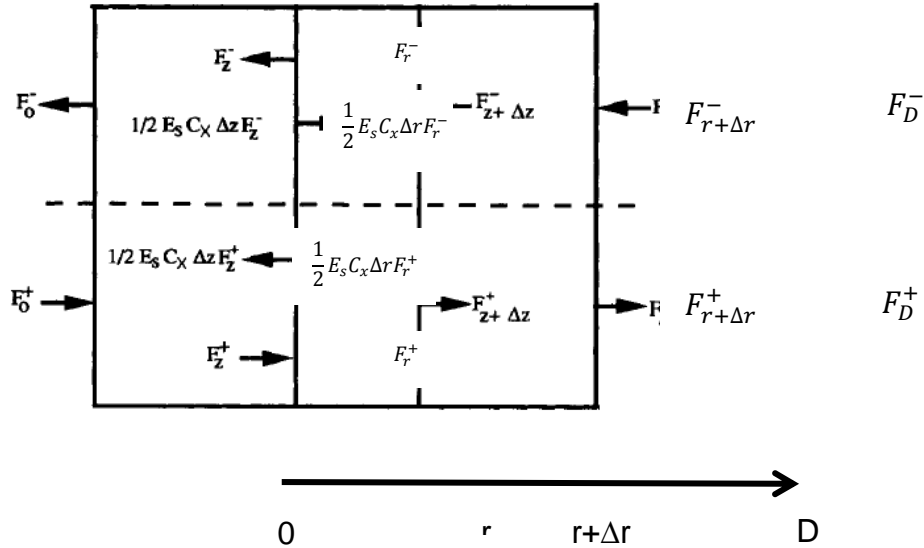
**4.2.3 Adaptación de las hipótesis de Schuster.** El problema de la transferencia de la radiación que se expresa en una integro-diferencial del balance de energía de la luz en las **Ecuaciones 4, 5, 6, 7**, requiriendo un método numérico sofisticado para su solución. El método de cálculo utilizado tiene que estar vinculado a las ecuaciones cinéticas que dependen del tiempo, estas conducen a una alta complejidad y requieren un cálculo extenso para su resolución.

El campo de radiación se divide entonces en dos flujos opuestos  $F^+$  y  $F^-$ , se asume que es paralelo al eje  $r$  (**Figura 3**). Dos balances de energía en el volumen elemental de radio  $\Delta r$  se pueden establecer por separado para los flujos directo e inverso  $F_r^+$  y  $F_r^-$  (**Figura 4**):

**Figura 3.** Volumen de control cilindro



**Figura 4.** Balance de flujos directo e inverso  $F_{r+}$  y  $F_{r-}$



El coeficiente  $\frac{1}{2}$  se ha asignado a las condiciones de dispersión; en esta forma, el estado de los balances energéticos que median la energía dispersada directa  $\frac{1}{2} E_s C_x \Delta r F_r^+$  se refleja en la dirección opuesta  $F_r^-$  y por lo tanto debe ser añadida como un término de entrada en el balance  $F_r^-$ . A la inversa, el término  $\frac{1}{2} E_s C_x \Delta r F_r^-$  debe considerarse en el equilibrio  $F_r^+$ .

**Ecuación 12.** Balance flujo  $F_r^-$

$$F_r^+ - F_{r+\Delta r}^- + \frac{1}{2} E_s C_x \Delta r F_r^- = E_a C_x \Delta r F_r^+ + \frac{1}{2} E_s C_x \Delta r F_r^+$$

**Ecuación 13.** Balance flujo  $F_r^+$

$$F_{r+\Delta r}^- - F_r^- + \frac{1}{2} E_s C_x \Delta r F_r^+ = E_a C_x \Delta r F_r^- + \frac{1}{2} E_s C_x \Delta r F_r^-$$

Al dividir toda la **Ecuación 12 y 13** en  $\Delta r$  y tomando el límite cuando  $\Delta r$  tiende a cero, se obtiene un sistema diferencial. Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias se toma como límites  $r=R$ ,  $F_r^- = F_R^-$  y  $r=0$ ,  $F_r^+ = F_R^+$ .

**Ecuación 14.** Balance de energía

$$\frac{d(rF_r^+)}{dr} = -E_a C_x r F_r^+ + \frac{1}{2} E_s C_x r (F_r^- - F_r^+)$$

**Ecuación 15. Balance de energía**

$$\frac{d(rF_r^-)}{dr} = E_a C_x r F_r^- + \frac{1}{2} E_s C_x r (F_r^- - F_r^+)$$

El flujo de energía radiante  $F_r$ , se obtiene entonces por la suma vectorial de los flujos directos e inversos de manera que:

**Ecuación 16. Flujo de energía radiante  $F_r$** 

$$F_r = F_r^+ + F_r^-$$

La intensidad media de  $J_r$  se calcula según la **Ecuación 6** que conduce al resultado de  $J_r$  es proporcional a la suma absoluta de  $F_r^-$  y  $F_r^+$ :

**Ecuación 17. Flujo de intensidad media**

$$J_r = \frac{1}{4\pi} (F_r^+ + F_r^-)$$

Se obtiene la siguiente ecuación para la energía radiante disponible,  $4\pi J_r$ , y el flujo de energía radiante suministrada al reactor,  $F_r$ :

**Ecuación 18. Energía radiante disponible**

$$\frac{4\pi J_r}{F_R} = \frac{1}{Z} \frac{2 \cosh(\delta Z)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)}$$

Dónde:

**Ecuación 19. Abscisa al eje R**

$$Z = \frac{r}{R}$$

**Ecuación 20. Relación  $E_a$  y  $E_s$** 

$$\alpha = \sqrt{\frac{E_a}{E_a + E_s}}$$

**Ecuación 21. Relación  $\alpha$  con características de operación**

$$\delta = (E_a + E_s) \alpha C_x R$$

La energía volumétrica promedio se define como la energía que es absorbida dentro el reactor a partir del balance de la **Ecuación 8, 9**:

**Ecuación 22.** Balance de energía absorbida

$$\frac{\langle A \rangle}{\left(\frac{2F_R}{R}\right)} = 1 - \frac{F_r^+}{F_R} - \frac{F_r^+}{F_R}$$

**Ecuación 23.** Energía Absorbida

$$\frac{\langle A \rangle}{(2F_R/R)} = \frac{2\alpha \sinh(\delta)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)}$$

Para cuantificar la cantidad de energía disponible,  $E_b$ , se usa como método de medición una esfera fotométrica en el centro de reactor que cuantifica la energía que llega al centro a partir de la ecuación:

**Ecuación 24.** Energía disponible en el centro del reactor

$$\frac{E_b}{F_R} = \frac{1}{Z_b} \frac{1}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} [\pi I_0(\delta Z_b)]$$

Dónde:

**Ecuación 25.** Abscisa energía centro del reactor

$$Z_b = \frac{r_b}{R}$$

Para el factor  $I_0(\delta Z_b)$  es una función de orden cero de Bessel explicada de la forma:

**Ecuación 26.** Función de Bessel

$$I_0(\delta Z_b) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\delta Z_b}{2}\right)^{2k}}{k! \Gamma(k+1)}$$

Para valores de  $I_0(\delta Z_b) < 1$ , concentraciones bajas de biomasa, se reduce a:

**Ecuación 27.** Simplificación energía centro del reactor

$$\frac{E_b}{F_R} = \frac{1}{Z_b} \frac{\pi}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} \left[ 1 + \left(\frac{\delta Z_b}{2}\right)^2 \right]$$

La velocidad de crecimiento volumétrico como función de la energía radiante disponible usualmente se considera con base en el modelo de Monod:

**Ecuación 28.** Crecimiento volumétrico

$$\langle r_x \rangle = \frac{1}{V} \int_V \mu_M C_x \frac{4\pi J}{K_j + 4\pi J} dV$$

Para un sistema cilíndrico empleado se reduce a:

**Ecuación 29.** Crecimiento volumétrico para geometría cilíndrica

$$\langle \mu' \rangle \approx \frac{1}{\pi(R^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^R 2\pi \mu'_M \frac{4\pi J_r}{K_j + 4\pi J_r} r dr$$

Se define como el radio de trabajo iluminado:

**Ecuación 30.** Radio de trabajo iluminado

$$\frac{1}{Z_2 \cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} - \frac{C_p}{F_R} = 0$$

La solución de esta ecuación permite encontrar dos raíces, la solución menor y mayor, las cuales son para el radio cerca al centro y externo del reactor respectivamente:

**Ecuación 31.** Raíces de trabajo

$$Z_2 = \frac{R_2}{R} \text{ y } Z'_2 = \frac{R'_2}{R}$$

Por lo tanto la fracción iluminada del reactor está dada por:

**Ecuación 32.** Fracción iluminada

$$\gamma = \frac{R'^2_2}{R^2} + \frac{R^2 - R^2_2}{R^2}$$

Teniendo en cuenta la fracción iluminada del reactor y el contenido de *phycocianinas* el crecimiento volumétrico promedio queda definido como:

**Ecuación 33.** Crecimiento volumétrico promedio

$$\langle R \rangle = \langle \mu' \rangle \gamma C_{PC}$$



### 4.3 DESCRIPCIÓN DE ECUACIONES

El **Cuadro 7** relaciona las diferentes ecuaciones y los parámetros de los cuales dependen para su desarrollo.

**Cuadro 7.** Relación de parámetros involucrados en el modelo

ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN
$\frac{4\pi J_r}{F_R} = \frac{1}{Z} \frac{2 \cosh(\delta Z)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)}$	<p>Energía promedio disponible. Relaciona la intensidad lumínica disponible (<math>4\pi J_r</math>) y la energía suministrada al fotobiorreactor (<math>F_R</math>)</p>
$Z = \frac{r}{R}$	<p>Abscisa entre un punto desde el centro del reactor (<math>r=0</math>) y el radio total de trabajo (<math>R</math>) del fotobiorreactor.</p>
$\alpha = \sqrt{\frac{E_a}{E_a + E_s}}$	<p>Relación de características de absorción y dispersión entre coeficientes de cada microorganismo.</p>
$\delta = (E_a + E_s)\alpha C_x R$	<p>Es proporcional a la concentración de biomasa y al espesor del medio a la absorción fija y condiciones de dispersión</p>
$\frac{\langle A \rangle}{(2F_R/R)} = \frac{2\alpha \sinh(\delta)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)}$	<p>Energía absorbida dentro del reactor. Depende del <math>R</math> (radio de trabajo) y la energía suministrada al fotobiorreactor (<math>F_R</math>).</p>
$\frac{E_b}{F_R} = \frac{1}{Z_b} \frac{1}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} [\pi I_0(\delta Z_b)]$	<p>Energía disponible en el centro del reactor.</p>
$Z_b = \frac{r_b}{R}$	<p>Abscisa entre la esfera de referencia para energía centro del reactor y el radio de trabajo del fotobiorreactor.</p>

**Cuadro 7.** (Continuación)

ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN
$\langle \mu' \rangle \approx \frac{1}{\pi(R^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^R 2\pi\mu'_M \frac{4\pi J_r}{K_j + 4\pi J_r} r dr$	<p>Crecimiento volumétrico que relaciona distancias r según el radio de trabajo (R) del fotobiorreactor con la intensidad lumínica disponible (<math>4\pi J_r</math>) y velocidad máxima de crecimiento (<math>\mu'_M</math>) para una geometría cilíndrica.</p>
$\frac{1}{Z_2} \frac{2 \cosh(\delta Z_2)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} - \frac{C_p}{F_R} = 0$	<p>Valor más bajo para la energía disponible a la que aparece ineficiente la fotosíntesis (Punto de compensación) definido como igual a <math>C_p</math> en función del microorganismo considerado.</p>
$Z_2 = \frac{R_2}{R} \text{ y } Z'_2 = \frac{R'_2}{R}$	<p>Resultado para el punto de compensación mínimo el cual muestra dos raíces de interés las cuales indican valores de radios, uno cerca al centro del reactor (<math>R'_2</math>) y otro al radio total de trabajo (<math>R_2</math>).</p>
$\gamma = \frac{R'^2_2}{R^2} + \frac{R^2 - R^2_2}{R^2}$	<p>Fracción iluminada de trabajo que relaciona las raíces para punto de compensación mínima y el radio total de trabajo como la fracción en la cual se considera que el fotobiorreactor se encuentra iluminado por la energía suministrada al fotobiorreactor.</p>
$\langle R \rangle = \langle \mu' \rangle \gamma C_{PC}$	<p>Crecimiento volumétrico promedio que relaciona el crecimiento del microorganismo con la fracción iluminada (<math>\gamma</math>) y el contenido de clorofila a (<math>C_{PC}</math>) para el microorganismo objeto de estudio.</p>

Realizado por los autores. Basado en: CORNET, J-F, et al. A simplified monodimensional approach for modeling coupling between radiant light transfer and growth kinetics in photobioreactors. En: CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE. vol. 50, no. 9, p. 1489-1500.

#### 4.4 ESTABLECIMIENTO DE RANGOS DE OPERACIÓN Y PARÁMETROS REQUERIDOS

Para el desarrollo del modelo se requieren datos iniciales de energía suministrada, concentración de biomasa y selección de radios de trabajo, todos los rangos necesarios son suministrados por fuentes bibliográficas que toman en cuenta la variable de la luz como principal factor de influencia en el crecimiento volumétrico. Las constantes para *Chlorella vulgaris* necesarias para el desarrollo del modelo son coeficiente de masa para dispersión y absorción global, contenido de sustancia fotosintética (para el caso de la microalga es *clorofila a*), velocidad máxima de crecimiento, constante cinética de saturación y punto de compensación mínimo.

**4.4.1 Datos de diseño base.** Se trabajará con datos extraídos para el diseño de laboratorio de Ruiz, Sierra que se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Datos de diseño base

PARAMETRO	VALOR
Relación Ar/Ad	0,41
Potencia del compresor (W/m <sup>3</sup> )	4,95x10 <sup>-4</sup>
Velocidad del Difusor (CFM)	64,09
Diámetro Orificios del Difusor (mm)	3
Temperatura de Operación (°C)	27-29
Flujo Luminoso (Lux)	1993,47
Presión (Bar)	2
Irradiancia (W/m <sup>2</sup> )	12,08
Volumen de Operación (cm <sup>3</sup> )	5600
Volumen Total (L)	7
Altura de Operación (cm)	54,77
Altura Total (cm)	70
Diámetro de Dawn-comer (m)	0,114
Diámetro de Riser (m)	0,073
Área de Dawn-comer (m <sup>2</sup> )	9,5x10 <sup>-3</sup>
Área de Riser (m <sup>2</sup> )	4,5 x10 <sup>-3</sup>

Fuente: RUIZ FONSECA, Steven; SIERRA HERRERA, Jennifer Alexandra y RUBIO, Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo y Generación De Biomasa. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.

**4.4.2 Constantes requeridas en el modelo de escalamiento.** Para la solución de las ecuaciones del modelo de Cornet se requieren los siguientes parámetros:

**Tabla 4.** Constantes requeridas en el modelo de escalamiento

PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR	FUENTE
Punto de Compensación ( W/ m <sup>2</sup> )	Cp	1,0	(Cornet et al. 1995)
Coefficiente de Masa de Absorción Global (m <sup>2</sup> /Kg)	Ea	21,4	(Yun, Park 2001)
Coefficiente de Masa de Dispersión Global (m <sup>2</sup> /Kg)	Es	4557	(Yun, Park 2001)
Constante Media de Saturación para la Energía Radiante disponible (W/ m <sup>2</sup> )	Kj	2,8	(Sasi et al. 2011)
Velocidad Máxima de Crecimiento (1/h)	μm	0,049	(Sasi et al. 2011)
Contenido de <i>Phycocyaninas</i> (kg/m <sup>3</sup> )	Cpc	4,66x10 <sup>-2</sup>	(Hadj-Romdhane et al. 2012)

**4.4.3 Selección de radios.** La selección de radios de trabajo se hará a partir de las ecuaciones de dimensionamiento usadas en el trabajo de Huérfano<sup>101</sup> que involucran rangos de operación dependiendo el tipo de geometría y su influencia en factores como el tiempo de mezclado y la transferencia de masa.

**Ecuación 34.** Volumen de operación

$$V_{op} \approx [0,7 - 0,9]V_c$$

**Ecuación 35.** Volumen del cilindro

$$V_c = \frac{\pi H D_d^2}{4}$$

**Ecuación 36.** Altura del reactor

$$H \approx [3 - 6]D_d$$

<sup>101</sup>HUÉRFANO DELGADO, David Guillermo y ARTURO CALVACHE, Jaime Eduardo. Diseño y Simulación De Un Reactor Airlift Para La Producción De Alcohol Etílico Con *Saccharomyces Cerevisiae* Utilizando *Solanum Tuberosum*. Bogotá: Fundación Universidad de América, 2009.

### Ecuación 37. Diámetro del riser

$$D_r \approx [0,3 - 0,6]D_d$$

En el diseño de fotobiorreactores *airlift* la relación  $A_r/A_d$ , es decir, la relación entre las áreas para el riser y el down-comer, un valor óptimo cercano a 1 ayuda a evitar pérdidas en el crecimiento algar provocado por zonas muertas generadas por la altura del reactor y mala agitación, así como la incidencia insuficiente de luz al sistema. Merchuk<sup>102</sup> reporta que para diámetros de trabajo inferiores a 0,2 m se logra un crecimiento algar adecuado respecto a la relación  $A_r/A_d$  con alturas de 1 m.

**4.4.4 Selección de energía lumínica suministrada.** La energía lumínica representa un factor importante y por ende su comportamiento heterogéneo dentro del reactor debe ser tenido en cuenta para abastecer los niveles energéticos requeridos por la célula por encima de la PAR; la luz suele ser absorbida por los pigmentos celulares para sistemas autotróficos y adicional a esto la dispersión generada por la biomasa acumulada en el volumen de reactor generan zonas muertas y desabastecimiento de energía para el óptimo crecimiento celular.

Powell mostró<sup>103</sup> que la cantidad de luz suministrada fue un factor limitante para la tasa de crecimiento de *Chlorella vulgaris* en un biorreactor bien mezclado y como resultado genera un crecimiento lineal. Así como la intensidad de la luz, la presencia de una fase oscura influye en la cinética de crecimiento de microalgas.

El incremento de la intensidad de luz al nivel de saturación aumenta la tasa de crecimiento, pero intensidades más altas de luz pueden causar foto-inhibición. El rango visible de radiación electromagnética con longitudes de onda varía desde 380 a 750 nm, son estas longitudes de onda visibles las que contribuyen a la fotosíntesis y afectan la tasa de crecimiento de las microalgas<sup>104</sup>. El espectro de acción de *Chlorella vulgaris* muestra dos preferencias de absorción: azul (420-450 nm) y rojo (660-700 nm)<sup>105</sup> con un valor aproximado de intensidad requerida por el alga de 2000 lux/m<sup>2</sup>. En concordancia con lo anterior, se trabajarán con rangos de energía suministrada entre 60 y 200 W/m<sup>2</sup> en longitudes de onda en el espectro rojo.

---

<sup>102</sup> MERCHUK, José C. *Airlift Bioreactors: a Review of Recent Advances*. En: Canadian Journal of Chemical Engineering. vol. 81, no. 3/4, p. 324-337

<sup>103</sup> POWELL, Erin E., et al. *Growth kinetics of Chlorella vulgaris and its use as a cathodic half cell*. En: Bioresource Technology. vol. 100, no. 1, p. 269-274

<sup>104</sup> BARSANTI, Laura y GUALTIERI, Paolo. *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*. CRC press, 2014.

<sup>105</sup> LEE, Choul-Gyun y PALSSON, Bernhard Ø. *Photoacclimation of chlorella vulgaris to red light from light-emitting diodes leads to autospore release following each cellular division*. En: Biotechnology Progress. vol. 12, no. 2, p. 249-256

**4.4.5 Selección de concentraciones de biomasa iniciales.** El espectro de absorción se estudió en detalle por Yun y Park<sup>106</sup> para diferentes concentraciones de *Chlorella vulgaris* donde se encontró que para una concentración inferior a 0,217 kg/m<sup>3</sup> el espectro de absorción se vuelve casi horizontal y que a su vez logra una mayor absorción a concentraciones de 1,71 kg/m<sup>3</sup>. Como consecuencia, este intervalo será tomado en cuenta para las concentraciones iniciales suministradas en el modelo.

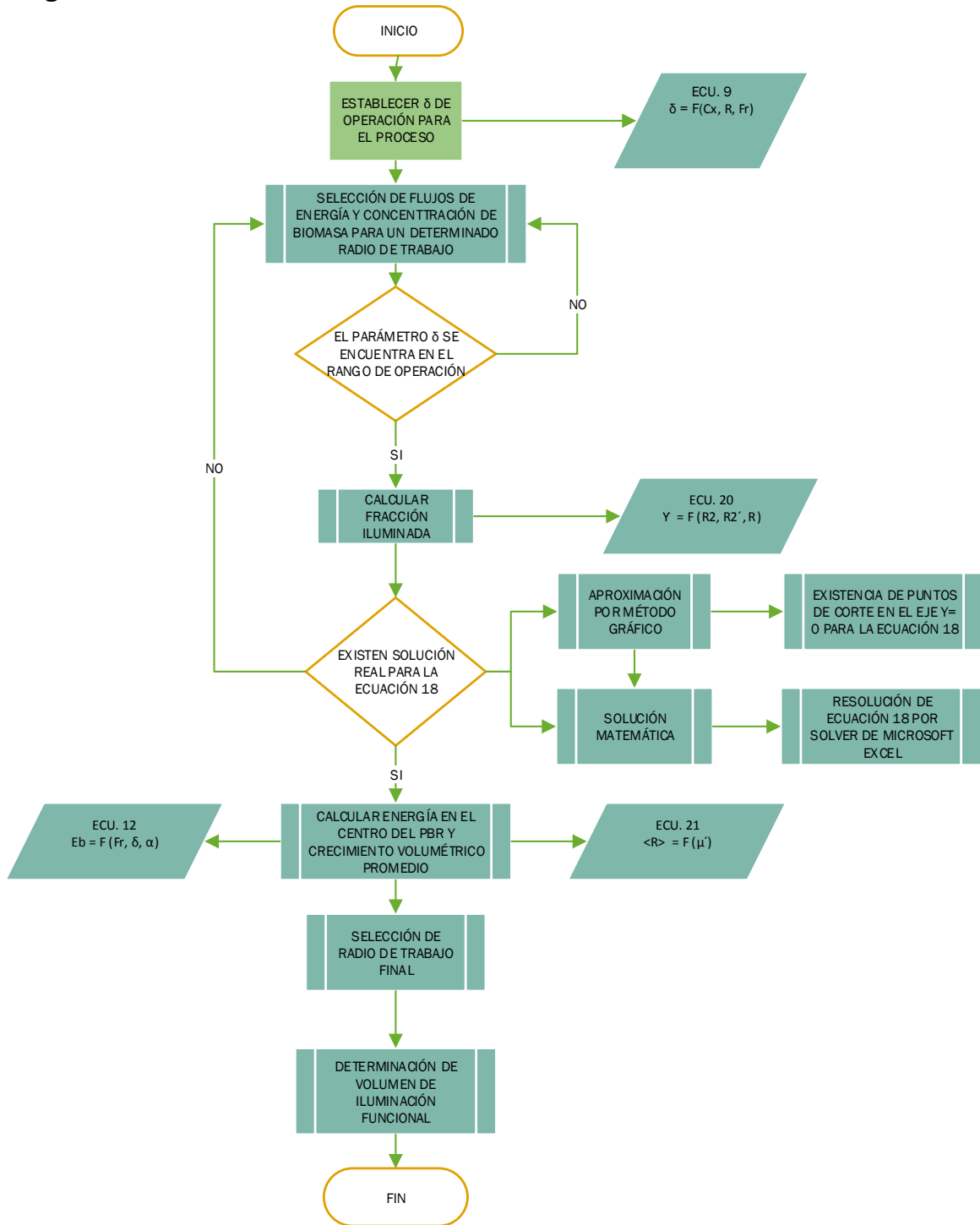
## **4.5 SIMULACIÓN**

**4.5.1 Diagrama de flujo para la simulación.** Para los procesos de simulación y análisis del modelo seleccionado se utilizó el software Microsoft Excel. Se seguirá el siguiente diagrama de flujo como secuencia para la realización de la simulación:

---

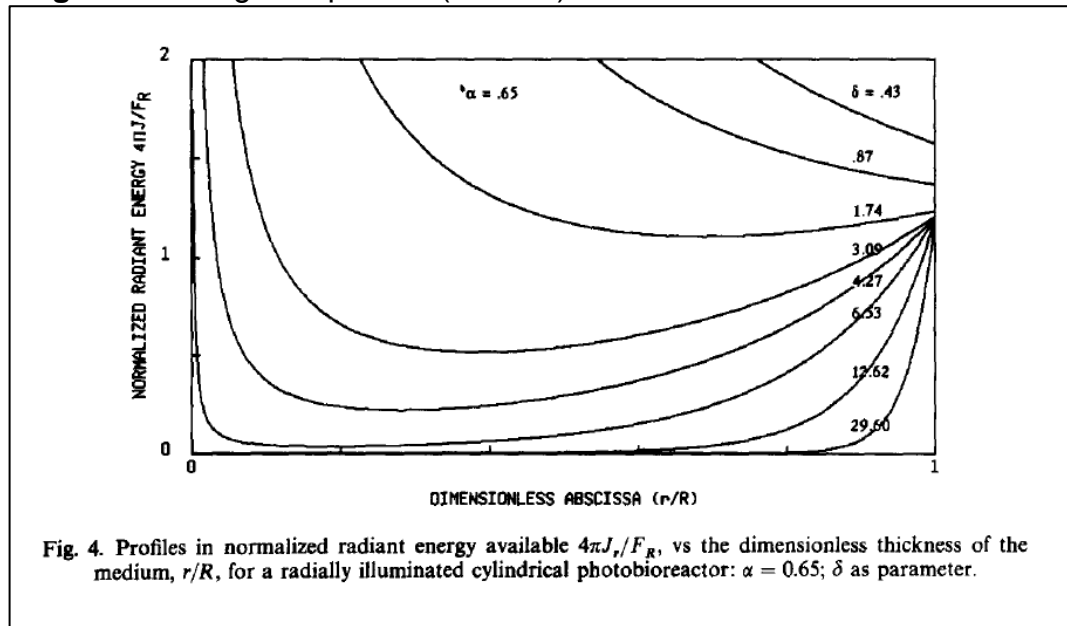
<sup>106</sup> YUN,Y-S y PARK,J. Attenuation of monochromatic and polychromatic lights in *Chlorella vulgaris* suspensions. En: Applied Microbiology and Biotechnology. vol. 55, no. 6, p. 765-770

Diagrama 1. Proceso de simulación



**4.5.2 Determinación de  $\delta$  para el proceso.** El modelo de Cornet muestra para una geometría cilíndrica el comportamiento de  $4\pi J_r/F_R$  Vs  $Z$  usando la Ecuación 17, 18, 19, 20 variando el parámetro  $\delta$  para el microorganismo empleado.

**Figura 5.** Energía disponible ( $4\pi J_r/F_r$ ) Vs  $Z$

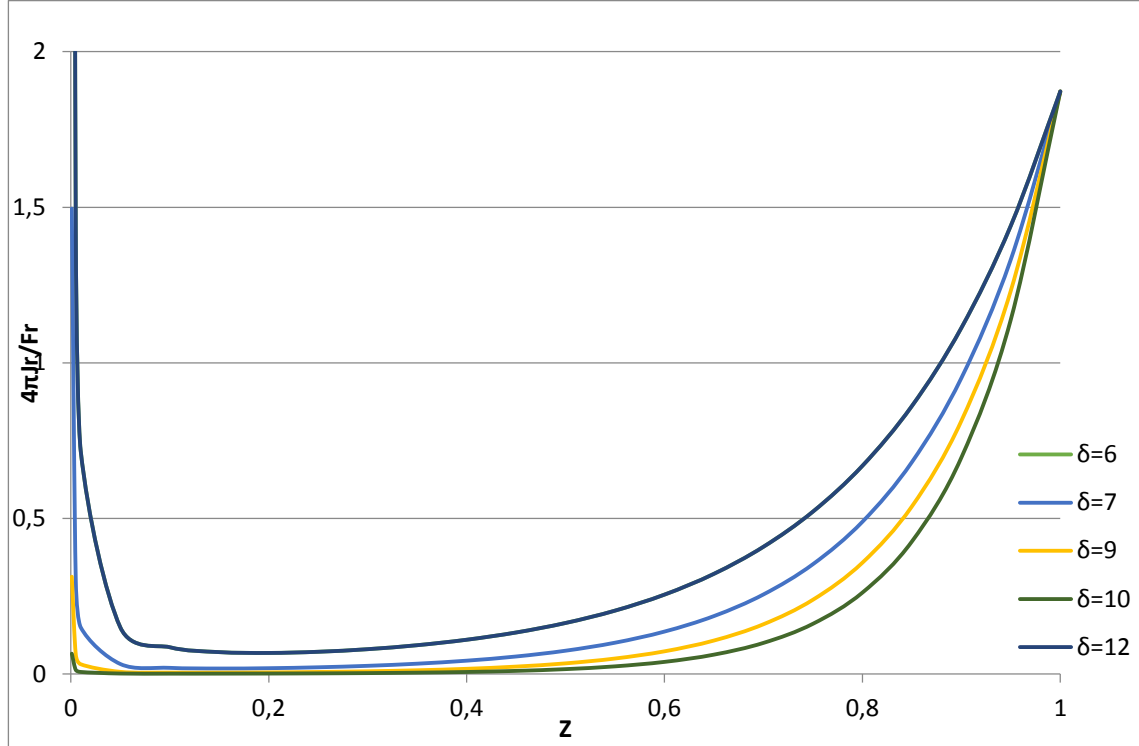


Fuente: (Cornet et al. 1995)

Se realizó esta gráfica para la *Chlorella vulgaris*, a partir de dichas ecuaciones, con el fin de determinar los rangos de  $\delta$  en el cual el modelo es reproducible.



**Gráfica 1.** Energía disponible ( $4\pi J_r/F_r$ ) Vs Z para *Chlorella vulgaris*



La grafica anterior muestra que el modelo funciona para  $\delta$  entre 6 y 12, rangos cercanos a los empleados en el artículo de Cornet, ya que los microorganismos poseen características fisiológicas similares. El parámetro  $\delta$  depende de la concentración inicial de biomasa y del radio del reactor empleado, así como de los coeficientes de absorción y dispersión del microorganismo en particular.

Para valores bajos de  $\delta$  (bajas concentraciones de biomasa), la energía disponible desde la pared se concentra en el centro del reactor, esta es una característica de fotobiorreactores cilíndricos radialmente iluminados. Para altas concentraciones de biomasa, los perfiles disminuyen excepto cerca del centro del reactor ( $r = 0$ ) donde  $4\pi J_r$  tiende a ser infinito. Debe tenerse en cuenta que para valores intermedios de  $\delta$ , los perfiles de energía radiante disponible están en una fase de disminución, luego en una fase cada vez mayor cuando se aproxima el centro del reactor<sup>107</sup>.

**4.5.3 Uso del método numérico de Simpson.** Las ecuaciones que involucran integrales se resolvieron por medio del método numérico denominado regla de Simpson 1/3. Para ello, se utiliza la ecuación de *Bessel* descrita en el modelo y se

<sup>107</sup> CORNET, J-F, et al. A Simplified Monodimensional Approach for Modeling Coupling between Radiant Light Transfer and Growth Kinetics in Photobioreactors. [Print(0)]: Elsevier, 1995. p. 1489-1500

toma como referencia las tablas de *Bessel* como comparación de los datos generados.

**Ecuación 38.** Integral de Simpson 1/3

$$I \cong (b - a) \frac{f x_0 + 4 \sum_{i=1,3,5} f x_i + 2 \sum_{j=2,4,6} f x_j + f x_n}{3n}$$

Dónde:

- b: Límite superior
- a: Límite inferior
- n: Divisiones
- h: Paso de la integral [h=(b-a)/n]

Las herramientas usadas permiten aproximarse a una solución analítica y numérica del comportamiento de la luz entre el reactor y el microorganismo.

**4.5.4 Uso paralelo de método gráfico y solución por complemento SOLVER.**

Para determinar el rango de operación de  $\delta$  (delta) se hará una variación de los parámetros de concentraciones de biomasa, energía suministrada y radio del reactor dentro de los rangos determinados en la búsqueda bibliográfica previa.

Esto se realizará con el uso de un método gráfico para determinar si existe o no solución para los valores escogidos para dichos parámetros, y en caso de obtener una solución real donde el modelo sea válido para la *Chlorella vulgaris* permitiendo resultados verídicos en el desarrollo del mismo, se procederá al uso del complemento SOLVER del software utilizando como valor inicial de iteración el resultante del método gráfico, para así obtener una solución real más exacta de dicho parámetro.

**4.5.5 Determinación de la fracción iluminada.** La fracción iluminada descrita en la **Ecuación 29** determina los radios de trabajo iluminado para un radio seleccionado. La ecuación genera dos raíces que para el programa empleado se deben dar puntos cercanos a estas, para generar la solución igual a cero. Se usó un método gráfico para obtener los puntos cercanos a las raíces y el complemento SOLVER de Microsoft Excel para obtener el punto más preciso.

El valor de la fracción iluminada no solo es importante para determinar el volumen iluminado sino también para hallar el crecimiento volumétrico promedio para el diámetro que se pretende llegar a escalar.

**4.5.6 Determinación de la energía lumínica disponible en el centro del reactor.**

La energía disponible en el centro del reactor esta descrita por la Ecuación 23, esta involucra una función de Bessel para la relación  $\delta \cdot Z_b > 1$ . A modo de ejemplo se hizo una tabla en la cual se aplicó la ecuación para diferentes concentraciones con el diámetro del diseño base 0,114 metros y un flujo de 100

$W/m^2$ . Los colores amarillo y café denotan la concentración de biomasa que influye en el cambio de  $\delta^*Z_b > 1$ , los valores de 0,3 y 0,32  $kg/m^3$  marcan el cambio de la Ecuación 23 a 26 como función de Bessel de orden cero usando la Ecuación 25.

La **Tabla 5** muestra como a medida que la concentración de biomasa aumenta es menor la energía disponible en el centro del reactor, lo que corrobora la teoría de mayor biomasa más zonas oscuras en el volumen del reactor, alcanzando un valor cercano al punto de compensación mínimo a una concentración de biomasa de 0,42  $kg/m^3$  ocasionando una deficiencia energética para el alga a un flujo de energía de 100  $W/m^2$ .

**Tabla 5.** Cuantificación energía disponible en el centro del PFR (Eb)

X	$\delta$	$\delta^*Z_b$	$lo(\delta^*Z_b)$	Eb/Fr	Eb
0,02	0,357	0,063	1,001	16,46	1646
0,04	0,714	0,125	1,004	13,63	1363
0,06	1,071	0,188	1,009	10,52	1052
0,08	1,427	0,250	1,016	7,779	778
0,1	1,784	0,313	1,024	5,629	562,9
0,12	2,141	0,376	1,035	4,030	403,0
0,14	2,498	0,438	1,048	2,873	287,3
0,16	2,855	0,501	1,063	2,045	204,5
0,18	3,212	0,563	1,079	1,456	145,6
0,2	3,568	0,626	1,098	1,037	103,7
0,22	3,925	0,689	1,119	0,740	73,99
0,23	4,104	0,720	1,130	0,625	62,51
0,25	4,460	0,783	1,153	0,447	44,67
0,27	4,817	0,845	1,179	0,320	31,96
0,3	5,353	0,939	1,220	0,194	19,38
0,32	5,709	1,002	0,764	0,085	8,495
0,34	6,066	1,064	0,736	0,057	5,726
0,36	6,423	1,127	0,707	0,038	3,848
0,38	6,780	1,189	0,676	0,026	2,577
0,4	7,137	1,252	0,645	0,017	1,719
0,42	7,494	1,315	0,612	0,011	1,143
0,5	8,921	1,565	0,475	2,13E-03	0,213
0,7	12,49	2,191	0,115	1,46E-05	1,46E-03
1,5	26,76	4,695	0,271	2,16E-11	2,16E-09
2	35,68	6,260	0,215	2,30E-15	2,30E-13
2,5	44,60	7,825	0,210	3,00E-19	3,00E-17
3	53,53	9,390	0,168	3,20E-23	3,20E-21
3,5	62,45	10,96	0,178	4,52E-27	4,52E-25
4	71,37	12,52	11,17	3,79E-29	3,79E-27

**4.5.7 Datos de las variables para los radios seleccionados.** Los datos iniciales de diámetro del downcomer, flujo de energía suministrada, concentración inicial de biomasa simulados cumplen con las referencias tomadas. La relación de  $A_r/A_d$  se toma como la misma para satisfacer los requerimientos del diseño base, así como los rangos recomendados para el diámetro del riser, volumen y altura de operación.

**Tabla 6.** Resultados simulación diámetro 0,114 metros

<b>D = 0,114 m</b>					
<b>Cx (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>F (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>A (W/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Eb (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Y</b>	<b>&lt;R&gt; (kg/m<sup>3</sup>h)</b>
<b>0,25</b>	2	4,49	4,47E-1	67,12%	5,24E-4
<b>0,5</b>	12	53,9	2,55E-2	64,90%	7,64E-4
<b>0,5</b>	50	224,5	1,06E-1	85,34%	1,20E-3
<b>0,5</b>	100	449,1	2,13E-1	93,43%	1,39E-3
<b>0,7</b>	200	673,6	2,18E-3	75,82%	1,13E-3
<b>0,7</b>	200	1347,2	4,37E-3	81,98%	1,27E-3

La realización de la simulación para el diseño base indica una concentración inicial de operación de 0,25; 0,5 y 0,7 kg/m<sup>3</sup> con el subsecuente aumento de la energía suministrada al fotobiorreactor para cumplir los requerimientos energéticos del microorganismo. Se observa como a medida que aumenta la concentración de biomasa es necesario suministrar más energía para lograr un incremento en la fracción iluminada y en el crecimiento volumétrico algal. Se resalta el hecho de que para la energía suministrada en el diseño de Sierra y Ruiz es muy pequeño ya que solo alcanza una fracción iluminada del 64,90% y un crecimiento algal de  $7,64 \times 10^{-4}$ .

**Tabla 7.** Resultados simulación diámetro 0,16 metros

<b>D=0,16 m</b>					
<b>Cx (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>F (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>A (W/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Eb (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Y</b>	<b>&lt;R&gt; (kg/m<sup>3</sup>h)</b>
<b>0,4</b>	100	320,0	1,35E-1	85,49%	1,26E-3
<b>0,4</b>	200	639,9	2,71E-1	92,20%	1,42E-3
<b>0,5</b>	200	639,9	1,63E-2	78,31%	1,19E-3
<b>0,5</b>	300	959,9	2,45E-2	81,83%	1,27E-3

**Tabla 8.** Resultados simulación diámetro 0,22 metros

D=0,22 m					
Cx (kg/m <sup>3</sup> )	F (W/m <sup>2</sup> )	A (W/m <sup>3</sup> )	Eb (W/m <sup>2</sup> )	Y	<R> (kg/m <sup>3</sup> h)
0,27	150	349,1	1,05	94,70%	1,45E-3
0,27	200	465,4	1,40	98,46%	1,52E-3
0,3	200	465,4	5,16E-1	90,20%	1,39E-3
0,3	300	698,1	2,10	93,71%	1,47E-3

Para los diámetros de 0,16 y 0,22 metros las concentraciones de biomasa que validan el modelo de  $\delta$  entre 6 y 12 disminuyen respecto al diseño base, pero siguen estando entre el criterio de la concentración de biomasa descrito anteriormente. Los resultados muestran que se pueden mantener crecimientos volumétricos mayores al diseño base si se aumenta la energía lo suficiente como para no inhibir al alga.

La energía absorbida tiene una mayor dependencia de la concentración inicial que de la energía suministrada, ya que como se observa se genera la misma cantidad de energía absorbida de 465,4 W/m<sup>2</sup> (0,22 m) y 639,9 W/m<sup>2</sup> (0,16 m) para el mismo flujo de energía, pero con diferente concentración inicial de 0,4; 0,5 kg/m<sup>3</sup> y 0,25; 0,3 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. La diferencia radica en la energía disponible en el centro del reactor y la fracción iluminada que como es de esperarse disminuye al aumentar la concentración inicial ya que el requerimiento energético aumenta para satisfacer la demanda del microorganismo y la densidad algal puede generar más acumulación en las paredes del fotobiorreactor impidiendo la adecuada distribución de energía.

**4.5.8 Volumen final de reactor.** Teniendo en cuenta la menor cantidad de energía que se le puede suministrar al reactor para obtener el mayor valor posible de crecimiento volumétrico promedio se selecciona el diámetro de 0,22 metros que llega a valores cercanos a los criterios mencionados en la selección de la metodología. Usando las **Ecuaciones 33 a 36** se determinan las dimensiones del fotobiorreactor.

**Cuadro 8.** Resultados volumen escalado

Descripción	Nomenclatura	Unidades	Valor
Diámetro del Riser	Dr	M	1,41E-1
Diámetro del Down - Comer	Dd	M	2,20E-1
Área del Riser	Ar	M	1,56E-2
Área del Down – Comer	Ad	M	3,80E-2
Altura	H	M	1,32
Altura de Operación	Hop	M	1,06
Volumen Total	Vt	L	50,2
Volumen de Operación	Vop	L	40,1
Ar/Ad	-	-	0,41
Fracción iluminada	Y	-	98,46%
Crecimiento Volumétrico Promedio	<R>	kg/m <sup>3</sup> h	1,52E-3

Se logra un incremento del volumen de 7 a 50,2 litros alcanzando un crecimiento volumétrico de  $1,52 \times 10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup>h, el cual es mayor al simulado para el diseño base de  $7,64 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup>h. La cantidad de luz suministrada en relación con la usada para el diseño base (4 tiras de LED rojo 12V, irradiación de 3,02 W/m<sup>2</sup>/tira de LED) es de 62,5 que para términos prácticos serían 63 tiras de LED rojo 12V.

## 5. SISTEMAS DE MONITOREO Y CONTROL PARA EL FOTOBIORREACTOR

### 5.1 DETERMINACIÓN DE RANGOS RECOMENDADOS PARA LAS VARIABLES DE CONTROL

Partiendo de la información recolectada en el marco teórico acerca del comportamiento de la microalga junto con investigaciones afines a la especie de microalga *Chlorella vulgaris* en múltiples condiciones de operación, se plantean los siguientes rangos de operación para las diversas variables de control como temperatura, pH, salinidad, luz, entre otros.

**Cuadro 5.** Rangos de operación recomendados

VARIABLE DE CONTROL	RANGO DE OPERACIÓN
Temperatura	25°C – 36°C
pH	7.0 – 7.5
Salinidad	0.2 M – 0.3 M (NaCl)
Luz	650 – 22.200 Lux
Presión	≤ 2 bar
Velocidad de Aire Suministrado	0.1 – 0.4 vvm

Los rangos de operación de las variables de temperatura, pH, salinidad y luz están fundamentados en la investigación realizada en el primer capítulo sobre la microalga objeto de estudio *Chlorella vulgaris* en la sección de parámetros de cultivo. El valor de presión sugerido se fundamenta en los resultados obtenidos en el trabajo de Ruíz, Sierra<sup>108</sup> acerca de esta variable. El rango de la velocidad del aire suministrado se basa en un estudio afín realizado por otro autor acerca de la eficiencia de transferencia de masa para la microalga *Chlorella vulgaris*<sup>109</sup>.

### 5.2 DIAGRAMA P&ID PARA LOS SISTEMAS DE MONITOREO Y CONTROL DEL FOTOBIORREACTOR

Haciendo uso de los conocimientos adquiridos por los autores acerca de la instrumentación y control de procesos se realizará un esquema de monitoreo y control para múltiples variables del fotobiorreactor, siguiendo una de las normativas más utilizadas en dicho campo, como lo es la Norma ISA (*Instrument Society of America*) S 5.1.

<sup>108</sup> RUIZ FONSECA, Steven; SIERRA HERRERA, Jennifer Alexandra y RUBIO, Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo Y Generación De Biomasa. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.

<sup>109</sup> RYU, Hyun Jin; OH, Kyeong Keun y KIM, Young Soo. Optimization of the influential factors for the improvement of CO<sub>2</sub> utilization efficiency and CO<sub>2</sub> mass transfer rate. En: JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY. vol. 15, no. 4, p. 471-475

**5.2.1 Normativa de Instrumentación para Diagrama P&ID.** Tomado como base sistemática en el campo industrial a la Norma ISA 5.1 para la elaboración de diagramas P&ID, por medio de la adopción de sus preceptos de siglas, representación instrumental, entre otros, se realizó el diagrama P&ID para el presente proyecto que se encuentra en la sección de Anexos (Anexo B). A continuación, se presenta una tabla con los significados de las letras de identificación de dicha normativa:

**Cuadro 60.** Significados de las letras de identificación

Primera Letra		Letras Sucesivas			
Variable medida	Letra de modificación	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de modificación	
<b>A</b>	Análisis		Alarma		
<b>B</b>	Llama (quemador)		Libre	Libre	Libre
<b>C</b>	Conductividad			Control	
<b>D</b>	Densidad o peso específico	Diferencial			
<b>E</b>	Tensión		Elemento Primario		
<b>F</b>	Caudal	Relación			
<b>G</b>	Calibre		Vidrio		
<b>H</b>	Manual				Alto
<b>I</b>	Corriente eléctrica		Indicación o indicador		
<b>J</b>	Potencia	Exploración			
<b>K</b>	Tiempo			Estación de control	
<b>L</b>	Nivel		Luz piloto		Bajo
<b>M</b>	Humedad				Medio o intermedio
<b>N</b>	Libre		Libre	Libre	Libre
<b>O</b>	Libre		Orificio		
<b>P</b>	Presión o vacío		Punto de prueba		
<b>Q</b>	Cantidad	Integración			
<b>R</b>	Radiactividad		Registro		
<b>S</b>	Velocidad o frecuencia	Seguridad		Interruptor	
<b>T</b>	Temperatura			Transmisión o transmisor	
<b>U</b>	Multivariable		Multifunción	Multifunción	Multifunción
<b>V</b>	Viscosidad			Válvula	
<b>W</b>	Peso o fuerza		Vaina		



**Cuadro 10.** (Continuación)

Primera Letra		Letras Sucesivas		
Variable medida	Letra de modificación	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de modificación
X	Sin clasificar		Sin clasificar	Sin clasificar
Y	Libre		Relé o computador	
Z	Posición		Elemento final de control sin clasificar	

Fuente: Norma ISA S 5.1 (Instrument Society of America)

**5.2.2 Nomenclatura asociada al sistema de monitoreo y control.** Con el fin de facilitar un poco la comprensión del sistema de monitoreo y control propuesto para el fotobiorreactor, a continuación, se muestra una tabla con la simbología de los instrumentos correspondientes al diagrama P&ID.

**Cuadro 11.** Nomenclatura de instrumentos

SIMBOLOGÍA DEL INSTRUMENTO	INSTRUMENTO
NT 100	Transmisor de Intensidad lumínica
NIC 100	Controlador de Intensidad Lumínica con indicador
TT 101	Transmisor de Temperatura
TIC 101	Controlador de Temperatura con indicador
TZ 100/101	Arreglo Lumínico
UY 101	Convertidor Multivariable
AIR 103	Analizador químico de pH con indicador y registrador
IR 104	Analizador químico de salinidad con indicador y registrador
LG 105	Indicador de nivel
LIT 105	Transmisor de nivel con indicador
LAH 105	Alarma de nivel alto
LAL 105	Alarma de nivel bajo
PT 106	Transmisor de presión

**Cuadro 71.** Continuación.

<b>SIMBOLOGÍA DEL INTRUMENTO</b>	<b>INTRUMENTO</b>
<b>PIC 106</b>	Controlador de presión con indicador
<b>PY 106</b>	Convertidor de presión
<b>PCV – 106</b>	Válvula de control de presión
<b>V – 6</b>	Válvula de seguridad
<b>C – 1</b>	Compresor de suministro de aire

**5.2.3 Descripción de los sistemas de monitoreo y control del fotobiorreactor planteados a través del Diagrama P&ID.** En dicho diagrama de instrumentación y control (P&ID) se sugiere un lazo de control para la temperatura y otro para la intensidad lumínica, los cuales están interrelacionados debido a la fuerte dependencia de la temperatura con respecto a la luz, que como se sabe es la mayor fuente de energía para la microalga.

Igualmente se propone un lazo de control para la presión, con el fin de que se regule la presión teniendo en cuenta la cantidad de aire suministrado, también se expone una válvula de alivio, con el fin de garantizar mayor seguridad en el reactor.

Por otro lado, se establece un lazo de control abierto para el nivel que incorpora además alarmas de nivel bajo y nivel alto, con el objeto de mantener el volumen de operación en el fotobiorreactor.

Finalmente se sugiere el uso de dos analizadores químicos para las variables de pH y salinidad, respectivamente. Debido al carácter de reactor continuo, estas variables no se pueden regular con la inclusión de corrientes de ácidos, bases y sales. Como enfoque alternativo se propone que dichos indicadores posean registradores, con el fin de poder analizar la variabilidad de estos parámetros posterior a la finalización del lote, por medio de los datos recopilados en dichos instrumentos, lo cual puede conllevar a mejoras progresivas en el desarrollo de lotes futuros con condiciones similares.

### **5.3 ESQUEMA DE VISTA DEL FOTOBIORREACTOR**

A partir del volumen determinado en el modelo anteriormente descrito junto con los diámetros y alturas correspondientes se realizará un esquema de vistas del fotobiorreactor a través del uso de un programa de frecuente aplicación en ingeniería denominado Solid Edge que entre sus múltiples aplicaciones cuenta la representación de diversas geometrías en diversos tamaños.

El esquema de vista del fotobiorreactor que se puede observar en la sección de Anexos (Anexo B), este contempla de forma gráfica partir los diámetros y alturas correspondientes del volumen determinado en el modelo previo.

**5.3.1 Descripción del esquema de vista.** Como se puede observar, allí se evidencia la diferencia de los diámetros, alturas y volúmenes entre el diseño base y el fotobiorreactor escalado. Las líneas continuas denotan las visualizaciones externas y las líneas punteadas hacen referencias a las visuales internas. Se consideró un espesor del material de 5 mm para efectos ilustrativos de los planos, lo cual explica entre otras cosas la diferencia de magnitud en la altura de 1,32 m y 1,33 m en la vista frontal e isométrica del fotobiorreactor escalado, respectivamente. Por consiguiente, dicho espesor de las láminas usadas para el fotobiorreactor puede cambiar al momento de la implementación física del mismo.

Otra cuestión a considerar, es la diferencia de unidades en las dimensiones de los fotobiorreactores en la vista superior, esto se debe a que al momento de cargar los diámetros en el software se introdujeron los diámetros del diseño base en metros, mientras que los diámetros del fotobiorreactor escalado se introdujeron en milímetros, lo que explica la diferencia tan notable en las magnitudes de los diámetros de dos equipos. Sin embargo, esto no tiene ninguna repercusión en los planos, puesto que las dimensiones se introdujeron correctamente de acuerdo con los resultados obtenidos, independientemente de las unidades utilizadas. Pese a ello, con el fin de evitar confusiones, posteriormente las unidades de ambos fotobiorreactores se establecieron en metros, como se puede apreciar en las vistas subsecuentes a esta.

## 6. CONCLUSIONES

- El sustrato residual industrial seleccionado fue el emitido por la industria de Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos a través de un conjunto de matrices que tuvieron en cuenta los diferentes contaminantes de control en múltiples actividades industriales. Los resultados son coherentes con otras investigaciones recientes realizadas sobre el tema, que corroboran la factibilidad del uso de este tipo de residual industrial para la mitigación de contaminantes y la disminución de costos de la biomasa microalgal.
- El modelo de escalamiento seleccionado se fundamentó en el fenómeno de la dispersión y absorción de luz acoplado al crecimiento microalgal dentro del fotobiorreactor a través de ecuaciones de balance simplificadas para la determinación de un volumen operacional, que constituyó la variable a dimensionar para lograr el escalamiento.
- Se alcanzó un escalamiento del fotobiorreactor de 7 litros a 50,2 litros, que equivale a un aumento en su capacidad volumétrica de 7,2 veces aproximadamente, al igual que un crecimiento volumétrico de  $1,52 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3\text{h}$  en el fotobiorreactor, todo ello a partir del modelo de escalamiento desarrollado. Dicho valor de crecimiento volumétrico supera el crecimiento simulado para el fotobiorreactor de escala inferior tomado como diseño base, equivalente a  $7,64 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3\text{h}$  empleado como punto de referencia para el escalamiento.
- Se planteó un sistema de monitoreo y control para el fotobiorreactor escalado, el cual contempla lazos de control abiertos y cerrados para los parámetros de salinidad, pH, presión, suministro de aire, temperatura e intensidad lumínica, junto con los planos preliminares del equipo y algunos instrumentos para la implementación física de dicho sistema, lo que constituye un escalado de enfoque ingenieril.

## 7. RECOMENDACIONES

- Este proyecto realizó la selección de potenciales sustratos para la microalga *Chlorella vulgaris* a través de una metodología de matrices con criterios basados en los contaminantes de control de los posibles sustratos y la caracterización de la microalga. Sin embargo, la implementación de este sustrato a nivel físico debe tener en cuenta la disponibilidad y la facilidad de transporte del sustrato por medio de la asociación con alguna industria dedicada a esta actividad que suministre el residuo industrial y de ser posible la caracterización del mismo, como ya lo han realizado algunas investigaciones en este campo.
- Es importante resaltar que este proyecto realizó la selección del método, la variable y el modelo de escalamiento a partir de la información disponible del diseño base y como resultado de una búsqueda de estudios y fundamentos teóricos sobre el tema, para el posterior análisis por medio del cruce de información entre estos dos parámetros. Esa metodología debe ser repetida para cualquier proceso a escalar, con el fin de evitar inconvenientes en el desarrollo del escalamiento y garantizar un proceso de escalamiento efectivo de acuerdo a las condiciones y restricciones del mismo, de igual manera se sugiere la implementación de factores como la hidrodinámica en futuros proyectos asociados al presente trabajo.
- En este proyecto se utilizó el volumen como variable a dimensionar para el escalamiento del fotobiorreactor, sin embargo, existen otras maneras igualmente adecuadas para su reproducción a escala piloto. Un ejemplo de ello es el aumento del volumen de los reactores por medio de la construcción de diversos cilindros del mismo diámetro, en lugar de aumentar el diámetro de los cilindros. Este método también permite mantener una iluminación óptima en el reactor y por lo tanto proporciona adecuadas condiciones para el crecimiento de microorganismos fotosintéticos como las microalgas.
- Cabe destacar que aunque el presente proyecto propuso un sistema de monitoreo y control para el fotobiorreactor resultante del escalamiento realizado, este puede estar sujeto a modificaciones debido a sus implicaciones económicas y físicas. Incluso, la implementación de este sistema podría constituir el punto de partida de otro proyecto posterior en la misma línea de investigación.

## BIBLIOGRAFIA

ALONSO,Julio Ernesto Abalde, et al. Microalgas: Cultivo y Aplicaciones. Servicio de Publicaciones, 1995.

ALVEAR ZAPATA, Juan Felipe. Evaluación De La Disminución En La Concentración De CO2 Proveniente De Una Emisión Del Tratamiento Térmico De Residuos Mitigado Mediante El Uso De La Microalga *Chlorella vulgaris*. Fundación Universidad de América, 2016.

ANAYA-DURAND, Alejandro y PEDROZA-FLORES, Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. En: TECNOLOGÍA, CIENCIA, EDUCACIÓN. vol. 23, no. 001, p. 32

Aspectos Aplicados De La Biotecnología. México: Instituto Politécnico Nacional, 2010.

ASTROS FONSECA,Iván Rodrigo; NAVARRO GUTIÉRREZ,María Camila y PÁEZ MORALES,Adriana Inés. Evaluación Del Cambio En La Concentración De Dióxido De Carbono En Una Corriente De Gas Mediante El Uso De *Chlorella vulgaris*. Bogotá, D.C.: Fundación Universidad de América, 2012.

BARSANTI,Laura y GUALTIERI,Paolo. Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology. CRC press, 2014.

BROOKS,Geo. Jawetz, Melnick y Adelberg: Microbiología Médica (25a. McGraw Hill Mexico, 2011.

CHEN,Chun-Yen, et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 102, no. 1, p. 71-81

CHIU,Sheng-Yi, et al. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 102, no. 19, p. 9135-9142

CONVERTI,Attilio, et al. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. En: CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING: PROCESS INTENSIFICATION. vol. 48, no. 6, p. 1146-1151

CORAL CONTRERAS-FLORES,Julian, et al. AVANCES EN EL DISEÑO CONCEPTUAL DE FOTOBIORREACTORES PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS.

CORNET,JF, et al. A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: II. Identification of kinetic

parameters under light and mineral limitations. En: BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING. vol. 40, no. 7, p. 826-834

CORNET,JF; DUSSAP,CG y DUBERTRET,G. A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: I. Coupling between light transfer and growth kinetics. En: BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING. vol. 40, no. 7, p. 817-825

CORNET,J-F, et al. A simplified monodimensional approach for modeling coupling between radiant light transfer and growth kinetics in photobioreactors. En: CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE. vol. 50, no. 9, p. 1489-1500

DE PEÑA,Myriam. La biotecnología: fundamentos, aplicaciones y retos. 2006.

DE-BASHAN,Luz E., et al. Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. En: WATER RESEARCH. vol. 36, no. 12, p. 2941-2948

DOUSKOVA,I., et al. Simultaneous flue gas bioremediation and reduction of microalgal biomass production costs. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 82, no. 1, p. 179-185

FERNÁNDEZ-LINARES,Luis Carlos, et al. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. En: RA XIMHAI. vol. 8, no. 3,

Fundación para la Salud Geoambiental. Material Particulado. [Print(0)]. [Consultado el Marzo2016]. Disponible en: <http://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>

GARIBAY-HERNÁNDEZ,A., et al. Biodiesel a partir de microalgas. En: BioTecnología. vol. 13, no. 3, p. 38-61

GARRITY,George; BOONE,David R. y CASTENHOLZ,Richard W. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology: Volume One: The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria. Springer Science & Business Media, 2012.

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

HADJ-ROMDHANE,F., et al. Development and validation of a minimal growth medium for recycling *Chlorella vulgaris* culture. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 123, p. 366-374

HALL,DO. The production of biomass: a challenge to our society. En: HANDBOOK OF MICROALGAL MASS CULTURE.CRC PRESS, BOCA RATON, FLORIDA. p. 1-24

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Gregorio Alejandro y RUBIO, Diego. Evaluación De Las Incidencias De Salinidad y Ph Sobre La Biomasa, Productividad y Acumulación De Lípidos En Cultivos De *Chlorella vulgaris* En Un Fotobiorreactor De Placa Plana. Bogotá D:C: Fundación Universidad de América, 2014.

HO, Shih-Hsin, et al. Perspectives on microalgal CO<sub>2</sub>-emission mitigation systems—a review. En: BIOTECHNOLOGY ADVANCES. vol. 29, no. 2, p. 189-198

HUÉRFANO DELGADO, David Guillermo y ARTURO CALVACHE, Jaime Eduardo. Diseño y Simulación De Un Reactor Airlift Para La Producción De Alcohol Etilico Con *Saccharomyces Cerevisiae* Utilizando *Solanum Tuberosum*. Bogotá: Fundación Universidad de América, 2009.

Instituto para el Desarrollo Empresarial y Administrativo. Matriz De Selección. Herramientas De Calidad. [Print(0)]. [Consultado el Marzo 20162016]. Disponible en: [www.idea.edu.pe/herramientas/6taherramientadecalidadmatrizdeseleccion.doc](http://www.idea.edu.pe/herramientas/6taherramientadecalidadmatrizdeseleccion.doc)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. ICONTEC. NTC 1486. Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Bogotá, Colombia. 2008.

\_\_\_\_\_ NTC 5613. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. Bogotá, Colombia. 2008.

\_\_\_\_\_ NTC 4490. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. Bogotá: el instituto, 1998.

JU, L-K y CHASE, GG. Improved scale-up strategies of bioreactors. En: BIOPROCESS ENGINEERING. vol. 8, no. 1-2, p. 49-53

KEFFER, JE y KLEINHEINZ, GT. Use of *Chlorella vulgaris* for CO<sub>2</sub> mitigation in a photobioreactor. En: JOURNAL OF INDUSTRIAL MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 29, no. 5, p. 275-280

LAING, I. y AYALA, FRANCISCO. Commercial mass culture techniques for producing microalgae. En: INTRODUCTION TO APPLIED PHYCOLOGY, THE HAGUE, NETHERLANDS, SPB ACADEMIC PUBLISHING. p. 447-477



LEE,Choul-Gyun y PALSSON,Bernhard Ø. Photoacclimation of *Chlorella vulgaris* to red light from light-emitting diodes leads to autospore release following each cellular division. En: BIOTECHNOLOGY PROGRESS. vol. 12, no. 2, p. 249-256

LEE,Eunyoung; JALALIZADEH,Mehregan y ZHANG,Qiong. Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. En: ALGAL RESEARCH. vol. 12, p. 497-512

LEE,YK; TAN,HM y HEW,CS. The effect of growth temperature on the bioenergetics of photosynthetic algal cultures. En: BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING (USA).

LIPS,HS y AVISSAR,YJ. Photosynthesis and ultrastructure in microalgae. En: CRC HANDBOOK OF MICROALGAL CULTURE.CRC, BOCA RATON. p. 43-66

MANSA,Rachel Fran, et al. Design of a pilot scale outdoor photobioreactor for mass cultivation of local microalga. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND PHYSICAL SCIENCE. vol. 6, p. 348-352

MERCHUK,José C. Airlift Bioreactors: a Review of Recent Advances. En: CANADIAN JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING. vol. 81, no. 3/4, p. 324-337

MOLINA,E., et al. Scale-up of tubular photobioreactors. En: JOURNAL OF APPLIED PHYCOLOGY. vol. 12, no. 3-5, p. 355-368

MURPHY,Thomas E. y BERBEROĞLU,Halil. Effect of algae pigmentation on photobioreactor productivity and scale-up: a light transfer perspective. En: JOURNAL OF QUANTITATIVE SPECTROSCOPY AND RADIATIVE TRANSFER. vol. 112, no. 18, p. 2826-2834

Naciones Unidas (ONU). Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente. Realidades De Contaminantes: Contaminantes: Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs). [Print(0)]. [Consultado el Marzo2016]. Disponible en: [http://www.unep.org/tnt-unep/toolkit\\_esp/pollutants/vocs.html](http://www.unep.org/tnt-unep/toolkit_esp/pollutants/vocs.html)

NAJAFPOUR,GD. Biochemical Engineering and Biotechnology, 2007.

OOSTERHUIS,Nicolaas Marius Gerard. En: SCALE-UP OF BIOREACTORS: a SCALE-DOWN APPROACH.

POWELL,Erin E., et al. Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half cell. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 100, no. 1, p. 269-274

POWLES,Stephen B. Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. En: ANNUAL REVIEW OF PLANT PHYSIOLOGY. vol. 35, no. 1, p. 15-44

- RICHMOND, Amos. CRC Handbook of Microalgal Mass Culture. CRC press, 1986.
- RIVERO GONZÁLEZ, Roger Dennis; GÓMEZ LUNA, Liliana María y ÁLVAREZ HUBERT, Inaudis. Cultivo de *Chlorella vulgaris* sobre residuales industriales: una alternativa responsable y útil. En: Memorias del programa científico Universidad 2010. 201004.
- RODRIGUEZ, H. y GUERRERO, MG. Products and uses of cyanobacteria (blue-green algae). En: PROFILES ON BIOTECHNOLOGY. SANTIAGO, CHILE: UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA. p. 247-260
- RUIZ FONSECA, Steven; SIERRA HERRERA, Jennifer Alexandra y RUBIO, Diego. Evaluación De Un Fotobiorreactor a Escala Banco Para El Cultivo y Generación De Biomasa. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América, 2012.
- RYU, Hyun Jin; OH, Kyeong Keun y KIM, Young Soo. Optimization of the influential factors for the improvement of CO<sub>2</sub> utilization efficiency and CO<sub>2</sub> mass transfer rate. En: JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY. vol. 15, no. 4, p. 471-475
- SAFI, Carl, et al. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. En: RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. vol. 35, p. 265-278
- 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
- STEPHENS, Evan, et al. Future prospects of microalgal biofuel production systems. En: TRENDS IN PLANT SCIENCE. vol. 15, no. 10, p. 554-564
- SUH, In Soo y LEE, Choul-Gyun. Photobioreactor engineering: design and performance. En: BIOTECHNOLOGY AND BIOPROCESS ENGINEERING. vol. 8, no. 6, p. 313-321
- SUMI, Yoshihiko. Microalgae pioneering the future-application and utilization. En: LIFE SCIENCE RESEARCH UNIT, QUARTERLY REVIEW. no. 34,
- UGWU, CU; AOYAGI, H. y UCHIYAMA, H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 99, no. 10, p. 4021-4028
- VELÁSQUEZ, Alberto Séijas, et al. Escalamiento de fotobiorreactor solar secuestrante de CO<sub>2</sub> de gases de combustión optimizando producción de "espirulina". En: SCIÉENDO. vol. 15, no. 1,

VERNEREY,A., et al. Scale-Up and Design of a Pilot-Plant Photobioreactor for the Continuous Culture of *Spirulina platensis*. En: BIOTECHNOLOGY PROGRESS. vol. 17, no. 3, p. 431-438

WANG,Bei, et al. CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 79, no. 5, p. 707-718

XINYI,E. En: Nutrients Recycling Strategy For Microalgae-Based Co<sub>2</sub> Mitigation System.

YUN,Y-S y PARK,J. Attenuation of monochromatic and polychromatic lights in *Chlorella vulgaris* suspensions. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 55, no. 6, p. 765-770

ZHU,Xin-Guang; LONG,Stephen P. y ORT,Donald R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? En: CURRENT OPINION IN BIOTECHNOLOGY. vol. 19, no. 2, p. 153-159

ZIJFFERS,Jan-Willem F., et al. Design process of an area-efficient photobioreactor. En: MARINE BIOTECHNOLOGY. vol. 10, no. 4, p. 404-415

## **ANEXOS**

## ANEXO A MATRICES DE SELECCIÓN

### Anexo A 1 - Matriz Inicial o Primaria

CRITERIOS	Fuente de Nitrógeno (NOx - NH <sub>3</sub> )	Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	Compuestos Ácidos (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - HCl - HF - H <sub>2</sub> S)	Hidrocarburos y Compuestos Orgánicos Volátiles (HC - COV's)	Dioxinas y Furanos	Metales Pesados (Pb, Cu, Cd, Hg, entre otros)	Material Particulado (MP)	SUMATORIA POR CRITERIO	FACTOR DE PONDERACIÓN (FP)
Fuente de Nitrógeno (NOx - NH <sub>3</sub> )		5,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	55,00	0,32
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	0,20		10,00	10,00	10,00	5,00	10,00	45,20	0,27
Compuestos Ácidos (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - HCl - HF - H <sub>2</sub> S)	0,10	0,10		0,20	0,20	0,10	0,20	0,90	0,01
Hidrocarburos y Compuestos Orgánicos Volátiles (HC - COV's)	0,10	0,10	5,00		1,00	0,10	5,00	11,30	0,07
Dioxinas y Furanos	0,10	0,10	5,00	1,00		0,10	5,00	11,30	0,07
Metales Pesados (Pb, Cu, Cd, Hg, entre otros)	0,10	0,20	10,00	10,00	10,00		10,00	40,30	0,24
Material Particulado (MP)	0,10	0,10	5,00	0,20	0,20	0,10		5,70	0,03
<b>SUMATORIA TOTAL</b>								169,7	

### Anexo A 2 - Matriz Secundaria - Criterio de Fuente de Nitrógeno (NOx - NH3)

ACTIVIDAD		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMATORIA POR OPCION DE SUSTRATO	PESO DE LA OPCION (PO)
1	Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético		1,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	1,00	5,00	31,00	0,13
2	Fundición de acero	1,00		5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	1,00	5,00	31,00	0,13
3	Fundición primaria de cobre	0,20	0,20		1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	0,20	1,00	5,40	0,02
4	Fundición de plomo	0,20	0,20	1,00		1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	0,20	1,00	5,40	0,02
5	Fundición de Zinc	0,20	0,20	1,00	1,00		0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	0,20	1,00	5,40	0,02
6	Galvanotecnia	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00		1,00	5,00	1,00	1,00	1,00	5,00	31,00	0,13
7	Hornos de fundición de vidrio	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	1,00		5,00	1,00	1,00	1,00	5,00	31,00	0,13
8	Producción de coque	0,20	0,20	1,00	1,00	1,00	0,20	0,20		0,20	0,20	0,20	1,00	5,40	0,02
9	Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00		1,00	1,00	5,00	31,00	0,13
10	Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00		1,00	5,00	31,00	0,13
11	Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00		5,00	31,00	0,13
12	Cremación de cadáveres en Hornos Crematorios	0,20	0,20	1,00	1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	0,20		5,40	0,02
<b>SUMATORIA TOTAL</b>														<b>244,00</b>	

### Anexo A 3 - Matriz Secundaria - Criterio de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

ACTIVIDAD		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMATORIA POR OPCION DE SUSTRATO	PESO DE LA OPCIÓN (PO)
1	Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
2	Fundición de acero	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
3	Fundición primaria de cobre	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
4	Fundición de plomo	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
5	Fundición de Zinc	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
6	Galvanotecnia	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
7	Hornos de fundición de vidrio	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
8	Producción de coque	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		5,00	1,00	1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
9	Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20		0,20	0,20	1,00	3,00	<b>0,02</b>
10	Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00		1,00	5,00	19,00	<b>0,10</b>
11	Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00		5,00	19,00	<b>0,10</b>
12	Cremación de cadáveres en Hornos Crematorios	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20		3,00	<b>0,02</b>
<b>SUMATORIA TOTAL</b>														<b>196,00</b>	

**Anexo A 4 - Matriz Secundaria - Criterio de Compuestos Ácidos (H2SO4 – HCl – HF - H2S)**

ACTIVIDAD		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMATORIA POR OPCION DE SUSTRATO	PESO DE LA OPCION (PO)
1	Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético		1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	27,00	0,11
2	Fundición de acero	1,00		1,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	27,00	0,11
3	Fundición primaria de cobre	1,00	1,00		1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	27,00	0,11
4	Fundición de plomo	1,00	1,00	1,00		1,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	27,00	0,11
5	Fundición de Zinc	1,00	1,00	1,00	1,00		5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	27,00	0,11
6	Galvanotecnia	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20		5,00	0,20	0,20	5,00	5,00	0,20	16,60	0,07
7	Hornos de fundición de vidrio	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20		0,20	0,20	1,00	1,00	0,20	3,80	0,02
8	Producción de coque	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	5,00		1,00	5,00	5,00	1,00	27,00	0,11
9	Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00		5,00	5,00	1,00	27,00	0,11
10	Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	1,00	0,20	0,20		1,00	0,20	3,70	0,02
11	Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	1,00	0,20	0,20	1,00		0,20	3,70	0,02
12	Cremación de cadáveres en Hornos Crematorios	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00		23,00	0,10
<b>SUMATORIA TOTAL</b>														<b>239,80</b>	



**Anexo A 5 - Matriz Secundaria - Criterio de Hidrocarburos y Compuestos Orgánicos Volátiles (HC - COV's)**

ACTIVIDAD		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMATORIA POR OPCION DE SUSTRATO	PESO DE LA OPCION (PO)
1	Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	39,00	0,15
2	Fundición de acero	0,20		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	7,00	0,03
3	Fundición primaria de cobre	0,20	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	7,00	0,03
4	Fundición de plomo	0,20	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	7,00	0,03
5	Fundición de Zinc	0,20	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	7,00	0,03
6	Galvanotecnia	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	7,00	0,03
7	Hornos de fundición de vidrio	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		0,20	0,20	1,00	0,20	0,20	7,00	0,03
8	Producción de coque	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00		1,00	5,00	1,00	1,00	39,00	0,15
9	Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00		5,00	1,00	1,00	39,00	0,15
10	Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	0,20		0,20	0,20	7,00	0,03
11	Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00		10,00	57,00	0,22
12	Cremación de cadáveres en Hornos Crematorios	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00		39,00	0,15
<b>SUMATORIA TOTAL</b>														<b>262,00</b>	

### Anexo A 6 - Matriz Secundaria - Criterio de Dioxinas y Furanos

ACTIVIDAD		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMATORIA POR OPCION DE SUSTRATO	PESO DE LA OPCION (PO)
1	Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético		0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	6,20	<b>0,03</b>
2	Fundición de acero	5,00		1,00	5,00	1,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	5,00	35,00	<b>0,14</b>
3	Fundición primaria de cobre	5,00	1,00		5,00	1,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	5,00	35,00	<b>0,14</b>
4	Fundición de plomo	1,00	0,20	0,20		0,20	1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	6,20	<b>0,03</b>
5	Fundición de Zinc	5,00	1,00	1,00	5,00		5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	5,00	35,00	<b>0,14</b>
6	Galvanotecnia	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20		1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	6,20	<b>0,03</b>
7	Hornos de fundición de vidrio	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	1,00		0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	6,20	<b>0,03</b>
8	Producción de coque	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	5,00	5,00		1,00	5,00	1,00	5,00	35,00	<b>0,14</b>
9	Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	5,00	5,00	1,00		5,00	1,00	5,00	35,00	<b>0,14</b>
10	Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	0,20	0,20		0,20	1,00	6,20	<b>0,03</b>
11	Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	5,00	1,00	1,00	5,00	1,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00		5,00	35,00	<b>0,14</b>
12	Cremación de cadáveres en Hornos Crematorios	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	0,20	0,20	1,00	0,20		6,20	<b>0,03</b>
<b>SUMATORIA TOTAL</b>														<b>247,20</b>	

**Anexo A 7 - Matriz Secundaria - Criterio de Metales Pesados (Pb, Cu, Cd, Hg, entre otros)**

ACTIVIDAD		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMATORIA POR OPCION DE SUSTRATO	PESO DE LA OPCION (PO)
1	Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético		1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
2	Fundición de acero	1,00		1,00	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
3	Fundición primaria de cobre	1,00	1,00		0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
4	Fundición de plomo	5,00	5,00	5,00		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	51,00	<b>0,22</b>
5	Fundición de Zinc	1,00	1,00	1,00	0,20		0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
6	Galvanotecnia	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	51,00	<b>0,22</b>
7	Hornos de fundición de vidrio	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20		1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
8	Producción de coque	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	1,00		1,00	1,00	0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
9	Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00		1,00	0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
10	Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00		0,20	1,00	8,60	<b>0,04</b>
11	Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00		5,00	51,00	<b>0,22</b>
12	Cremación de cadáveres en Hornos Crematorios	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20		8,60	<b>0,04</b>
<b>SUMATORIA TOTAL</b>														<b>230,40</b>	

### Anexo A 8 - Matriz Secundaria - Criterio de Material Particulado (MP)

ACTIVIDAD		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMATORIA POR OPCION DE SUSTRATO	PESO DE LA OPCION (PO)
1	Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
2	Fundición de acero	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
3	Fundición primaria de cobre	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
4	Fundición de plomo	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
5	Fundición de Zinc	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
6	Galvanotecnia	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20		0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	2,20	0,02
7	Hornos de fundición de vidrio	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
8	Producción de coque	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
9	Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	11,00	0,09
10	Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	11,00	0,09
11	Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	11,00	0,09
12	Cremación de cadáveres en Hornos Crematorios	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		11,00	0,09
<b>SUMATORIA TOTAL</b>														<b>123,20</b>	

### Anexo A 9 - Matriz Final De Selección

ACTIVIDAD	Fuente de Nitrógeno (NOx - NH3)	Dióxido de Azufre (SO2)	Compuestos Ácidos (H2SO4 – HCl – HF - H2S)	Hidrocarburos y Compuestos Orgánicos Volátiles (HC - COV's)	Dioxinas y Furanos	Metales Pesados (Pb, Cu, Cd, Hg, entre otros)	Material Particulado (MP)	PUNTAJE FINAL DE SUSTRATO
Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético	0,0412	0,0258	0,0006	0,0099	0,0017	0,0089	0,0030	<b>0,0910</b>
Fundición de acero	0,0412	0,0258	0,0006	0,0018	0,0094	0,0089	0,0030	<b>0,0907</b>
Fundición primaria de cobre	0,0072	0,0258	0,0006	0,0018	0,0094	0,0089	0,0030	<b>0,0567</b>
Fundición de plomo	0,0072	0,0258	0,0006	0,0018	0,0017	0,0526	0,0030	<b>0,0926</b>
Fundición de Zinc	0,0072	0,0258	0,0006	0,0018	0,0094	0,0089	0,0030	<b>0,0567</b>
Galvanotecnia	0,0412	0,0258	0,0004	0,0018	0,0017	0,0526	0,0006	<b>0,1240</b>
Hornos de fundición de vidrio	0,0412	0,0258	0,0001	0,0018	0,0017	0,0089	0,0030	<b>0,0824</b>
Producción de coque	0,0072	0,0258	0,0006	0,0099	0,0094	0,0089	0,0030	<b>0,0648</b>
Tostado de cascarilla de grano o material vegetal	0,0412	0,0041	0,0006	0,0099	0,0094	0,0089	0,0030	<b>0,0771</b>
Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	0,0412	0,0258	0,0001	0,0018	0,0017	0,0089	0,0030	<b>0,0824</b>
Tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos y no peligrosos	0,0412	0,0258	0,0001	0,0145	0,0094	0,0526	0,0030	<b>0,1466</b>

**ANEXO B**  
**MUESTRA DE CÁLCULO DE LAS ECUACIONES PARA LA SIMULACIÓN**

Datos		
<b>Fr</b>	200	W/m <sup>2</sup>
<b>Cx</b>	0,27	Kg/m <sup>3</sup>
<b>R</b>	0,11	M

**Ecuación 39.** Relación Ea y Es

$$\alpha = \sqrt{\frac{21,4}{21,4 + 4557}} = 0,068367551$$

**Ecuación 40.** Relación  $\alpha$  con características de operación

$$\delta = (21,4 + 4557) \times 0,068367551 \times 0,27 \times 0,11 = 9,296515601$$

**Ecuación 41.** Energía Absorbida

$$\langle A \rangle = \frac{2 \times 0,068367551 \times \sinh(9,296515601)}{\left(\frac{2 \times 200}{0,11}\right) \cosh(9,296515601) + (0,068367551 \times \sinh(9,296515601))}$$

$$\langle A \rangle = 465,4002653 \text{ W/m}^3$$

**Ecuación 42.** Energía radiante disponible

$$\frac{4\pi J_r}{200} = \frac{1}{Z \cosh(9,296515601) + (0,068367551 \times \sinh(9,296515601))} \times 2 \cosh(9,296515601 \times Z)$$

Dónde:

**Ecuación 43.** Abscisa al eje R

$$Z = \frac{r}{R}$$

Para cualquier punto de  $r=0,0055$  a  $R=0,11$ , energía radiante disponible:

Energía Disponible			
Z	R (m)	$4\pi Jr/Fr$	$4\pi Jr$ (W/m <sup>2</sup> )
0,05	0,0055	0,01	0,12
0,1	0,01	0,01	0,08
0,15	0,02	0,00	0,08
0,2	0,02	0,01	0,09
0,25	0,03	0,01	0,11
0,3	0,03	0,01	0,15
0,35	0,04	0,01	0,20
0,4	0,04	0,02	0,28
0,45	0,05	0,03	0,40
0,5	0,06	0,04	0,57
0,55	0,06	0,05	0,83
0,6	0,07	0,08	1,21
0,65	0,07	0,11	1,77
0,7	0,08	0,16	2,62
0,75	0,08	0,24	3,89
0,8	0,09	0,36	5,80
0,85	0,09	0,55	8,69
0,9	0,10	0,82	13,07
0,95	0,10	1,24	19,70
1	0,11	1,87	29,79

**Ecuación 44.** Energía disponible en el centro del reactor

$$\frac{E_b}{200} = \frac{1}{Z_b \cosh(9,296515601) + (0,068367551 \times \sinh(9,296515601))} [\pi I_0(\delta Z_b)]$$

Dónde:

**Ecuación 45.** Abscisa energía centro del reactor

$$Z_b = \frac{r_b}{R} = \frac{0,01}{0,11} = 0,090909091$$

Para el factor  $I_0(\delta Z_b)$  es una función de orden cero de Bessel explicada de la forma:

**Ecuación 46.** Función de Bessel

$$I_0(\delta Z_b) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\delta Z_b}{2}\right)^{2k}}{k! \Gamma(k+1)}$$

Para valores de  $I_0(\delta Z_b) < 1$ , concentraciones bajas de biomasa, se reduce a:

**Ecuación 47.** Simplificación energía centro del reactor

$$\frac{E_b}{F_R} = \frac{1}{Z_b} \frac{\pi}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} \left[ 1 + \left(\frac{\delta Z_b}{2}\right)^2 \right]$$

Se tabulo para diferentes concentraciones iniciales de biomasa, para efectos de la concentración seleccionada genera función de Bessel simplificada.



Energía Centro PFR					
Cxi	$\delta$	$\delta \cdot Z_b$	$l_0(\delta \cdot Z_b)$	Eb/Fr	Eb (W/m2)
0,02	0,69	0,06	1,00	26,66	5331,94
0,04	1,38	0,13	1,00	15,52	3104,47
0,06	2,07	0,19	1,01	8,15	1630,99
0,08	2,75	0,25	1,02	4,17	833,36
0,1	3,44	0,31	1,02	2,12	423,31
0,12	4,13	0,38	1,04	1,07	214,99
0,14	4,82	0,44	1,05	0,55	109,33
0,16	5,51	0,50	1,06	0,28	55,69
0,18	6,20	0,56	1,08	0,14	28,41
0,2	6,89	0,63	1,10	0,07	14,51
0,22	7,57	0,69	1,12	0,04	7,43
0,23	7,92	0,72	1,13	0,03	5,32
0,25	8,61	0,78	1,15	0,01	2,73
0,27	9,30	0,85	1,18	6,99E-03	1,39897442
0,3	10,33	0,94	1,22	2,58E-03	5,16E-01
0,32	11,02	1,00	0,76	8,11E-04	1,62E-01
0,34	11,71	1,06	0,74	3,92E-04	7,85E-02
0,36	12,40	1,13	0,71	1,89E-04	3,78E-02
0,38	13,08	1,19	0,68	9,09E-05	1,82E-02
0,4	13,77	1,25	0,64	4,35E-05	8,71E-03
0,42	14,46	1,31	0,61	2,08E-05	4,15E-03
0,5	17,22	1,57	0,48	1,03E-06	2,05E-04
0,7	24,10	2,19	0,12	2,54E-10	5,09E-08
1,5	51,65	4,70	0,27	6,50E-22	1,30E-19
2	68,86	6,26	0,22	1,73E-29	3,45E-27
2,5	86,08	7,83	0,21	5,63E-37	1,13E-34
3	103,29	9,39	0,17	1,50E-44	3,00E-42
3,5	120,51	10,96	0,18	5,29E-52	1,06E-49
4	137,73	12,52	11,17	1,11E-57	2,22E-55

**Ecuación 48.** Radio de trabajo iluminado

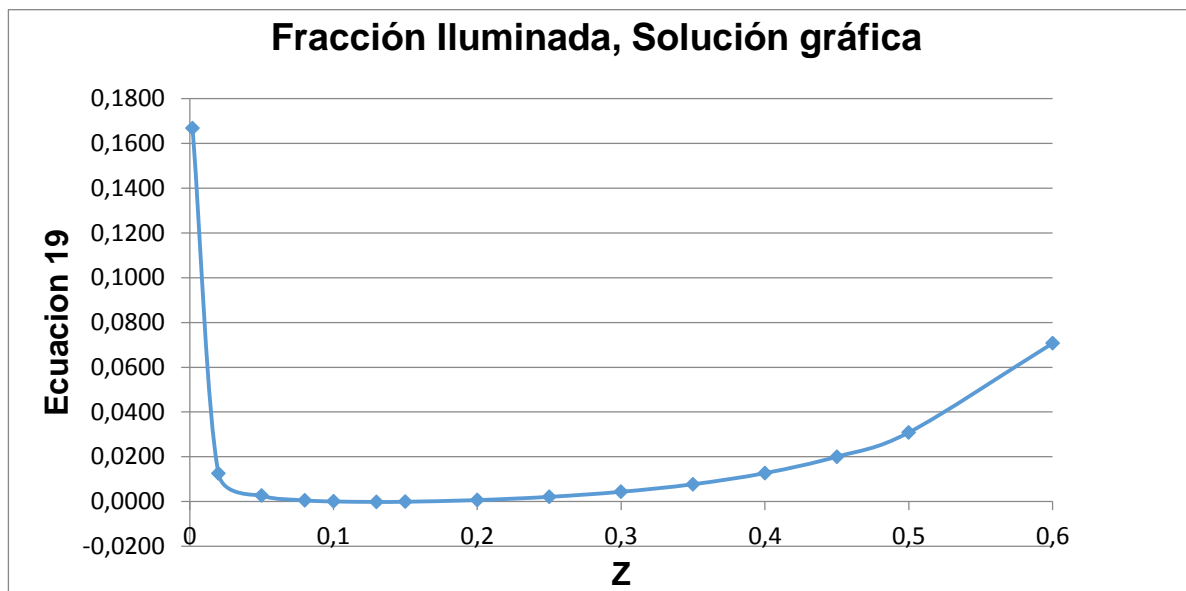
$$\frac{1}{Z_2} \frac{2 \cosh(\delta Z_2)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} - \frac{C_p}{F_R} = 0$$

**Ecuación 49.** Raíces de trabajo

$$Z_2 = \frac{R_2}{R} \text{ y } Z'_2 = \frac{R'_2}{R}$$

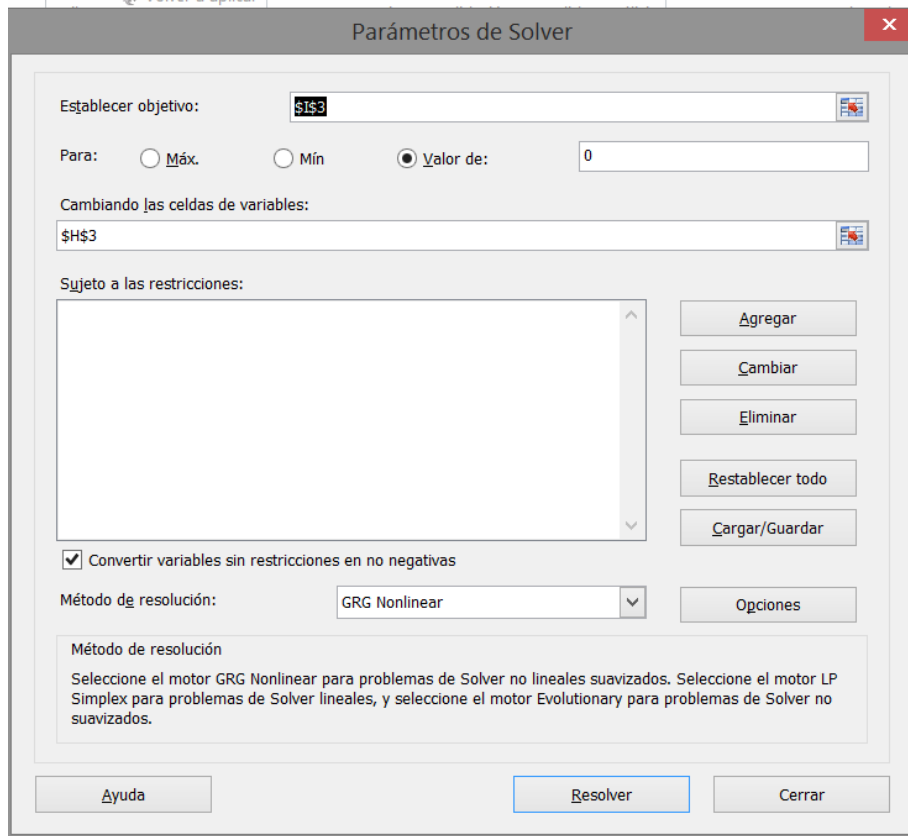
La resolución de los puntos de corte se verifica por medio gráfico:

Z	Ecuación 19
0,002	0,1668
0,02	0,0125
0,05	0,0026
0,08	0,0005
0,1	0,0000
0,13	-0,0002
0,1500	-0,0001
0,2	0,0006
0,2500	0,0021
0,3	0,0043
0,3500	0,0077
0,4	0,0127
0,4500	0,0200
0,5	0,0309
0,6	0,0707



Genera puntos cercanos para  $Z_2=0,2$  y  $Z'_2=0,1$ .

Se ingresan al complemento de SOLVER para validar datos más precisos de aceptación igualando la ecuación 19 a cero y partiendo de los puntos de cortes encontrados gráficamente.



Fracción Iluminada		
<b>Z2</b>	0,160632196	<b>Error</b>
<b>R2</b>	0,017669542	-5,67287E-10
<b>Z2'</b>	0,101894195	<b>Error</b>
<b>R2'</b>	0,011208361	-2,05246E-09
<b>Y</b>	0,984579725	

**Ecuación 50. Fracción iluminada**

$$\gamma = \frac{0,011208361^2}{0,11^2} + \frac{0,11^2 - 0,017669542^2}{0,11^2} = 0,9846$$

**Ecuación 51. Crecimiento volumétrico para geometría cilíndrica**

$$\langle \mu' \rangle \approx \frac{1}{\pi(R^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^R 2\pi \mu'_M \frac{4\pi J_r}{K_j + 4\pi J_r} r dr$$

Para la resolución de la integral se toma el método numérico Simpson 1/3 **Ecuación 4.** con dos pasos como puntos de referencia para determinar cuando no hay variación en el resultado de la integral:

**Ecuación 52.** Integral de Simpson 1/3

$$I \cong (b - a) \frac{fx_0 + 4 \sum_{i=1,3,5} fx_i + 2 \sum_{j=2,4,6} fx_j + fx_n}{3n}$$

Dónde:

- b: Límite superior
- a: Límite inferior
- n: Divisiones
- h: Paso de la integral [h=(b-a)/n]

**Ecuación 53.** Crecimiento volumétrico promedio

$$\langle R \rangle = 0,03325222 \times 0,9846 \times 0,046560847 = 0,00152438 \frac{Kg}{m^3h}$$

**Resolución Integral y Limites**

R	0,11
R2	0,0177
N	50
h	0,001846609

Crecimiento Volumétrico							
N	r	r/R	4πJr	Función Simpson	<μ'>	<R>	
0	0,0177	0,1606	1,0000	0,0046	4,90E-03	3,33E-02	1,52E-03
1	0,0195	0,1774	1,0447	0,0053			
2	0,0214	0,1942	1,1049	0,0060			
3	0,0232	0,2110	1,1804	0,0069			
4	0,0251	0,2278	1,2714	0,0078			
5	0,0269	0,2446	1,3789	0,0089			
6	0,0287	0,2614	1,5040	0,0100			
7	0,0306	0,2781	1,6485	0,0113			
8	0,0324	0,2949	1,8145	0,0128			
9	0,0343	0,3117	2,0045	0,0143			
10	0,0361	0,3285	2,2215	0,0160			
11	0,0380	0,3453	2,4690	0,0178			
12	0,0398	0,3621	2,7511	0,0197			
13	0,0417	0,3789	3,0722	0,0218			
14	0,0435	0,3957	3,4380	0,0240			

Crecimiento Volumétrico							
N	r	r/R	$4\pi Jr$	Función Simpson	$\langle \mu' \rangle$	$\langle R \rangle$	
15	0,0454	0,4124	3,8544	0,0263			
16	0,0472	0,4292	4,3287	0,0287			
17	0,0491	0,4460	4,8689	0,0311			
18	0,0509	0,4628	5,4845	0,0337			
19	0,0528	0,4796	6,1861	0,0363			
20	0,0546	0,4964	6,9861	0,0390			
21	0,0564	0,5132	7,8988	0,0417			
22	0,0583	0,5300	8,9402	0,0444			
23	0,0601	0,5467	10,1292	0,0471			
24	0,0620	0,5635	11,4872	0,0498			
25	0,0638	0,5803	13,0389	0,0526			
26	0,0657	0,5971	14,8126	0,0552			
27	0,0675	0,6139	16,8409	0,0579			
28	0,0694	0,6307	19,1613	0,0605			
29	0,0712	0,6475	21,8169	0,0631			
30	0,0731	0,6643	24,8573	0,0657			
31	0,0749	0,6810	28,3395	0,0682			
32	0,0768	0,6978	32,3291	0,0706			
33	0,0786	0,7146	36,9018	0,0731			
34	0,0805	0,7314	42,1444	0,0754			
35	0,0823	0,7482	48,1573	0,0778			
36	0,0841	0,7650	55,0558	0,0801			
37	0,0860	0,7818	62,9729	0,0823			
38	0,0878	0,7986	72,0616	0,0846			
39	0,0897	0,8153	82,4986	0,0867			
40	0,0915	0,8321	94,4872	0,0889			
41	0,0934	0,8489	108,2621	0,0910			
42	0,0952	0,8657	124,0937	0,0931			
43	0,0971	0,8825	142,2939	0,0952			
44	0,0989	0,8993	163,2226	0,0973			
45	0,1008	0,9161	187,2947	0,0993			
46	0,1026	0,9329	214,9891	0,1013			
47	0,1045	0,9496	246,8585	0,1033			
48	0,1063	0,9664	283,5408	0,1053			
49	0,1082	0,9832	325,7723	0,1072			
50	0,1100	1,0000	374,4030	0,1092			

**Resolución Integral y  
Límites**

R	0,11
R2	0,0177
N	100
h	0,000923305

**Crecimiento Volumétrico**

<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r/R</b>	<b>4πJr</b>	<b>Función Simpson</b>	<b>&lt;μ'&gt;</b>	<b>&lt;R&gt;</b>
0	0,0177	0,1606	1,0000	0,0046	4,90E-03	3,33E-02
1	0,0186	0,1690	1,0203	0,0050		1,52E-03
2	0,0195	0,1774	1,0447	0,0053		
3	0,0204	0,1858	1,0729	0,0057		
4	0,0214	0,1942	1,1049	0,0060		
5	0,0223	0,2026	1,1407	0,0065		
6	0,0232	0,2110	1,1804	0,0069		
7	0,0241	0,2194	1,2239	0,0073		
8	0,0251	0,2278	1,2714	0,0078		
9	0,0260	0,2362	1,3230	0,0083		
10	0,0269	0,2446	1,3789	0,0089		
11	0,0278	0,2530	1,4391	0,0094		
12	0,0287	0,2614	1,5040	0,0100		
13	0,0297	0,2698	1,5737	0,0107		
14	0,0306	0,2781	1,6485	0,0113		
15	0,0315	0,2865	1,7287	0,0120		
16	0,0324	0,2949	1,8145	0,0128		
17	0,0334	0,3033	1,9063	0,0135		
18	0,0343	0,3117	2,0045	0,0143		
19	0,0352	0,3201	2,1094	0,0151		
20	0,0361	0,3285	2,2215	0,0160		
21	0,0371	0,3369	2,3412	0,0169		
22	0,0380	0,3453	2,4690	0,0178		
23	0,0389	0,3537	2,6055	0,0188		
24	0,0398	0,3621	2,7511	0,0197		
25	0,0408	0,3705	2,9064	0,0208		
26	0,0417	0,3789	3,0722	0,0218		
27	0,0426	0,3873	3,2492	0,0229		
28	0,0435	0,3957	3,4380	0,0240		
29	0,0444	0,4040	3,6394	0,0251		
30	0,0454	0,4124	3,8544	0,0263		
31	0,0463	0,4208	4,0838	0,0275		

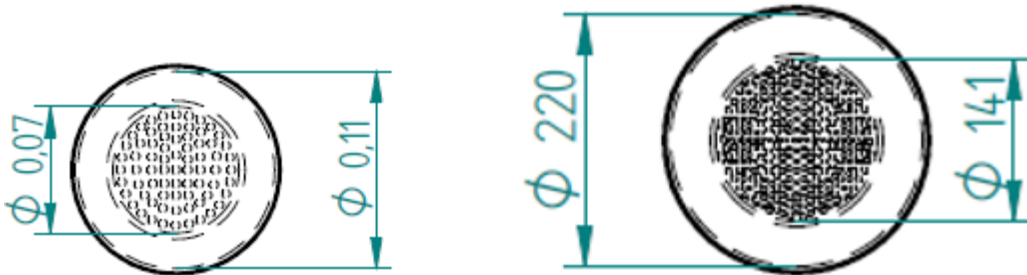
Crecimiento Volumétrico						
N	r	r/R	$4\pi Jr$	Función Simpson	$\langle \mu' \rangle$	$\langle R \rangle$
32	0,0472	0,4292	4,3287	0,0287		
33	0,0481	0,4376	4,5900	0,0299		
34	0,0491	0,4460	4,8689	0,0311		
35	0,0500	0,4544	5,1666	0,0324		
36	0,0509	0,4628	5,4845	0,0337		
37	0,0518	0,4712	5,8238	0,0350		
38	0,0528	0,4796	6,1861	0,0363		
39	0,0537	0,4880	6,5730	0,0376		
40	0,0546	0,4964	6,9861	0,0390		
41	0,0555	0,5048	7,4274	0,0403		
42	0,0564	0,5132	7,8988	0,0417		
43	0,0574	0,5216	8,4023	0,0430		
44	0,0583	0,5300	8,9402	0,0444		
45	0,0592	0,5383	9,5150	0,0458		
46	0,0601	0,5467	10,1292	0,0471		
47	0,0611	0,5551	10,7856	0,0485		
48	0,0620	0,5635	11,4872	0,0498		
49	0,0629	0,5719	12,2372	0,0512		
50	0,0638	0,5803	13,0389	0,0526		
51	0,0648	0,5887	13,8961	0,0539		
52	0,0657	0,5971	14,8126	0,0552		
53	0,0666	0,6055	15,7927	0,0566		
54	0,0675	0,6139	16,8409	0,0579		
55	0,0685	0,6223	17,9621	0,0592		
56	0,0694	0,6307	19,1613	0,0605		
57	0,0703	0,6391	20,4443	0,0618		
58	0,0712	0,6475	21,8169	0,0631		
59	0,0721	0,6559	23,2856	0,0644		
60	0,0731	0,6643	24,8573	0,0657		
61	0,0740	0,6726	26,5393	0,0669		
62	0,0749	0,6810	28,3395	0,0682		
63	0,0758	0,6894	30,2664	0,0694		
64	0,0768	0,6978	32,3291	0,0706		
65	0,0777	0,7062	34,5374	0,0719		
66	0,0786	0,7146	36,9018	0,0731		
67	0,0795	0,7230	39,4334	0,0743		
68	0,0805	0,7314	42,1444	0,0754		
69	0,0814	0,7398	45,0478	0,0766		
70	0,0823	0,7482	48,1573	0,0778		

Crecimiento Volumétrico						
N	r	r/R	$4\pi Jr$	Función Simpson	$\langle \mu' \rangle$	$\langle R \rangle$
71	0,0832	0,7566	51,4880	0,0789		
72	0,0841	0,7650	55,0558	0,0801		
73	0,0851	0,7734	58,8780	0,0812		
74	0,0860	0,7818	62,9729	0,0823		
75	0,0869	0,7902	67,3603	0,0834		
76	0,0878	0,7986	72,0616	0,0846		
77	0,0888	0,8069	77,0995	0,0857		
78	0,0897	0,8153	82,4986	0,0867		
79	0,0906	0,8237	88,2851	0,0878		
80	0,0915	0,8321	94,4872	0,0889		
81	0,0925	0,8405	101,1354	0,0900		
82	0,0934	0,8489	108,2621	0,0910		
83	0,0943	0,8573	115,9024	0,0921		
84	0,0952	0,8657	124,0937	0,0931		
85	0,0962	0,8741	132,8765	0,0942		
86	0,0971	0,8825	142,2939	0,0952		
87	0,0980	0,8909	152,3926	0,0962		
88	0,0989	0,8993	163,2226	0,0973		
89	0,0998	0,9077	174,8374	0,0983		
90	0,1008	0,9161	187,2947	0,0993		
91	0,1017	0,9245	200,6564	0,1003		
92	0,1026	0,9329	214,9891	0,1013		
93	0,1035	0,9412	230,3642	0,1023		
94	0,1045	0,9496	246,8585	0,1033		
95	0,1054	0,9580	264,5545	0,1043		
96	0,1063	0,9664	283,5408	0,1053		
97	0,1072	0,9748	303,9127	0,1063		
98	0,1082	0,9832	325,7723	0,1072		
99	0,1091	0,9916	349,2297	0,1082		
100	0,1100	1,0000	374,4030	0,1092		



## ANEXO C PLANOS DEL FOTOBIORREACTOR

### Anexo C 1 - Vista Superior del Fotobiorreactor



a. Vista Superior Del Diseño Base Escalado

b. Vista Superior Del Fotobiorreactor

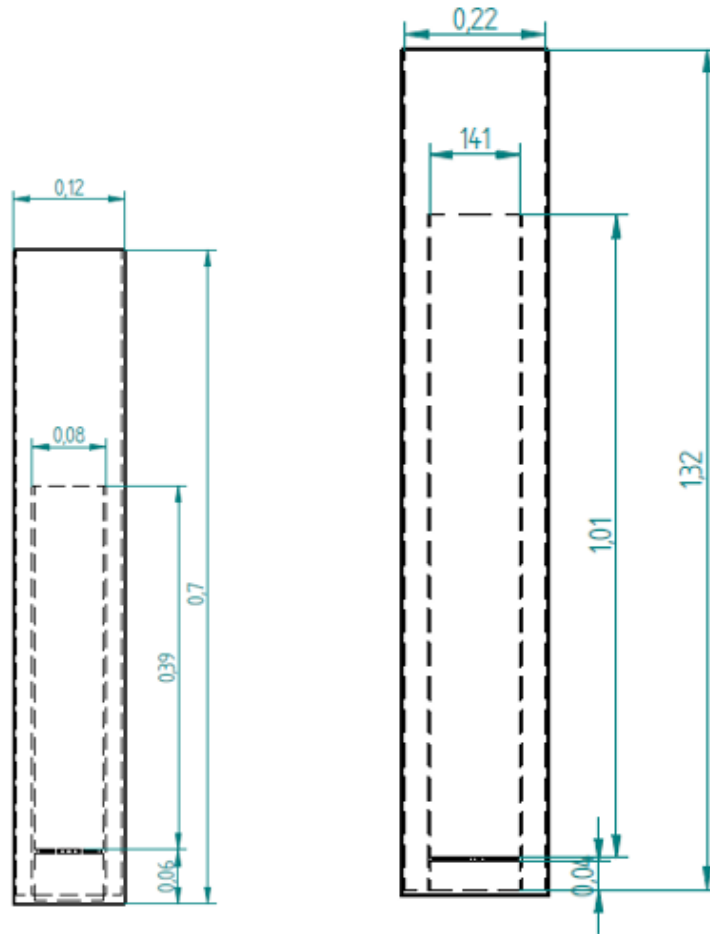
### Anexo C 2 - Vista Inferior del Fotobiorreactor



c. Vista Inferior Del Diseño Base

d. Vista Inferior Del Fotobiorreactor Escalado

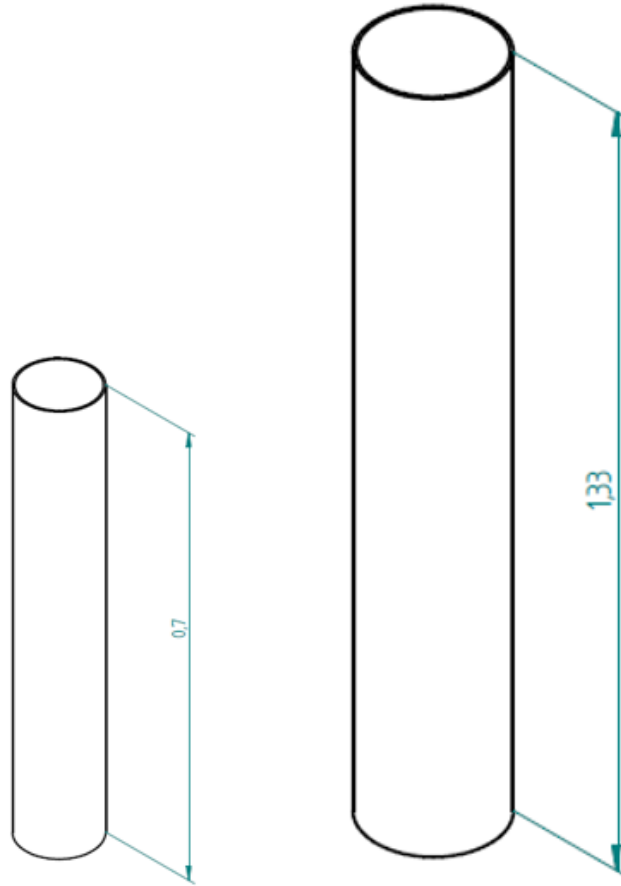
### Anexo C 3 - Vista Lateral del Fotobiorreactor



a. Vista Lateral Del Diseño Base Escalado

b. Vista Lateral Del Fotobiorreactor

#### Anexo C 4 - Vista Isométrica 3D del Fotobiorreactor

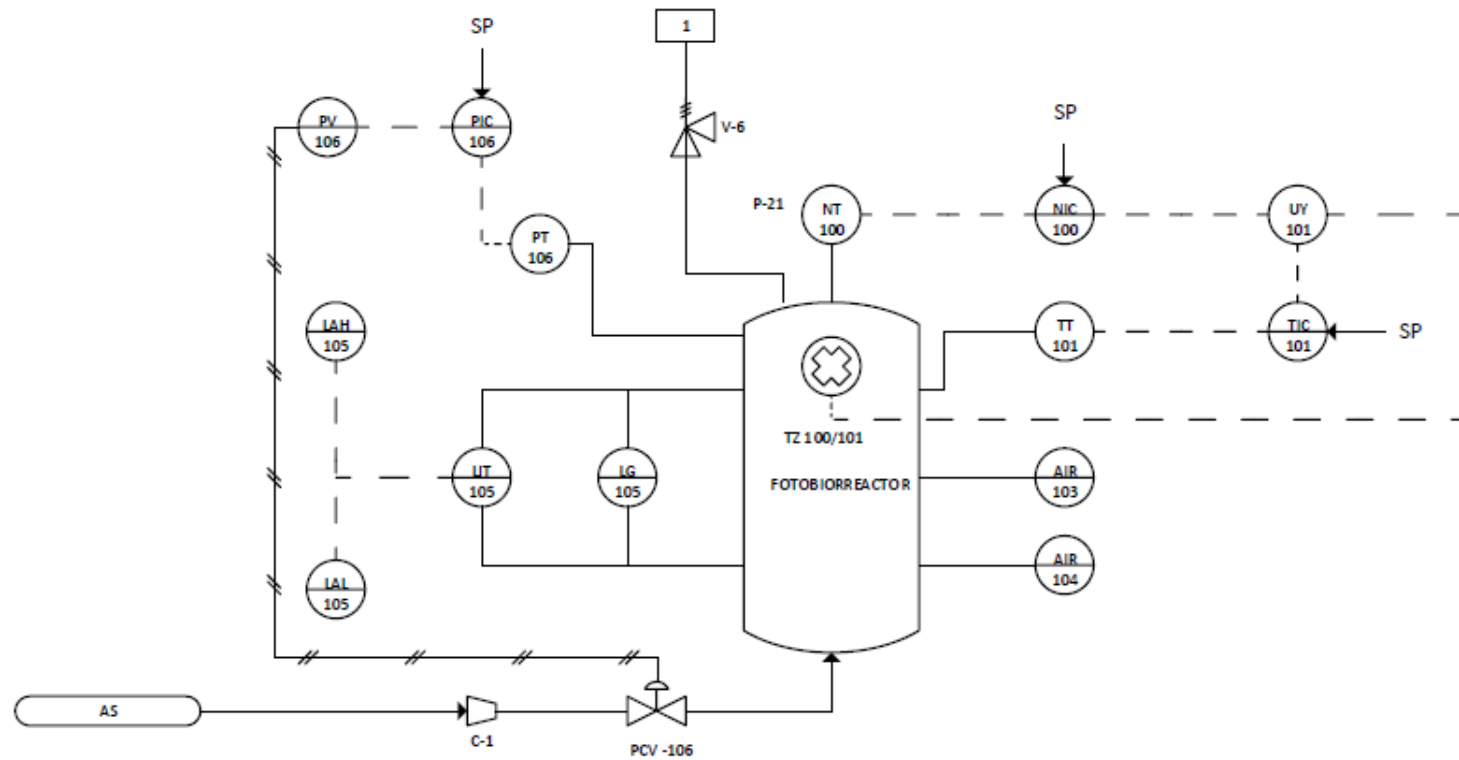


a. Vista Isométrica 3D Del Diseño Base

b. Vista Superior Isométrica 3D Del Fotobiorreactor Escalado

## ANEXO D SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA EL FOTOBIORREACTOR

### Anexo D 1 - Diagrama De Tuberías E Instrumentación (P&ID)



## Anexo D 2 - Diagrama De Tuberías E Instrumentación (P&ID) –Convenciones

CONVENCIONES UTILES	
1	Salida a la atmosfera
AS	Alimentación de aire
SP	Punto de ajuste
N	Intensidad lumínica
TZ	Arreglo lumínico
C-1	Compresor
AIR-103	Analizador químico de pH
AIR-104	Analizador químico de salinidad

Las convenciones restantes de los diferentes instrumentos del sistema de monitoreo y control se encuentran en el cuadro 11 del capítulo de resultados, tanto estos como los enunciados aquí son referentes a la normativa de la norma ISA 5.1.