

**EVALUACIÓN TEÓRICA DEL COMPORTAMIENTO DE UN FBR ALIMENTADO
CON EL EFLUENTE LÍQUIDO GENERADO EN UN UASB**

**JUANITA ANZOLA RODRÍGUEZ
DIANA SOFÍA LAITON DELGADO**

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

**Director
Juan Daniel Valderrama Rincón
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C, febrero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría académica de investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Peñaranda

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano general de la facultad de ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra

DEDICATORIAS

A mi mamá por su tiempo, dedicación, apoyo y amor incondicional. Eres el motor de mi vida, mi más grande amor y el mejor ejemplo a seguir. Anhelo que tú junto con tu bendición me acompañen siempre en cada paso de mi vida.

Juanita.

*A mis padres por motivarme a ser mejor cada día y apoyarme constantemente para cumplir mis metas, por ser mi guía y ejemplo a seguir. Son los amores de mi vida y nada de esto hubiera sido posible sin ustedes. **¡Este logro es de ustedes!***

Diana Sofia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirnos cumplir nuestros logros al bendecirnos día a día.

A mi mamá, por ser soporte, risas, soluciones y libertad. A ti te debo todo lo que soy. ¡Te admiro! Admiro tu fuerza, tu valentía y todo el amor que nos das a diario. Gracias por ser mi persona favorita y mi más grande inspiración.

A mi hermana y Andrés, gracias por hacerme tía de Jerónimo y Salvador. Gracias por enseñarme tanto y por estar siempre cerca cuando los necesito. ¡Que suerte tengo de tenerlos!

*Jero y Salva, amores de mi vida, con ustedes estrené mi corazón. Gracias por los ángeles de su sonrisa. **Por y para ustedes.***

A mi familia, gracias por estar presentes y permanecer en cada etapa de mi vida.

A Diana, que más que mi compañera es mi amiga, gracias por animarme y escucharme siempre. Haces parte de una de las etapas más importantes de mi vida. ¡Llegamos a la meta juntas, amiguita!

Juanita.

*En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, ya que a causa de todo su esfuerzo y dedicación puedo cumplir una de mis más grandes metas en la vida. Por su fiel compañía y enseñanzas que me han brindado. **¡Los amo con todo mi corazón!** Son mi mayor motivación para seguir cumpliendo todos mis propósitos.*

A Daniel, por ser esa persona tan comprensiva, paciente y amorosa, por brindarme todo su apoyo incondicional y también por impulsarme a ser mejor cada día.

A mi familia, por darme tantas alegrías en medio de la adversidad, apoyándome en cada paso de este proceso.

A Juanita, porque además de ser mi compañera de trabajo es una de las mejores amigas que me ha dejado este camino, y sin importar las circunstancias y los obstáculos que se nos presentaron logramos acabar este proceso juntas.

Diana Sofía.

Al profesor Juan Valderrama, director de este proyecto el cual nos brindó todos sus conocimientos para ser de este trabajo el mejor. Agradecemos de todo corazón su paciencia y entrega.

Juanita y Diana Sofía.

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.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 Aguas residuales	17
1.1.1 Definición	17
1.1.2 Tipos de aguas residuales	17
1.1.3 Clasificación de los contaminantes de aguas residuales	18
1.1.4 Tipos de tratamientos de aguas residuales	22
1.1.5 Etapas de tratamiento de aguas residuales	24
1.2 Biorreactores	26
1.2.1 Método de operación de un sistema de cultivo	27
1.2.2 Clases de biorreactores	27
1.2.3 Tipos de fotobiorreactores	30
1.3 Microalgas y la especie <i>Chlorella vulgaris</i>	32
1.3.1 Características metabólicas	32
1.3.2 Ventajas de su implementación	34
1.3.3 Microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	35
1.3.4 Parámetros de cultivo	35
2. VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL FOTOBIORREACTOR	39
2.1 Métodos y materiales	39
2.1.1 Identificación del estudio	39
2.1.2 Selección de estudios	40
2.2 Resultados	41
2.2.1 Selección de textos	46
2.3 Determinación cuantitativa de los parámetros del estudio	49
2.3.1 Variables que afectan el crecimiento de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	49
3. BIORREACTORES UASB Y FBR	53
3.1 Diseño conceptual del biorreactor UASB	53
3.1.1 Objetivo del biorreactor	53

3.1.2 Consideraciones de diseño	53
3.1.3 Alternativas del diseño	58
3.1.4 Evaluación de las alternativas	59
3.1.5 Análisis y selección de las alternativas	63
3.2 Diseño conceptual del fotobiorreactor	64
3.2.1 Objetivo del biorreactor	64
3.2.2 Consideraciones del diseño	64
3.2.3 Alternativas del diseño	65
3.2.4 Evaluación de las alternativas	66
3.2.5 Análisis y selección de las alternativas	70
3.3 Diseño conceptual del sistema continuo biorreactor UASB y FBR	71
3.3.1 Fotobiorreactor de geometría de placa plana	74
3.3.2 Fotobiorreactor de geometría tubular vertical (<i>Air-lift</i>)	75
3.4 Estimación del desempeño del FBR	76
4. CONCLUSIONES	79
5. RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81
GLOSARIO	90
ANEXOS	92

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

μm : micrómetros

cm: centímetro.

DBO: demanda bioquímica de oxígeno.

DQO: demanda química de oxígeno.

FBR: fotobiorreactor.

g: gramos

L: litros.

m: metros

mg: miligramos

nm: nanómetros.

OD: oxígeno disuelto.

ppmv: partes por millón por volumen.

UASB: reactor anaerobio de flujo ascendente.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diseño de un UASB	29
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de selección	42
Figura 3. Gráfica número de publicaciones por fuente de publicación	45
Figura 4. Gráfica número de publicaciones por año de los textos a analizar.	45
Figura 5. Gráfica número de citas por texto a analizar.	46
Figura 6. Gráfica de autores de documentos relacionados con la temática de interés.	47
Figura 7. Esquema del sistema que consta de un UASB conectado a un FBR.	71
Figura 8. Dimensiones reactor UASB.	72
Figura 9. Dimensiones en el FBR de placa plana.	74
Figura 10. Dimensiones en el FBR tubular.	76
Figura 11. Diseño factorial.	95

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Patógenos típicos excretados en las heces humanas.	19
Tabla 2. Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos (NCM) establecidos por (USEPA) y por la legislación colombiana.	21
Tabla 3. Principales características metabólicas de las microalgas.	34
Tabla 4. Características de estudio tenidas en cuenta en los 27 textos bibliográficos.	43
Tabla 5. Parámetros recopilados de cada texto bibliográfico.	44
Tabla 6. Parámetros finales para el crecimiento de la especie <i>Chlorella vulgaris</i> .	49
Tabla 7. Cargas volumétricas recomendadas para reactores UASB.	56
Tabla 8. Velocidades de flujo ascendente.	57
Tabla 9. Alternativas para cada en el reactor UASB.	59
Tabla 10. Ventajas y desventajas de cada tipo de material para la construcción del UASB.	59
Tabla 11. Características del sistema de calefacción acoplado al reactor UASB.	60
Tabla 12. Matriz de selección del tipo de material.	62
Tabla 13. Matriz de selección del sistema de calefacción.	62
Tabla 14. Alternativas para cada criterio en el FBR.	66

Tabla 15. Tipos de geometrías para el FBR con sus características específicas.	67
Tabla 16. Tipos de materiales para el FBR con sus características específicas.	68
Tabla 17. Matriz del tipo de material para el FBR.	69
Tabla 18. Matriz del tipo de geometría para el FBR.	69
Tabla 19. Información recopilada de los artículos para el reactor placa plana y <i>Air-lift</i> .	78
Tabla 20. Niveles para los factores del diseño de experimentos.	96
Tabla 21. Datos experimentales supuestos de concentración de biomasa por interacción de parámetros.	96
Tabla 22. Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo del ejemplo de referencia.	97
Tabla 23. Análisis de varianza para el ejemplo de referencia.	97

RESUMEN

El objetivo de este proyecto de investigación es evaluar de forma teórica el comportamiento de un FBR alimentado con el efluente líquido generado en un UASB, mediante el desarrollo de una revisión bibliográfica, donde se determinó que las variables influyentes que permiten un alto crecimiento de biomasa de la microalga *Chlorella vulgaris* dentro del FBR, son la temperatura en un rango entre 24 °C a 26°C, un pH entre 6,5 a 7,5, una intensidad lumínica de 1000 a 12000 lx y, por último un fotoperiodo en una proporción 12:12 (luz/oscuridad).

Seguido a esto, se planteó el diseño conceptual de un sistema de depuración de agua residual con el propósito de establecer las características y dimensiones de cada equipo. Para el reactor UASB se determinó que el tipo de material y sistema de calefacción más adecuados son el PMMA y el principio de la chaqueta de agua, respectivamente, por sus particularidades y alta transferencia de calor. De igual forma, para el FBR se estableció que el material de construcción apto es el PMMA y la configuración geométrica que permite alta incidencia de luz en el cultivo y un gran desempeño de este es de tipo placa plana.

Respecto al desempeño en el FBR, se evidenció por medio de estudios que la configuración de placa plana frente a la configuración tubular, presenta mayores concentraciones de biomasa de la microalga *Chlorella vulgaris* a condiciones similares.

Palabras claves: Fotobiorreactor, microalga *Chlorella vulgaris*, UASB, aguas residuales, biomasa, efluente líquido.

INTRODUCCIÓN

Según la UNED [1], la demanda global de agua potable conlleva a la generación masiva de aguas residuales que se componen, básicamente, de un 99% de agua y un 1% de sustancias indeseadas como materia orgánica disuelta, sólidos suspendidos o coloidales, trazas de compuestos inorgánicos (nitrógeno y fósforo), altas cargas bacterianas, entre otros, que son producidas en la mayoría de las actividades tanto en las zonas urbanas como rurales. Su nivel de contaminación y su falta de tratamiento adecuado ocasiona efectos nocivos en la calidad de los recursos del agua y los ecosistemas. Sin embargo, el aumento en el volumen de estas aguas residuales puede tomarse como una alternativa de producción energética rentable y sostenible.

Bajo este contexto, a partir de las aguas residuales se han desarrollado tecnologías basadas en tratamientos anaerobios para la producción de biogás como una alternativa para evitar el daño producido por la combustión de los combustibles fósiles, que permitirán que los residuos orgánicos sean tomados como fuente energética renovable para suplir las necesidades cotidianas de electricidad, movilidad y calefacción. Además del valor agregado frente a la disminución en el deterioro del suelo, el agua y el aire que son recursos naturales vitales para la preservación del medio ambiente.

Las actividades propias de las zonas rurales generan desechos ricos en material orgánico, como lo son los desechos animales. Las aguas residuales asociadas a estos residuos son un problema importante pero también una fuente potencial de energía. Una alternativa para el aprovechamiento de estos como fuente de energía, es un reactor anaerobio, en el que se llevan a cabo tratamientos de aguas residuales con altas cargas orgánicas para la producción de Biogás. Sin embargo, para mitigar la problemática y conseguir una depuración viable para ser liberada al ambiente, se necesita un tratamiento posterior en un fotobiorreactor, al ser la opción más económica frente a un reactor de lodos activados, ya que evita los costos de aireación u oxigenación.

Según lo mencionado, la Universidad Antonio Nariño en búsqueda de innovación frente a las energías convencionales ha llevado a cabo múltiples investigaciones para

el desarrollo de tecnologías basadas en la implementación de energías renovables en nuestro país. Es por esto que se cuenta con la línea de investigación en ingeniería de bioprocesos del grupo GRESIA, la cual tiene como finalidad proporcionar soluciones por medio de sistemas que trabajan con material biológico residual para la generación de productos de valor agregado.

Con base en lo anterior, este proyecto radica en la depuración de aguas residuales domésticas, que se tomarán luego de un tratamiento de degradación como fuente de nutrientes para el análisis de la productividad de biomasa microalgal. Por tal motivo, se hará el diseño conceptual de un sistema que consta de un reactor tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) y un Fotobiorreactor (FBR) a nivel laboratorio.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar teóricamente el comportamiento de un FBR alimentado con el efluente líquido generado en un UASB.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar las variables que influyen en el desarrollo del fotobiorreactor.
2. Elaborar un diseño conceptual detallado de los biorreactores que se emplearán en el proceso.
3. Estimar el desempeño del fotobiorreactor con las condiciones establecidas.

1. MARCO TEÓRICO

Para la eliminación de sustancias indeseadas en aguas residuales se hace uso de diferentes alternativas que tienen como fundamento la aplicación de procesos biológicos. Uno de los más valiosos mecanismos utilizados hoy en día para la remoción de residuos orgánicos, consiste en el tratamiento anaerobio por medio de la acción bacteriana y de arqueas que permiten tomar dicha materia orgánica como fuente de energía y carbono para la generación de biomasa y biogás.

La mezcla de gases, principalmente metano y dióxido carbono, conocida como biogás, es producida a través de dichos avances tecnológicos que pretenden aprovechar al máximo el potencial de organismos metanogénicos conocidos exclusivamente como arqueas, que transforman residuos orgánicos en este producto con un alto valor agregado, bajos costos y fácil adquisición.

1.1 Aguas residuales

1.1.1 Definición

“Se entiende por aguas residuales aquellas que han sido utilizadas con un fin consuntivo, incorporando a ellas sustancias que deterioran su calidad original (contaminación), disminuyendo su potencialidad de uso” [2].

1.1.2 Tipos de aguas residuales

Las aguas residuales tienen diferentes procedencias, composiciones y concentraciones de sustancias, lo que permite que se clasifiquen de la siguiente manera:

- a. Aguas residuales domésticas o aguas negras: Se caracterizan por poseer principalmente desechos de zonas residenciales (baños, cocina y desechos humanos) y residuos de otras actividades (comercial y servicios). “Su composición tiene un contenido de sólidos inferior al 1% con gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como residuos de jabones, detergentes y grasa” [2].

- b. Aguas blancas: “Están constituidas principalmente por aguas originarias de la atmósfera (lluvia, nieve o hielo) y de la limpieza de calles, parques y lugares públicos” [3].
- c. Aguas residuales industriales: “*Son provenientes de cualquier actividad industrial donde se haga uso del agua, ya sea para el procesamiento, transformación o manipulación de productos*” [3].

1.1.3 Clasificación de los contaminantes de aguas residuales

El agua que ha sido utilizada para llevar a cabo diversas actividades estará contaminada de una forma u otra. Por ejemplo, las aguas residuales agrícolas pueden contener pesticidas, fertilizantes y sales; las aguas residuales municipales arrastran desechos humanos, farmacéuticos y de detergentes; las centrales eléctricas descargan agua a elevadas temperaturas y, por último, las aguas residuales industriales contribuyen en un alto rango en contaminantes químicos y residuos orgánicos.

Con respecto a esto y a los múltiples contaminantes que intervienen en la composición del agua, a continuación, se encontrarán las categorías más relevantes:

- a. Patógenos: Son organismos de origen biológico, causantes de enfermedades que crecen y se multiplican en el huésped. “Dentro de los que encontramos organismos como virus, responsables de las hepatitis y poliomielitis infecciosas; bacterias responsables del cólera, la disentería bacilar (shigelosis), tifus y fiebre paratifoidea; protozoos los cuales causan disentería amebiana, giardiasis y criptosporidiosis; y helmintos, que causan enfermedades tales como la esquistosomiasis y la dracunculiasis (enfermedad transmitida por gusanos guineanos)” [4].

La fuente más importante de contaminación por patógenos en el agua se le atribuye a la combinación de ésta con las heces evacuadas por el humano. En la **Tabla 1.** se muestra la clasificación de patógenos y algunas enfermedades asociadas a estos.

Tabla 1.*Patógenos típicos excretados en las heces humanas.*

Nombre y grupo patógeno	Enfermedades asociadas
Virus	
Adenovirus	Respiratorio, infecciones oculares
Enterovirus	
Poliovirus	Meningitis aséptica, poliomeilitis
Ecovirus	Meningitis aséptica, diarrea, infecciones respiratorias
Virus coxsackie	Meningitis aséptica, herpangina, miocarditis
Virus de hepatitis A	Hepatitis infecciosas
Reovirus	No conocidos
Otros virus	Gastroenteritis, diarrea
Bacteria	
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Salmonella paratyphi</i>	Fiebre paratifoidea
Otras salmonellas	Gastroenteritis
Especies <i>shigella</i>	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
Otros vibrios	Diarrea
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenteritis
Protozoo	
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disentería amebiana
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrea
Especies <i>criptosporidium</i>	Diarrea
Helmintos	
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Anquilostomiasis
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis
<i>Himenolepis nana</i>	Himenolepiasis
<i>Necator americanus</i>	Anquilostomiasis
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Estrongidiasis
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuriasis

Nota. Esta tabla muestra la clasificación de los patógenos característicos que se encuentran en las heces del ser humano. Tomado de: Gilbert Masters & Wendell Ela. Introducción a la Ingeniería medioambiental, [En línea]. Disponible: <https://docero.es/doc/nc8sc1> [Acceso: sep.9.2020].

- b. Residuos con demanda de oxígeno: La cantidad de oxígeno disuelto (OD) presente es uno de los análisis más importantes para determinar la calidad de la fuente de agua estudiada. Los residuos con demanda de oxígeno son sustancias que se oxidan en la masa de agua receptora, al ser sustancias orgánicas biodegradables contenidas en aguas residuales municipales o en los efluentes de diferentes industrias.

«Existen diversas medidas de demanda de oxígeno como lo son: la demanda química de oxígeno (DQO) que es el parámetro que indica el contenido total de materia

orgánica, en términos de la cantidad de oxígeno que requiere para oxidar la materia orgánica a dióxido de carbono y agua; y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que es definida como la cantidad de oxígeno requerida por microorganismos para estabilizar la materia orgánica biodegradable (alimento y proporción de energía a los microorganismos) bajo condiciones aerobias» [5].

- c. Nutrientes: *“Son sustancias esenciales para el crecimiento de organismos, son denominados contaminantes cuando las concentraciones son elevadas generando un crecimiento excesivo de plantas acuáticas (microalgas). Entre estos encontramos el nitrógeno, fósforo, carbono, azufre, calcio, potasio, hierro, manganeso, boro y cobalto. Además, la mayor fuente de nitrógeno proviene de aguas residuales municipales y/o agropecuarias, de fertilizantes químicos y las deposiciones nitrosas de la atmósfera (centrales térmicas de carbón)”* [4].

- d. Sales: *“toda agua producida de forma natural contiene cierta cantidad de sales, originarias de la acumulación de forma natural de diversidad de sólidos disueltos a medida que atraviesa suelos y rocas, dichas sales contienen cationes como los son el sodio, calcio, magnesio y potasio, y aniones como lo son el cloruro, sulfato y bicarbonato”* [4].

- e. Contaminación térmica: *“comúnmente en las centrales eléctricas se requiere gran cantidad de agua para su refrigeración, en donde normalmente aumenta en 10°C la temperatura de refrigeración. Si el calor generado en este se liberará a un río o lago cercano, dicho aumento de temperatura podría afectar negativamente a la flora y fauna, que suelen desarrollarse dentro de un rango de temperatura definido”* [4].

- f. Metales pesados: Los metales pesados de mayor importancia son el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el arsénico (As), son aquellos metales que causan un impacto ambiental debido a su toxicidad, la cual depende de su movilidad en el medio, que a su vez depende de su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación. *“La implementación de metales en los procesos industriales causan que grandes concentraciones de*

metales pesados sean emitidas a la atmósfera y vertidos en ambientes acuáticos y terrestres” [6].

A continuación, en la **Tabla 2.** se evidencia la descripción de algunos síntomas de intoxicación generados por la presencia de metales pesados en las aguas residuales.

Tabla 2.

Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos (NCM) establecidos por (USEPA) y por la legislación colombiana.

Metal Pesado	Toxicidad	Dosis letal en dieta humana mg/día	NCM (mg/L)	
			USEPA	Colombia
As	Manifestaciones cutáneas, cánceres viscerales, enfermedad vascular	50 - 340	0,05	0,1 - 0,5
Cd	Daño renal, trastorno renal y efectos carcinógenos	1,5k - 9 k	0,01	0,1
Cr	Dolor de cabeza, diarrea, náuseas, vomito, carcinógeno	3k - 8k	0,05	0,5
Cu	Daños hepáticos, enfermedad de Wilson, insomnio	175 - 250	0,25	1
Ni	Dermatitis, náuseas, asma crónica, tos, carcinógeno humano	--	0,2	0,5
Zn	Depresión, letargo, signos neurológicos y aumento de la sed	6k	0,8	3
Pb	Teratogenicidad cerebral, enfermedades renales, vasculares y neuronales	10k	0,006	0,2 - 05
Hg	Artritis reumatoidea y enfermedades renales, vasculares y neuronales	150 - 300	0,00003	0,02

K: Significa miles de miligramos/día.

Nota. Esta tabla muestra la descripción de los síntomas de la intoxicación típicos, la dosis letal en la dieta humana y los niveles de contaminación máximos (NCM) establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los estados Unidos (USEPA) y por la legislación colombiana a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para algunos metales pesados. Tomado de: Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales, [En línea]. Disponible: <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/710/1358> [Acceso: sep.9.2020].

g. Pesticidas: “son sustancias químicas que eliminan organismos que los seres humanos no desean. Dentro de estos podemos encontrar la línea de insecticidas, herbicidas, rodenticidas y fungicidas. Hay tres grupos principales de insecticidas orgánicos sintéticos: los organoclorados, los organofosforados y los carbamatos. La degradación de los pesticidas puede diseminarse por el medio, por lo que son tóxicos para los humanos u otras formas de vida” [4].

h. Compuestos orgánicos volátiles: *“los compuestos orgánicos volátiles (VOC) se encuentran entre los contaminantes más comúnmente hallados en aguas subterráneas, son utilizados como disolventes en procesos industriales, y varios de ellos son conocidos como presuntos cancerígenos. Dentro de estos se encuentran: cloruro de vinilo, tetracloroetileno, tricloroetileno, 1,2-dicloroetano y tetracloruro de vinilo, que sí tienen presencia en agua potable es causa de atención especial”* [4].

1.1.4 Tipos de tratamientos de aguas residuales

Para la remoción o reducción de sustancias indeseadas de origen natural o industrial en aguas residuales, se hace uso de diferentes alternativas que tienen como fundamento la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos. Estos procesos se realizan con el fin de eliminar o disminuir el contenido de contaminantes hasta niveles compatibles con la normativa vigente, la cual busca evitar vertimientos de aguas sin tratamientos previos en ríos, lagos o corrientes convencionales por razones de protección a la salud humana, a la preservación del recurso natural y al cuidado del medio ambiente.

a. Operaciones físicas: *“son todos aquellos en los que se emplean las fuerzas físicas para el tratamiento y reducción de sustancias inorgánicas”* [3].

Los principales procesos físicos son los siguientes:

Sedimentación: *“es la separación de los componentes del agua en dos fases, una fase sólida, que está formada por partículas de sólidos suspendidos (partículas más pesadas que el agua) que por gravedad se depositan en el fondo, y una fase líquida formada por el agua y compuestos diluidos”* [3].

Floculación: *“es la operación en la que las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto por la adición de productos químicos en los procesos de precipitación química”* [3].

Filtración: esta operación permite la eliminación de sólidos en suspensión, procedentes de las aguas después del tratamiento y sedimentación biológica. [3]

Adsorción: *“esta técnica busca extraer pequeñas cantidades de sustancias disueltas en agua que nunca sedimentarían por medio de la adhesión física de compuestos a la superficie de un sólido”* [4].

Aireación: *“es un proceso físico usado para sacar compuestos relativamente volátiles fuera de una disolución. Estos sistemas emplean generalmente aire o vapor de agua”* [4].

Ósmosis inversa: *“esta técnica utiliza la presión para forzar que el agua contaminada pase a través de una membrana semipermeable. La membrana actúa como un filtro, permitiendo que el agua pase por sus poros, pero impidiendo el tránsito de moléculas mayores, que son las que han de eliminarse”* [4].

Intercambio de iones: *“es un proceso en el que los iones a eliminar del agua residual se intercambian con los asociados a una resina especial de intercambio”* [4].

b. Procesos químicos: *“son todos aquellos procesos en los que la eliminación de los contaminantes del agua residual se realiza por medio de la adición de reactivos químicos o por las propiedades químicas de diversos compuestos”* [4].

Entre los procesos químicos encontramos:

Precipitación química: *“consiste en reducir la concentración de metales en el agua residual, por medio de la adición de productos químicos que alteren el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión y se produzca una eliminación por sedimentación”* [3].

Neutralización: *“este proceso consiste en ajustar el valor de pH del agua residual, para que pueda ser vertida dentro del rango exigido por la normativa legal aplicable, o para su adecuación a tratamientos posteriores”* [7].

Oxidación Reducción: *“esta técnica tiene como objetivo la eliminación de determinados contaminantes o residuos tóxicos de las aguas residuales como cianuros, pesticidas, materia orgánica tóxica, entre otros”* [7].

c. Procesos biológicos: *“el tratamiento biológico tiene como función degradar, absorber o transformar la materia orgánica e inorgánica y los diferentes nutrientes para convertirlos en dióxido de carbono, agua y nuevas células bacterianas”* [8].

Los principales procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales en cuanto al tipo de microorganismos (bacterias, hongos, algas, protozoos, crustáceos y virus) son:

Procesos aerobios: son los procesos que sólo se dan en presencia de oxígeno.

Procesos anaerobios: son los procesos que solo se dan en ausencia de oxígeno.

Procesos anóxicos: es el tratamiento por el cual el nitrógeno de los nitratos se transforma en nitrógeno molecular en ausencia de oxígeno.

Procesos facultativos: Es el método en que los organismos responsables del mismo son indiferentes a la presencia o ausencia de oxígeno disuelto en el medio.

1.1.5 Etapas de tratamiento de aguas residuales

Las etapas que intervienen en el tratamiento de aguas residuales son:

a. Tratamiento preliminar: *“en esta parte del proceso se acondicionan las aguas residuales para la protección y cuidado de las instalaciones, el funcionamiento de las obras de tratamiento y la eliminación de condiciones indeseables”* [9].

Entre las unidades preliminares se encuentran las rejas o tamices para la eliminación de sólidos gruesos, los trituradores para reducir el tamaño de los sólidos, los desarenadores para la eliminación de arenas y gravilla, los desengrasadores para la

eliminación de aceites y grasas, y la preareación para el control de olor y comportamiento hidráulico.

- b. Tratamiento primario: *“este tratamiento tiene como finalidad remover una parte sustancial del material indeseable (flotante o sedimentable) y una fracción de carga orgánica (25%-40% de DBO y un 50%-65% de sólidos suspendidos)”* [9].

Entre los tipos de procesos de este tratamiento se encuentran: sedimentación primaria, flotación, precipitación química, filtros gruesos, entre otros.

- c. Tratamiento secundario: *“este proceso reduce o convierte la materia orgánica disuelta en sólidos sedimentables. Sin embargo, la reducción de los compuestos orgánicos presentes en el agua residual con un previo tratamiento primario solo se puede realizar mediante procesos biológicos”* [9].

Los tratamientos biológicos (lodos activados y filtros percoladores) de esta categoría tienen una eficiencia de remoción de la DBO entre el 85% al 95%, y están compuestos por: filtración biológica, lodos activados (convencional) y lagunas, entre otros.

- d. Tratamiento terciario: el objetivo de este proceso es complementar los procesos anteriores para lograr efluentes más puros y con menor carga contaminante. Las sustancias o compuestos removidos son: fosfatos y nitratos, sustancias tensoactivas, bacterias y virus, sólidos totales y disueltos, entre otros.

- e. Desinfección: se emplea para reducir el contenido de bacterias y virus en las aguas residuales tratadas, previo a su disposición final mediante la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades.

- f. Manejo de lodos: durante el tratamiento de las aguas residuales se produce una serie de subproductos (residuos) de los sedimentadores de tratamientos primarios y secundarios.

“En sedimentaciones primarias aproximadamente el 0,22% y el 0,93% es volumen de agua residual y el contenido de sólidos volátiles es del 63% al 83%. En

sedimentaciones secundarias los porcentajes varían de acuerdo a la función de los procesos” [9].

El tratamiento de la materia orgánica busca una reducción apreciable del contenido de la materia orgánica, un aumento del contenido de sólidos fijos, una reducción del contenido de humedad, una mayor posibilidad de drenaje del agua contenida en los lodos y una producción de gases, principalmente de metano.

1.2 Biorreactores

En el diseño de los reactores biológicos, su cinética no está determinada exclusivamente por la velocidad de reacción y las variables que la determinan, como es en el caso de los reactores químicos. Aunque se puede describir de manera similar a la química, la cinética biológica también depende de características propias del organismo o cultivo tales como crecimiento y tasa de división celular. Por tanto, uno de los primeros parámetros que se definen en el diseño de un biorreactor es el propósito de utilización; es decir, se debe determinar qué tipo de cultivo se va a utilizar, el modo de operar y el proceso de cultivo [10].

El conjunto biorreactor- sistema de cultivo debe cumplir con los siguientes objetivos [10]:

- ❖ Mantener el cultivo puro.
- ❖ Mantener un ambiente aséptico.
- ❖ Maximizar el rendimiento y la producción.
- ❖ Minimizar el gasto y los costos de producción.
- ❖ Reducir al máximo el tiempo.
- ❖ Mantener constante y homogénea la temperatura.
- ❖ Minimizar los gradientes de concentración de nutrientes.
- ❖ Prevenir la sedimentación y la floculación.
- ❖ Permitir la difusión de gases nutrientes a la velocidad requerida por el cultivo.
- ❖ Mantener las células uniformemente distribuidas en todo el volumen de cultivo.

1.2.1 Método de operación de un sistema de cultivo

“En el modo de operación de un biorreactor influye el diseño propio del reactor y aspectos específicos como el modelo cinético de crecimiento del cultivo y el proceso de producción. Se consideran tres tipos básicos de operación” [10].

- a. Discontinuo (batch): funciona por lotes, sin alimentación (F); se coloca dentro del biorreactor la carga total de cada proceso (lote) de cultivo o fermentación y se deja llevar a cabo el proceso productivo o la fermentación por el tiempo que sea necesario; el cual se denomina tiempo de retención.
- b. Semicontinuo (fed-batch): funciona por lotes, con alimentación de entrada (F1); se alimenta una línea para que el sistema de cultivo tenga un producto (biomasa) con un crecimiento exponencial y aumente su productividad.
- c. Continuo (continuos): se alimenta con una línea de entrada (F1) y se drena una línea de salida (F2) o lavado; de manera que los flujos de ambas líneas sean iguales y su producción sea continua.

Por tal razón, al operar un biorreactor continuo, semicontinuo o continuo, de manera automática se puede determinar el modo de cultivo, definir los criterios y las características de diseño que intervienen en el proceso productivo del sistema.

1.2.2 Clases de biorreactores

De acuerdo con la información mencionada anteriormente, en el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas se recurre a la utilización de unidades o tanques llamados reactores, en los cuales se llevan a cabo reacciones químicas y biológicas. Los principales tipos de reactores empleados actualmente son los siguientes [10].

- a. Reactor batch: es un reactor discontinuo, donde no hay presencia de flujo de entrada ni de salida, su función principal es homogeneizar la mezcla por medio de un agitador, permitiendo que ocurra una reacción [10].

- b. Reactor continuo de tanque agitado (CSTR): son equipos cilíndricos con un sistema mecánico de homogeneización, como la agitación en donde se garantiza que la composición es la misma en cualquier punto del reactor. Su forma de operar se basa en la existencia de una corriente de entrada y de salida, de forma que el volumen del líquido en el interior permanece constante [10].

- c. Reactor de flujo pistón (PFR): el reactor tubular se emplea para la modelar transformaciones químicas de compuestos. A medida que se desplaza el reactivo a lo largo del reactor la composición de este va cambiando [10].

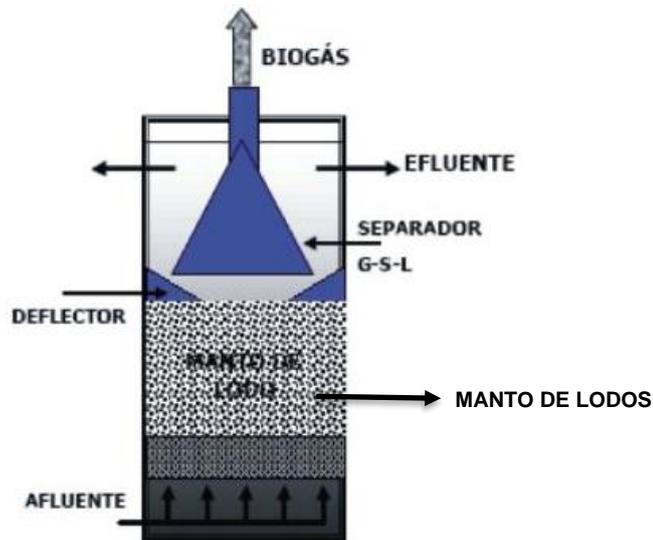
- d. Reactor de lecho empacado: es la configuración de mayor importancia industrial y se utiliza para la producción a gran escala de reactivos primarios o intermedios. Su ventaja radica en no requerir separación del catalizador [10].

- e. Reactor de lecho fluidizado (FBR): una de sus características es que el lecho de sólidos o partículas catalíticas está soportado por un flujo de gas. Este reactor facilita la extracción del catalizador y posee una alta conversión [10].

- f. Reactor anaeróbico de flujo ascendente con manto de lodos (UASB): este reactor tiene como objetivo degradar los contaminantes presentes en aguas residuales en ausencia de oxígeno. Su tecnología puede separar en su interior el efluente tratado, la biomasa y el biogás [10].

Figura 1.

Diseño de un UASB



Nota. La figura representa las partes correspondientes a un reactor UASB. Tomado de: Scielo, [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612009000200004&script=sci_ar ttext. [Acceso: sep.10.2020].

Las ventajas de este tipo de reactor son [11]:

- ❖ Soporte de altas cargas orgánicas.
- ❖ Producción de biogás.
- ❖ No requiere medio de soporte o medio filtrante.
- ❖ Bajos costos en comparación con los demás procesos.
- ❖ Construcción simple.
- ❖ Puesta en marcha rápida (con un inóculo adecuado).
- ❖ Aplicable a diversas escalas y tipos de agua residual.

1.2.3 Tipos de fotobiorreactores

Los fotobiorreactores son mecanismos utilizados para la producción de microorganismos fotosintéticos, es decir, seres que toman fuentes de luz natural o artificial para su desarrollo metabólico, como por ejemplo las microalgas.

El diseño de un fotobiorreactor se lleva a cabo según el tipo de sistema de cultivo (sistema abierto y sistema cerrado). En los sistemas abiertos, el cultivo de microalgas está en contacto con la atmósfera. Se caracterizan por ser montajes económicos, pero su rendimiento es bajo debido a que no poseen un control estricto internamente y son susceptibles a la contaminación del medio por parte de otros microorganismos. Mientras que, en los sistemas cerrados, el cultivo se mantiene totalmente aislado del medio exterior. Además, tienen productividad alta al proporcionar mayor control de las condiciones de crecimiento para las microalgas.

Según Pulz, Otto y Scheibenbogen [12], los parámetros críticos que afectan al diseño de los fotobiorreactores son los siguientes:

- ❖ Capacidad para reutilizarse (facilidad de limpieza y reutilización).
- ❖ Material de construcción (resistente, inerte, tolerante al daño por pH, temperatura y salinidad).
- ❖ Iluminación (penetración e intensidad de la luz, fotoperiodo e intermitencia).
- ❖ Mezcla (una mezcla pobre da lugar a un aumento del ensuciamiento y de la concentración de oxígeno).
- ❖ Aireación (número y tamaño de las burbujas, transferencia de materia).
- ❖ pH (solubilización de CO₂, envejecimiento del cultivo, composición del medio).
- ❖ Temperatura (efecto de la luz, eliminación del exceso de calor).

Según Morán [13], las tecnologías de fotobiorreactores algales más importantes son de placas planas y tubulares. Todas ellas están enfocadas en conseguir una razón superficie a volumen lo más elevada posible para mejorar la eficiencia fotosintética y, en consecuencia, una buena productividad de biomasa.

- a. Fotobiorreactor de placas planas: los reactores de placas planas (*“Flat Plate Reactors”* o FPR) siguen un concepto de diseño simple que busca un uso eficiente de la luz. Están formados por paneles estrechos contruidos para lograr una relación área a volumen alta. Estas placas o paneles forman un sistema mediante la conexión de unas con otras. Dichas conexiones también son utilizadas para introducir gas y sustancias nutritivas. La introducción del CO₂ se suele realizar por la parte baja del panel para asegurar que tenga suficiente tiempo para interactuar con las algas. En general, las principales ventajas de estos fotobiorreactores son su alta productividad y una distribución uniforme de la luz.

- b. Fotobiorreactor tubular vertical: los reactores de columna de burbujeo son los ejemplos más típicos de fotobiorreactores tubulares verticales (*“Vertical Tubular Reactors”* o VTR). Se trata de una columna cilíndrica fabricada en un material transparente, normalmente polietileno o vidrio ya que permiten una buena penetración de luz y son relativamente baratos.

- c. Fotobiorreactor tubular horizontal: un reactor tubular horizontal está formado por haces de tubos horizontales conectados como un sistema de tuberías. El fluido algal suspendido es capaz de circular por esta línea de tuberías. Los tubos se suelen fabricar de plásticos transparentes o vidrio de borosilicato y la circulación se mantiene constante mediante una bomba localizada al final del sistema. La transferencia de gas tiene lugar en las conexiones entre tubos o en unidades de intercambio de gas especialmente diseñadas para este propósito.

- d. Fotobiorreactor tubular helicoidal: esta clase de fotobiorreactores son una buena alternativa a los tubulares rectos. La configuración más ampliamente utilizada es la conocida como Biocoil. Está compuesto por una serie de tubos de polietileno bobinados en una estructura abierta cilíndrica acompañada de una torre de intercambio de gases y un intercambiador de calor.

Las ventajas que presenta la implementación del fotobiorreactor son [12]:

- ❖ El burbujeo de aire a través del medio líquido facilita la transferencia de masa, enriqueciendo el medio con algún gas o por lo contrario despojándose de gases residuales de reacción.
- ❖ El bajo consumo energético, la facilidad de construcción y de escalamiento han hecho que estos reactores sean extensamente usados para tratamientos de agua residuales y fermentaciones aerobias.
- ❖ El reemplazo de una agitación mecánica por una neumática.
- ❖ Esta cualidad ha sido aprovechada para cultivar células o tejidos frágiles que se dañarían en reactores agitados con aspas.
- ❖ Construcción sencilla, de fácil mantenimiento y gran eficiencia energética por lo que su diseño no involucra ejes o motores eléctricos.

1.3 Microalgas y la especie *Chlorella vulgaris*

“Las microalgas son en general organismos fotoautótrofos, es decir, obtienen la energía de la luz proveniente del sol y se desarrollan a partir de materia inorgánica. Sin embargo, algunas especies son capaces de crecer empleando materia orgánica como fuente de energía o de carbono” [14]. De acuerdo a lo mencionado, en breves palabras las microalgas son microorganismos fotosintéticos capaces de transformar la energía solar en energía química.

“En general tienen gran eficiencia en la fijación de dióxido de carbono y la utilización de energía solar para producir biomasa, con una eficiencia superior a la de las plantas. La importancia de las microalgas radica en su papel como productoras primarias de la cadena trófica, que las convierte en las primeras productoras de materia orgánica” [10].

1.3.1 Características metabólicas

De acuerdo a los modos de nutrición de las algas, ya sea por medio de carbono o energía, están divididas en autótrofo o heterótrofo.

a. Autótrofos: *“Son organismos que obtienen todos los elementos necesarios para crecer a partir de compuestos inorgánicos y energía por medio de luz (fotoautótrofa) o la oxidación compuestos inorgánicos o iones (quimioautótrofa)”* [15].

b. Heterótrofos: *“Los organismos heterótrofos obtienen su materia y energía de los compuestos orgánicos sintetizados por otros organismos. Existen varios tipos de heterotrofia, la quimioheterotrofia (organotrofia): la energía es obtenida por oxidación de compuestos orgánicos que también sirven como fuente de carbono; mixotrofia: la luz es la principal fuente de energía, de manera paralela los compuestos orgánicos y/o el dióxido de carbono son indispensables; fotoheterotrofia: se requiere indispensablemente de la luz para asimilar los compuestos orgánicos”* [15].

A partir de lo mencionado, las microalgas están divididas en dos grupos según su modo de nutrición, autótrofo o heterótrofo, en donde el crecimiento de éstas se puede generar a partir de la luz, materia inorgánica o materia orgánica, como su principal fuente de energía, como es mostrado en la **Tabla 3**.

Tabla 3.*Principales características metabólicas de las microalgas.*

Modo de nutrición (Regímenes)	Características metabólicas				
	Fuente Energética	Fuente de Carbono	Respiración	Donador de electrones	Requerimientos de luz
Autótrofo					
Fotoautotrófico oxigenico	Luz	CO ₂	Aeróbica	H ₂ O	Obligado
Fotoautotrófico anoxigenico	Luz	CO ₂	Anaeróbica	H ₂ , H ₂ S	Facultativo
Quimioautotrófo	N, S y Fe inorgánicos	CO ₂	Anaeróbica	H ₂ , H ₂ S	Nulo
Heterótrofo					
Fotoheterotrófico	Luz	CO ₂ C-orgánico	Aeróbica	C-orgánico	Obligado
Quimioheterotrófico	C-orgánico	C-orgánico	Aeróbica	C-orgánico	Nulo
Mixotrófico	Luz C-orgánico	CO ₂ C-orgánico	Aeróbica	C-orgánico	Facultativo

Nota. La tabla muestra las diversas características metabólicas que puede contener cada microalga según el modo de nutrición. Tomado de: "Eliminación de nutrientes para el tratamiento biológico de agua residual en crecimiento autotrófico, heterotrófico y mixotrófico, [En línea]. Disponible: https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/258/1/perez_r.pdf. [Acceso: sep.10.2020].

1.3.2 Ventajas de su implementación

Las microalgas actualmente presentan una gran importancia debido a que son microorganismos caracterizados por su rápido crecimiento, además de su potencial uso en la eliminación de contaminantes y en la producción de biomasa con fines comerciales para la producción de biocombustibles como biometano y bio-hidrogeno. Dentro de las ventajas al hacer uso de dicho microorganismo, encontramos las siguientes:

- ❖ Eficientes en la reducción de DBO y DQO, igualmente, proporcionan oxígeno a las bacterias que intervienen en la biotransformación [16].
- ❖ Eficaces en la remoción de nitrógeno y fósforo en aguas residuales, debido a que son nutrientes necesarios para la generación de biomasa.

- ❖ “Tienen una rápida velocidad de crecimiento y su capacidad de captura de dióxido de carbono, la cual es 10 veces más rápida que una planta normal” [17].
- ❖ Generan bajos costos durante su cultivo, ya que principalmente solo requieren de luz como su fuente energética, dióxido de carbono como fuente de carbono.
- ❖ Requieren de menores áreas de cultivo al presentar tamaños reducidos en promedio de 5 a 50 μm .
- ❖ “Son destinadas principalmente a aplicaciones de valor agregado, ya que la biomasa microalgal, además de contener proteínas, lípidos esenciales, pigmentos, carbohidratos, minerales y vitaminas, posee excelentes cualidades para la obtención de productos naturales” [18].

1.3.3 Microalga *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris es una microalga que pertenece al phylum Chlorophyta, familia Chlorellaceae. Estas microalgas constan de una sola célula, su forma es esférica sin flagelos. Su tamaño oscila entre 2 y 10 micras, y es caracterizada por tener un color verde oscuro, y “sus cloroplastos presentan como pigmentos fotosintéticos principales clorofila a y b, los cuales tienen un pico de absorción máximo alrededor de 430 nm y de 675 nm” [19]. Además, puede crecer de forma fotoautótrofa, mixotrófica y heterotrófica con una alta acumulación de biomasa “Con respecto a su reproducción es de manera rápida, debido a que solo requiere agua, corriente de dióxido de carbono, luz (artificial o natural) y pequeñas cantidades de minerales para llevar a cabo una fotosíntesis efectiva” [20].

1.3.4 Parámetros de cultivo.

Para mantener un adecuado crecimiento microalgal, es importante conocer sobre las condiciones óptimas y los límites de tolerancia de cada una de éstas, es decir, para lograr que un cultivo de microalgas tenga un crecimiento activo se deben tener en cuenta factores como luz, temperatura, inóculo, fuente de carbono, nutrientes y pH,

entre otros. A continuación, se describirán factores que se deben considerar para el cultivo.

a. Luz: “Este factor es importante en todo cultivo de microalgas, debido a que representa la fuente de energía para la fotosíntesis, en donde la intensidad lumínica, longitud de onda y el fotoperíodo, afectan el crecimiento y el metabolismo microalgal” [14].

La intensidad lumínica es importante para el cultivo, debido a que el aumento de este parámetro, incrementa la fotosíntesis, hasta alcanzar la máxima tasa de crecimiento específica para cada tipo de especie, en el punto de saturación por luz. “Al momento de pasar este punto, se genera fotoinhibición, provocando deficiencias en las células, incluso la muerte, lo que ocasiona una pérdida de eficiencia fotosintética y productividad del cultivo” [16].

Por otro lado, el fotoperíodo es el ciclo más importante en la mayoría de los sistemas microalgales, debido a su implicación en procesos de absorción de nutrientes, división celular e incluso la bioluminiscencia en ciertas especies, además del desarrollo de reacciones fotoquímicas y enzimáticas que se dan específicamente en ciertos periodos de luz u oscuridad [21].

Para el caso de la especie empleada en este estudio, se ha demostrado que la eficiencia de luz-biomasa son favorables entre valores de 650 y 22200 lx para el crecimiento de *Chlorella vulgaris*.

b. Temperatura: El aumento de la temperatura incrementa proporcionalmente la producción de biomasa, hasta alcanzar la temperatura óptima de cada especie. Si este parámetro sobrepasa el óptimo, podría aumentar la fotorrespiración lo cual generaría un descenso en la productividad del cultivo. La temperatura óptima depende del tipo de especie, pero generalmente se encuentra en un rango de 28°C y 35°C [16].

La mayoría de microalgas tienen una curva de crecimiento en forma de meseta con respecto a la respuesta del aumento de la temperatura, es decir, reflejan un

decrecimiento posterior a la temperatura óptima, junto con un efecto inhibitorio, inclusive con tan sólo 2 o 3°C arriba de este valor [21].

c. pH: “Este es también un factor importante 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” [21].

El pH óptimo de las microalgas es de 7,5 el cual se incrementa de acuerdo a la acumulación de minerales y de oxidación de nutrientes, con respecto a la microalga *Chlorella vulgaris*, según investigaciones previas la microalga presenta crecimiento cuando su pH está entre 6,5 a 8,3, presentando mejores resultados en un rango de pH de 7,0 y 7,5 [22].

d. Nutrientes: El nitrógeno es el nutriente más importante para las microalgas después del carbono, el contenido de este compuesto de biomasa se puede suponer desde 1% hasta más del 10%, dependiente de la disponibilidad y la fuente de nitrógeno, en general se encuentra incorporado como nitrato, amonio, urea, nitrito, nitrógeno gas y óxidos de nitrógeno en algunos casos. Este factor es crítico para regular el contenido de lípidos de las microalgas [23].

Por otro lado, las microalgas pueden emplear como fuente de carbono el CO₂ presente en la atmósfera, así como los iones bicarbonato con la ayuda de una enzima llamada anhidrasa carbónica. “Para la especie *Chlorella* se ha demostrado que pueden tolerar hasta 400000 ppmv de CO₂ en aire. Ciertos sistemas de cultivo inyectan aire enriquecido en dióxido de carbono en el reactor” [23].

El fósforo es otro de los macronutrientes de vital importancia en el crecimiento microalgal. Aunque el contenido de fósforo en las microalgas es menor al 1%, su deficiencia en el medio de cultivo es una de las mayores limitaciones al crecimiento. En los medios de cultivo suele incorporarse en forma de HPO₄²⁻ o HPO₄⁻ [16].

Además de los nutrientes mencionados para un adecuado crecimiento de dichas especies, se requiere de otros macronutrientes como azufre, calcio, magnesio y

potasio, así como de micronutrientes como hierro, níquel, cobre, zinc, manganeso, boro y cloro.

2. VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL FOTOBIORREACTOR

Gran parte de las investigaciones en tecnologías renovables se han desarrollado basadas en tratamientos anaerobios para la producción de biomasa a partir de microalgas como alternativa para promover el uso de residuos orgánicos como fuente energética que, posterior a su transformación, suplirá diversas necesidades cotidianas y a su vez ayudará a la preservación y cuidado del medio ambiente.

Bajo este contexto y de acuerdo a múltiples investigaciones, será objeto de estudio la microalga *Chlorella vulgaris* por sus características, rápido crecimiento y alta generación de biomasa, como pieza fundamental para la construcción del sistema que consta de un reactor tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)* y un Fotobiorreactor (FBR) a nivel laboratorio.

De igual forma, para el desarrollo correcto del proceso, además de tener en cuenta las características de la especie seleccionada, se deben considerar parámetros específicos en el fotobiorreactor de: temperatura, pH, intensidad lumínica y fotoperiodo, los cuales son factores limitantes hoy en día para la generación de biomasa a partir de microorganismos sintéticos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a realizar una revisión sistemática y un metaanálisis para la determinación y selección de los rangos de los factores con mayor influencia en el sistema, tomando como referencia la metodología *Systematic Review*, propuesta en el artículo “Temperature measurements with a temporal scanner: systematic review and meta-analysis” escrito por *Håkan Geijer, Ruzan Udumyan, Georg Lohse, Ylva Nilsagård* [24].

2.1. Métodos y materiales

2.1.1 Identificación del estudio

La revisión sistemática se llevó a cabo en diferentes bases de datos electrónicas. Las principales fuentes de búsqueda fueron las siguientes: Elsevier (www.sciencedirect.com), ResearchGate (www.researchgate.net) , Google académico (www.Scholar.google.es), Scopus (www.scopus.com) y Lumieres:

Repositorio digital institucional (publicaciones académicas). En dichas fuentes, se desarrolló una búsqueda delimitada con el uso de palabras claves: *Chlorella vulgaris* y fotobiorreactor, filtrando los documentos que nos permitieran recopilar información con relación a los parámetros para el crecimiento y producción de la microalga en un FBR.

2.1.2. Selección de estudios

En primer lugar, para la selección de información bibliográfica, entre dos revisores realizaron de forma individual una verificación rápida del título y resumen del contenido, excluyendo los textos que no presentaran relación con la temática de interés.

En segundo lugar, con los documentos restantes se procedió a realizar una lectura completa, en donde se seleccionaron los textos que cumplieran con los criterios de inclusión planteados por los revisores.

Los criterios para la inclusión de un texto investigativo fueron los siguientes:

- ❖ Tipo de microalga: *Chlorella vulgaris*.
- ❖ Parámetros de cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* (Temperatura, pH, intensidad lumínica y fotoperiodo).
- ❖ Microalga *Chlorella vulgaris* dentro de un FBR.

Los criterios para la exclusión de un texto investigativo fueron los siguientes:

- ❖ Tipo de microalga diferente a *Chlorella vulgaris*.
- ❖ Sistema biológico distinto a un FBR para la producción de microalgal.
- ❖ Idioma de texto diferente a inglés y español.

Posterior a esto y para finalizar la revisión sistemática, de cada uno los textos elegidos como fuente de información para el análisis final, se recopilaron los siguientes datos: autor, año de publicación, fuente de búsqueda y parámetros de respuesta

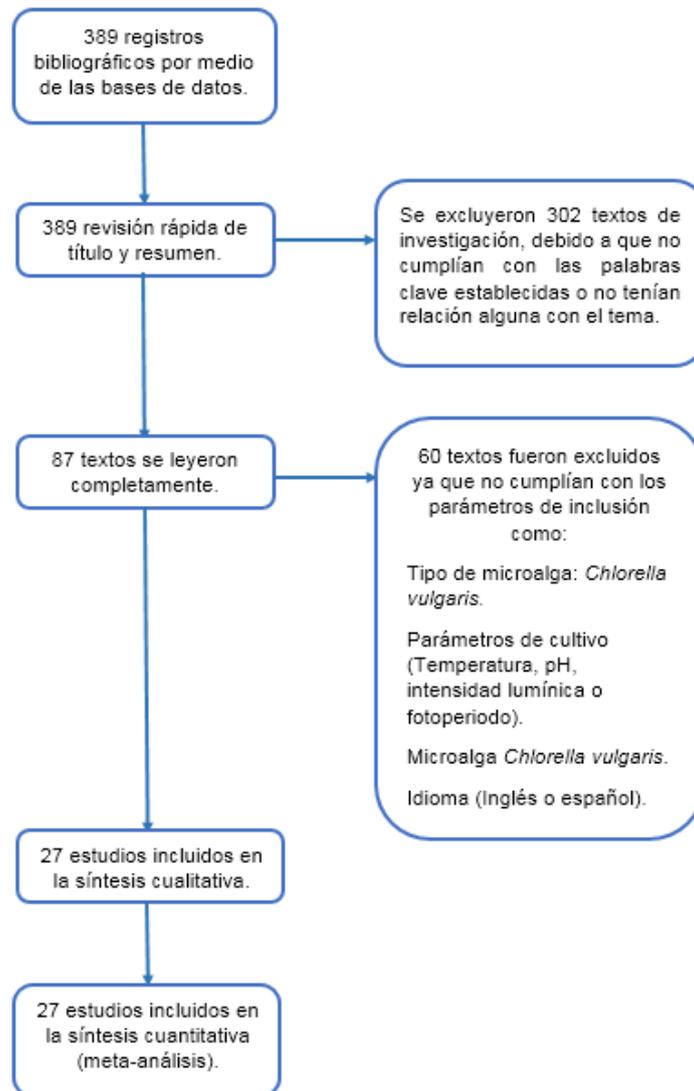
(temperatura, pH, intensidad lumínica o fotoperiodo) como factores óptimos para el crecimiento de la biomasa microalgal. De igual manera, no se tuvo en cuenta restricciones como la fecha de publicación y la ubicación geográfica de los documentos.

2.2. Resultados

La búsqueda de información en la literatura resultó en 389 textos de investigación. Después de la revisión del título y resumen del contenido, se eliminaron 302 de éstos al no cumplir con los parámetros establecidos anteriormente y los restantes fueron seleccionados para lectura de contenido completo. De estos, 27 artículos cumplieron los criterios de inclusión y fueron elegidos para el análisis final, el cual consiste en leer detenidamente los textos y extraer la información relacionada con las variables de interés. El proceso de selección se muestra en la **Figura 2.** y las características recopiladas de los textos para el estudio se muestran en la **Tabla 4 y 5.**

Figura 2.

Diagrama de flujo del proceso de selección.



Nota. La figura evidencia paso a paso el proceso de selección llevado a cabo en la revisión sistemática.

Tabla 4.

Características de estudio tenidas en cuenta en los 27 textos bibliográficos.

DATO	AUTOR	AÑO DE PUBLICACIÓN	FUENTE
1	R. Ramaraj, Y. Unpaprom y N. Dussadee.	2016	Research Gate
2	M. Forrest-Blair, B. Kokabian y V. Ganeswar-Gude.	2014	Elsevier
3	D.Rubio-Fernández, M.C.Angel Cruz y W.Y. Pimienta Blanco.	2013	Lumieres: Repositorio Digital Institucional
4	J.C Tovar-Salamanca, J.P.Ruiz Díaz.	2016	Lumieres: Repositorio Digital Institucional
5	S.D.Marzieh-Molazadeha y H.Hosseini-Ahmadzadehb.	2019	Elsevier
6	E.A. Olarte-Gómez, M.J. Valencia-Giraldo.	2016	Google Académico
7	M.Hernández-Ramírez.	2017	Google Académico
8	P.A Rodríguez-Ramos, et. al.	2015	Google Académico
9	M. Šoštarič, J. Golob, M. Bricelj, D. Klinar, y A. Pivecc	2009	Research Gate
10	J.A. Piedrahita-Hernández y S. Urbano-Montes.	2012	Google Académico
11	P.M. Rodríguez-Aliaga.	2016	Google Académico
12	S. Daliry, A. Hallajisani, J. Mohammadi Roshandeh, H. Nouri, A. Golzary.	2017	Research Gate
13	YK. Wong, YK. Ho, HM.Leung y KKL. Yung.	2017	Google Académico
14	L.Blinová, A.Bartosova y K. Gerulová.	2015	Google Académico
15	M.Greque de Morais y J.A. Vieira Costa.	2007	Scopus
16	C.Dae-Hyun, R.Ramanan, J.Heo, S.Dong-Sik, O.Hee-Mock y K.Heesik.	2016	Scopus
17	P.Nirguna-Babu y P. Binnal.	2015	Scopus
18	T. Niedervieser, P. Kocielek y D. Klaus.	2017	Scopus
19	I. Perner-Nochta, A. Lucumi y C. Posten.	2007	Scopus
20	A.H. Scragg, A.M. Illman, A. Carden y S.W. Shales.	2002	Scopus
21	A.Ioannis-Dimosthenis, et.al	2018	Scopus
22	L.-D. Zhu, Z.-H. Li, D.-B. Guo, F. Huang, Y. Nugroho y K. Xia.	2016	Scopus
23	S.Eixler, U.Karsten y U. Selig.	2006	Research Gate
24	L.-M. Serrano-Bermúdez, et. al	2011	Research Gate
25	K. Castro, E. Ortiz y D. Rubio.	2014	Lumieres: Repositorio Digital Institucional
26	D. Rubio, C. Alcalá y I. Guauque.	2013	Lumieres: Repositorio Digital Institucional
27	D. Rubio-Fernández y G.A. Hernández	2016	Lumieres: Repositorio Digital Institucional

Nota. Esta tabla muestra el nombre del autor, año de publicación y la fuente de recopilación de los 27 textos seleccionados.

Tabla 5.*Parámetros recopilados de cada texto bibliográfico.*

DATO	VARIABLES						FOTOPERIODO (Luz/Oscuridad)
	TEMPERATURA (°C)		pH		INTENSIDAD LUMÍNICA (LUX) FLUORESCENTE		
	MÍNIMA	MÁXIMA	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMA	MÁXIMA	
1	29	31	8,2	8,6	3700	-	16:8
2	25	-	7	-	-	20424	-
3	24	-	6,3	7,5	12000	-	12:12
4	20	25	7	7,5	650	22200	-
5	24	26	6	7	3552	-	12:12
6	23	27	7	8	-	-	12:12
7	-	31	7	-	-	73898	13:11
8	18	22	6	8	1443	-	-
9	-	25	-	-	7400	8800	12:12
10	-	25	6,8	7,2	-	-	-
11	20	-	7	-	-	-	-
12	-	30	9	10	5000	-	16:8
13	22	28	-	-	5920	-	-

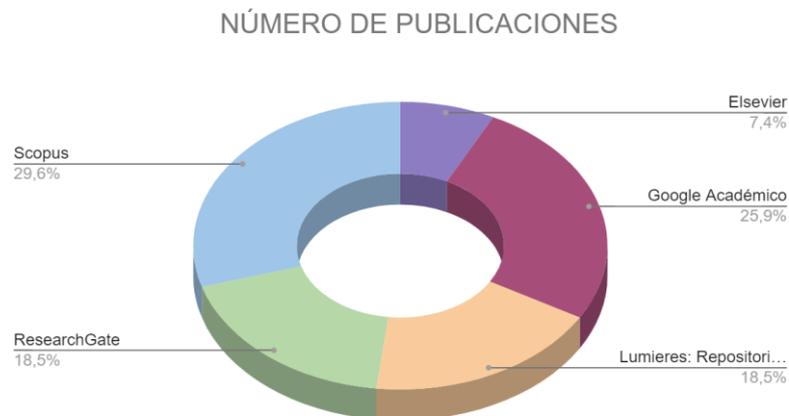
14	28	32	7	9	7400	18500	-
15	-	30	5,5	6	3200	-	12:12
16	25	-	6,5	7	7400	11100	-
17	27	-	-	7,4	6000	-	10:14
18	29	31	4	10	11100	25900	12:12
19	24	25	6	7	11100	-	-
20	25	-	6	-	5624	-	16:8
21	20	-	7,5	-	11100	-	12:12
22	24	26	6,8	-	17020	19240	-
23	20	-	-	7,2	7400	-	-
24	22	24	-	-	3750	3790	16:8
25	20	25	6,7	7	-	-	12:12
26	24	26	6,6	6,9	-	-	12:12
27	-	25	7	7,5	8W	-	12:12

Nota. Esta tabla muestra parámetros como la intensidad lumínica, temperatura, pH y fotoperiodo recopilados de cada texto.

De acuerdo con la **Tabla 4.** y la información expuesta en ella, se elaboraron una serie de gráficos que permiten un análisis estadístico acerca de los textos bibliográficos recopilados.

Figura 3.

Gráfica número de publicaciones por fuente de publicación.



Nota. La figura representa número de publicaciones por fuente de publicación.

En la **Figura 3**, se evidencian las 5 bases de datos (Scopus, Google académico, ResearchGate, Lumieres:Repositorio y Elsevier) tenidas en cuenta para el estudio, en donde Scopus presenta el mayor porcentaje (29,6%), al ser utilizada como la principal fuente de búsqueda confiable y ser considerada una plataforma diversa con un gran número de publicaciones relacionadas con la temática de interés.

Figura 4.

Gráfica número de publicaciones por año de los textos a analizar.



Nota. La figura representa el número de publicaciones por año de los textos seleccionados para el estudio.

En la **Figura 4** se evidencia que los textos seleccionados para este estudio se encuentran dentro de un rango de años de 2002 a 2019, en el año 2016 se presenta el más alto número de publicaciones en relación a la temática de interés. De igual forma cabe resaltar, que para la selección de textos finales no se tuvo en cuenta el año de publicación, ya que el contenido era lo relevante en cada uno de estos.

2.2.1. Selección de textos

Para la determinación de los textos que permitieron la elección adecuada de los parámetros influyentes para el crecimiento de biomasa de la microalga *Chlorella vulgaris*, se tuvo en cuenta el número de citas de cada documento a través de las herramientas proporcionadas por Scopus y Google académico, y, por otro lado, el número de publicaciones por autor por medio de la herramienta Google citations.

Figura 5.

Gráfica número de citas por texto a analizar.



Nota. La figura representa el número de citas por texto seleccionado para el estudio.

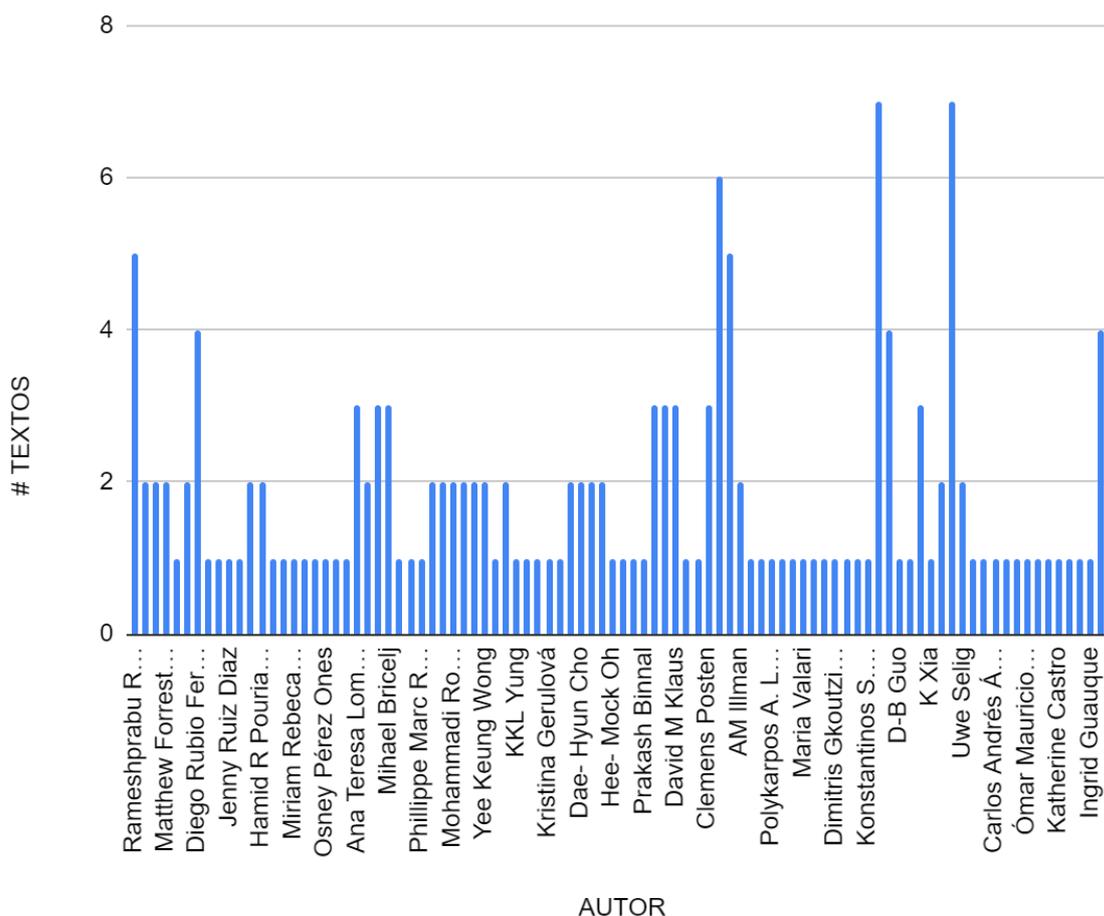
Por medio de la **Figura 5.**, los textos que tienen mayor relevancia en el estudio son los que presentan un número significativo de citas, debido a que proporciona alta credibilidad al momento de la recolección de los datos. Por ejemplo, el documento 15 y el documento 20, con un número de citas de 194 y 349, respectivamente, son textos que se tomarán como base para la determinación de parámetros en comparación con los demás documentos.

Los documentos que se tendrán en cuenta según este criterio son los siguientes:

1. Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production by *Matthew Forrest Blair, Bahareh Kokabian, Veera Gnaneswar Gude* [25].
2. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina sp.* cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors by *Michele Greque de Moraes and Jorge Alberto Vieira Costa* [26].
3. Growth of microalgae with increased caloric values in a tubular bioreactor by *A. H Scragg, A.Millman, A Carden and S.W Shales* [27].

Figura 6.

Gráfica de autores de documentos relacionados con la temática de interés.



Nota. La figura representa la cantidad de textos que se relacionan con la temática de interés escritos por diferentes autores.

A partir de la **Figura 6.**, se puede concluir que los autores que presentan mayor número de publicaciones relacionadas con el estudio de la microalga *Chlorella vulgaris* son: Diego Rubio Fernández, Ulf Karsten, Zhaohua Li, Liandong Zhu, AH Scragg, SW Shales y Rameshprabu Ramaraj.

Acorde con esta variable, los textos que se considerarán por autor son:

1. Evaluación de la incidencia de la temperatura en la producción de lípidos obtenidos a partir de biomasa microalgal a escala laboratorio escrito por *Camilo Alcalá, Ingrid Guauque y Diego Rubio Fernández* [28].
2. Determinación de incidencia de la relación carbono: nitrógeno en la producción de biomasa y ácidos grasos de la microalga *Chlorella vulgaris* a escala de laboratorio escrito por *Katherine Castro, Elkin Ortiz y Diego Rubio* [29].
3. Incidencia del nitrógeno en la producción de biomasa y ácidos grasos de la microalga *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de panel plano a escala laboratorio escrito por *Diego Rubio Fernández, María Camila Ángel y Wendy Pimienta* [30].
4. Cultivation of green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas purification by *Rameshprabu Ramaraj, Yuwalee Unpaprom and Natthawud Dussadee* [31].
5. Cultivation of *Chlorella* sp. with livestock waste compost for lipid production by *L.-D. Zhu, Z.-H. Li, D.-B. Guo, F. Huang, Y. Nugroho and K. Xia* [32].

Igualmente, se tuvieron en consideración otros textos adicionales importantes, por razones particulares en relación con los efectos de los parámetros (temperatura, fotoperiodo, pH, intensidad lumínica) en el crecimiento y estabilización del cultivo de la microalga de interés.

1. Lipid productivity of microalgae *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis oculata* in externally illuminated lab scale photobioreactor by *P. Nirguna Babu* and *Prakash Binnal* [33].
2. Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth by *Abooli Golzary* [34].

2.3 Determinación cuantitativa de los parámetros del estudio

La determinación cuantitativa de los parámetros fue proporcionada por la revisión y comparación de textos que fueron seleccionados según los criterios mencionados anteriormente.

2.3.1 Variables que afectan el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*

Las variables que se consideraron importantes según la revisión bibliográfica, para estabilizar y proporcionar un adecuado crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* en el FBR son: temperatura, pH, intensidad lumínica y fotoperiodo.

La recopilación de los parámetros determinados en la revisión sistemática para el cultivo microalgal en el FBR, son evidenciados en la **Tabla 6**.

Tabla 6.

*Parámetros finales para el crecimiento de la especie *Chlorella vulgaris*.*

PARÁMETRO	CANTIDAD	REFERENCIAS
Temperatura	24 a 26°C	[28],[29],[30],[33].
pH	6,5 a 7,5	[26],[28],[33],[35].
Intensidad lumínica	1000 lx a 12000 lx	[31],[33].
Fotoperiodo	12:12	[26],[28],[29],[30],[33].

Nota. La tabla evidencia los parámetros finales seleccionados para el crecimiento exponencial de la microalga *Chlorella vulgaris*.

a. Efecto de la temperatura en el cultivo.

Para un medio de cultivo mixotrófico en presencia de microalgas y bacterias, la temperatura es uno de los parámetros fundamentales para la adecuación, crecimiento y productividad de la biomasa. Es por esto que es de vital importancia determinar un rango óptimo de temperatura, donde se evite la limitación de velocidad de crecimiento y la reducción de la producción de biomasa.

Con ayuda de los textos bibliográficos, el rango óptimo de temperatura para la especie *Chlorella vulgaris* se encuentra entre 24 °C y 26°C. Este rango se determinó teniendo en cuenta que, a valores inferiores y superiores a éste, puede presentarse una disminución sustancial en el crecimiento. Además, como referencia se presenta el artículo *“Evaluación de la incidencia de la temperatura en la producción de lípidos obtenidos a partir de biomasa microalgal a escala laboratorio”* [28], el cual presenta una productividad de biomasa de 0,11 g biomasa/ día*L cuando la especie de *Chlorella vulgaris* trabaja en este rango de temperatura, lo que proporciona la mayor eficiencia (85,47%) en comparación con los demás rangos de temperatura evaluados.

b. Efecto del pH en el cultivo.

“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” [35].

De acuerdo con esta información, se estableció que el pH óptimo para el medio de cultivo es de 6,5 a 7,5, teniendo en cuenta que estos valores permitieran un crecimiento exponencial de la especie, ya que, si no se controla, los valores altos de esta variable requerirán mayor cantidad energética disponible por célula que no se utilizará eficientemente por las microalgas [35]. Por ejemplo, en el artículo *“Lipid productivity of microalgae Chlorella vulgaris and nannochloropsis oculata in externally illuminated lab scale photobioreactor.”* [33], se evidencia que la productividad de biomasa es baja cuando se encuentra en rangos menores a 6,5, mientras que la mayor productividad (0,248 g/día*L) se da un medio de cultivo con un pH 7,2, sin

embargo, cabe resaltar que en el rango seleccionado anteriormente se evidencia alta productividad de biomasa de la microalga *Chlorella vulgaris*.

c. Efecto de la intensidad lumínica

La intensidad lumínica es uno de los principales factores en cultivo de microalgas, tanto por su aporte de forma individual como por sus interacciones con otros parámetros. Ésta ayuda a la proliferación celular, respiración celular y fotosíntesis al estar relacionada con las reacciones fotoquímicas de los metabolismos del microorganismo.

Acorde con la literatura, el rango óptimo de intensidad lumínica para esta especie, es de 370 lx hasta 18500 lx [36]. Sin embargo, a nivel laboratorio, se encuentran estudios en donde manejan rangos desde 1000 lx hasta 12000 lx, y en exteriores se pueden encontrar valores mucho más altos (17000 lx aproximadamente). Dentro de este rango, se obtiene un sistema eficiente al tener en cuenta las características propias de cada especie y el espacio en el que se desarrolla, 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 [36]. La fuente lumínica adecuada para el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* a nivel laboratorio, son lámparas blancas fluorescentes al ser elementos con bajos costos, mayor vida útil y sin presencia de emisiones ultravioleta e infrarrojas [36].

Para corroborar el rango establecido, se tiene en cuenta el artículo "*Lipid productivity of microalgae Chlorella vulgaris and nannochloropsis oculata in externally illuminated lab scale photobioreactor.*" [33], en donde se evidencian varios tratamientos a diferentes intensidades de luz, arrojando que aproximadamente a 6000 lx se presenta la mayor productividad de biomasa (0,284 g/día*L), valor que se encuentra en el rango seleccionado.

d. Efecto del fotoperiodo

El fotoperiodo es el ciclo ambiental más importante en la mayoría de los sistemas

microalgales, no solo por las consecuencias del cultivo a la luz, sino por su influencia en 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 proporciones 12:12 (Luz/oscuridad) a nivel laboratorio.

Mediante el artículo "*Lipid productivity of microalgae Chlorella vulgaris and nannochloropsis oculata in externally illuminated lab scale photobioreactor.*" [33], se evidenció que el ciclo de luz/oscuridad 12:12 proporciona una productividad de biomasa de 0,248 g/día*L, la cual presenta la más eficiente en comparación con proporciones de 16:8 y 14:10.

3. BIORREACTORES UASB Y FBR

Para la determinación del diseño conceptual del sistema que consta de un reactor tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)* y un Fotobiorreactor (FBR) a nivel laboratorio, se empleó la metodología planteada en el artículo “*Design of Wastewater Treatment Plants Using a Conceptual Design Methodology*” [37], donde se evidencia el proceso de decisión jerárquica que propone desglosar el proceso de diseño conceptual en varias actividades.

De acuerdo con lo anterior, la metodología de diseño llevada a cabo en este estudio se dividió en las siguientes tareas para cada biorreactor:

1. Objetivo del biorreactor.
2. Consideraciones de diseño.
3. Alternativas del diseño.
4. Evaluación de las alternativas.
5. Análisis y selección de las alternativas.

3.1 Diseño conceptual del biorreactor UASB

3.1.1 Objetivo del biorreactor

El objetivo principal propuesto para llevar a cabo el diseño estructural del biorreactor UASB fue determinar las características y parámetros para el adecuado funcionamiento que permita una alta remoción de contaminantes con bajos costos de construcción y operación, así como la reducción de impactos ambientales.

3.1.2 Consideraciones de diseño

El correcto funcionamiento del proceso anaerobio puede verse afectado por algunas variables del agua residual, como lo es temperatura, mezclado, pH, alcalinidad y sólidos totales, entre otros.

Para controlar la operación del reactor anaerobio, según la revisión bibliográfica, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- a. Temperatura: en el biorreactor la temperatura óptima debe corresponder a condiciones mesofílicas en un rango aproximado de 30°C a 35°C. Debido a que en los reportes encontrados se evidencia que a temperaturas superiores de 37°C a 55°C se presenta una eliminación ineficaz de DQO [38]. La temperatura es un factor que influye en la actividad metabólica de la población de microorganismos, en la tasa de transferencias de gases y en las características de sedimentación de los sólidos.
- b. pH: el rango óptimo establecido es de 6,7 a 7,4 ya que, dentro de este la actividad de las bacterias productoras de metano presenta un rendimiento alto en el reactor. Sin embargo, se puede tener una ampliación de este rango de 6,0 a 8,0 sin generar alteraciones significativas en el sistema [38].
- c. Nutrientes: el nitrógeno y el fósforo, son esenciales para el crecimiento biológico dentro del reactor. Para una tasa alta de crecimiento de los microorganismos, el fluido de alimentación (aguas residuales) deberá contener gran cantidad de macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes. Según Metcalf & Eddy [39], el agua residual debe ser compuesta de carbono, nitrógeno y fósforo, teniendo en cuenta la siguiente relación, DQO: N:P, por ejemplo, para una operación en estado estable se tiene una composición de 600:5:1.

Además, se deben tener en cuenta dentro de los aspectos a considerar para el diseño del biorreactor las características de las aguas residuales en términos de la composición y contenido de sólidos, la carga orgánica volumétrica, la velocidad de flujo ascendente, el volumen del reactor y las características físicas como el sistema de distribución del efluente y el sistema de recolección de gas.

- d. Carga orgánica volumétrica: la carga orgánica volumétrica es el producto del caudal de alimentación por la concentración de la materia orgánica (DQO) del agua residual alimentada diariamente al reactor, dividido entre el volumen efectivo del reactor. La carga volumétrica se expresa en la **Ecuación 1**:

Ecuación 1.

Carga orgánica volumétrica.

$$COV = \frac{Q \cdot S_0}{V}$$

Nota. Se representa la ecuación correspondiente al cálculo del COV. Tomado de: Manual de agua potable y alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamientos de aguas residuales municipales: reactores anaerobios de flujo ascendente, [En línea]. Disponible: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/C_ONAGUA%202015.%20Manual%20Reactores%20anaerobios%20de%20flujo%20asce.pdf [Acceso: sep.12.2020].

Donde el COV es la tasa de carga orgánica volumétrica en kg de DQO/m³ d, Q es el caudal de entrada en m³/d, S₀ es la concentración de sustrato en el afluente en kg de DQO/m³ y V es el volumen total del reactor en m³.

Según Metcalf & Eddy [39], en la **Tabla 7.** se pueden evidenciar algunas de las cargas de DQO más utilizadas en reactores UASB a una temperatura de 30°C, donde comúnmente se logra alcanzar una remoción de contaminantes aproximada del 85% al 95%. Sin embargo, de esta búsqueda cabe resaltar que, para conseguir eficiencias de remoción de DQO del 90% al 95% es importante la alimentación de cargas orgánicas en un rango entre 12 y 20 DQO kg/m³ d a temperaturas de 30°C a 35°C.

Tabla 7.

Cargas volumétricas recomendadas para reactores UASB.

DQO mg/L de agua residual	Fracción de DQO particulada	Carga	Volumétrica	kgDQO/m ³ *d
		Lodo Floculento	Lodo granular con alta remoción de SST	Lodo granular con poca remoción de SST
1000 - 2000	0.10 – 0.30	2 – 4	2 – 4	8 – 12
	0.30 – 0.60	2 – 4	2 – 4	8 – 14
	0.60 – 1.00	na	na	na
2000 – 6000	0.10 – 0.30	3 – 5	3 – 5	12 – 18
	0.30 – 0.60	4 – 8	2 – 6	18 – 24
	0.60 – 1.00	4 – 8	2 – 6	na
6000 – 9000	0.10 – 0.30	4 – 6	4 – 6	15 – 20
	0.30 – 0.60	5 – 7	3 – 7	15 – 24
	0.60 – 1.00	6 – 8	3 – 8	na
9000 – 18 000	0.10 – 0.30	5 – 8	4 – 6	15 – 24
	0.30 – 0.60	na	3 – 7	na
	0.60 – 1.00	na	3 – 7	na

Nota. Esta tabla muestra las cargas volumétricas usadas para un reactor UASB. Tomado de: Manual de agua potable y alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamientos de aguas residuales municipales: reactores anaerobios de flujo ascendente, [En línea]. Disponible: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202015.%20Manual%20Reactores%20anaerobios%20de%20flujo%20asce.pdf [Acceso: sep.12.2020].

- e. Velocidad de flujo ascendente y altura del reactor: la velocidad ascensional del agua residual, se debe tener en cuenta tanto para el diseño como para la operación del biorreactor. Ésta se considera como la relación del caudal de alimentación dividido entre el área del reactor o la relación de altura del reactor y tiempo de residencia hidráulica. La máxima velocidad presente en el reactor depende del tipo de lodo en el lecho, como en la carga orgánica volumétrica (COV).

Por otro lado, la altura del reactor depende del tipo de lodos presentes, de la carga orgánica aplicada y de la carga hidráulica volumétrica.

Según Chernicharo de Lemos [39], los valores aproximados de velocidad de flujo ascendente recomendados en un UASB que trata aguas residuales domésticas (1000 mg/ l DQO), los encontramos en la **Tabla 8**.

Tabla 8.

Velocidades de flujo ascendente.

Gasto del afluente	Velocidad de flujo ascendente (m/h)
Flujo promedio	0.5-0.7
Flujo máximo	<0.9-1.1
Flujos picos temporales (*)	< 1.5

(*) Flujos picos de 2 a 4 h

Nota. Esta tabla la velocidad de flujo ascendente recomendados para el diseño de reactores anaerobios de flujo ascendente que tratan aguas residuales domésticas Tomado de: Manual de agua potable y alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamientos de aguas residuales municipales: reactores anaerobios de flujo ascendente, [En línea]. Disponible:https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202015.%20Manual%20Reactores%20anaerobios%20de%20flujo%20asce.pdf [Acceso: sep.12.2020].

- f. Tiempo de retención hidráulico: se define como el tiempo que permanece el agua residual dentro del reactor. Para el cálculo se emplea la **Ecuación 2.**

Ecuación 2.

Tiempo de retención hidráulico.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Nota. La ecuación es la utilizada para el cálculo del tiempo de retención hidráulico. Tomado de: Manual de agua potable y alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamientos de aguas residuales municipales: reactores anaerobios de flujo ascendente, [En línea]. Disponible:https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202015.%20Manual%20Reactores%20anaerobios%20de%20flujo%20asce.pdf [Acceso: sep.12.2020].

donde:

TRH = tiempo de residencia hidráulica en días

V = volumen del reactor

Q = caudal del efluente

- g. Porcentaje de remoción: En este sistema se debe garantizar un porcentaje de remoción de contaminantes entre 85% y 95%, que depende principalmente de la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico en el reactor [39].

3.1.3 Alternativas del diseño

A partir de la literatura, gran parte de los parámetros en el reactor UASB ya se encuentran definidos, por lo que las incertidumbres se reducen y las alternativas de diseño son limitadas. Sin embargo, para una buena construcción y mejora del sistema de remoción de contaminantes se tuvieron en cuenta dos parámetros en los que aún se presentan cierta indeterminación y duda con respecto a su influencia en el sistema.

El primer parámetro a evaluar, es el material utilizado en el diseño del reactor UASB, el cual debe construirse con la posibilidad de inspeccionar visualmente el contenido, ya que esto permite confirmar la granulación presente en el reactor e inspeccionar la formación de espuma o escoria [40], estas particularidades son fundamentales para llevar a cabo un control detallado durante el proceso al tratarse de un equipo a nivel laboratorio. Dichas características reducen significativamente la selección de materiales limitándose a polimetilmetacrilato (PMMA), vidrio de borosilicato y cloruro de polivinilo transparente (PVC).

Y, como segundo parámetro a cualificar, está el sistema de calefacción que tiene como función mantener las condiciones óptimas del sistema, permitiendo el desarrollo de los microorganismos anaerobios y logrando altos porcentajes de remoción de DQO. Además, proporciona el calor requerido al efluente conservando en un rango óptimo la temperatura. Las configuraciones que se considerarán para el sistema de calefacción son las siguientes [40]:

1. Chaqueta de agua.
2. Almohadillas o cintas de calefacción.

Tabla 9.

Alternativas para cada criterio en el reactor UASB.

CRITERIO	ALTERNATIVAS
Tipo de material	PMMA
	Vidrio de borosilicato
	PVC
Sistema de calefacción	Chaqueta de agua
	Almohadillas o cintas de calefacción

Nota. La tabla muestra las diferentes alternativas con respecto al tipo de material y al sistema de calefacción.

3.1.4 Evaluación de las alternativas

Para el análisis de las alternativas, se tuvieron en cuenta diversas características por criterio, que se darán a conocer en la **Tabla 10.** para el tipo de material y en la **Tabla 11.** para el sistema de calefacción de la siguiente manera:

Para identificar las peculiaridades del tipo de material y sistema de calefacción se tuvo como referencia los artículos [40],[41],[42].

Tabla 10.

Ventajas y desventajas de cada tipo de material para la construcción del UASB.

TIPO DE MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Bajo costo. Alta resistencia. Ópticamente claro.	Se raya fácilmente. Necesita de equipos de mecanizado. Necesita esterilización química.
Vidrio de borosilicato	Ópticamente claro. Lavable. No se degrada en presencia de rayos ultravioleta. Esterilizable en autoclave.	Material frágil. Material costoso. Sensible a las vibraciones. Requiere mantenimiento externo para reparar grietas.
Policloruro de vinilo (PVC)	Material claro. Mecanizable pero se derrite fácilmente. Material de bajo costo. Amplia disponibilidad en el mercado. Amplio conjunto de accesorios existentes para un montaje rápido.	Se degrada con el tiempo. Material frágil con el tiempo. Los microorganismos forman biopelículas en su superficie. No es estable a los rayos ultravioleta.

Nota. La tabla muestra las ventajas y desventajas correspondientes a PMMA, vidrio de borosilicato y PVC.

Tabla 11.

Características del sistema de calefacción acoplado al reactor UASB.

SISTEMA DE CALEFACCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Chaqueta de agua	Sistema de intercambio de calor. Opción más común para reactores con pequeños volúmenes. Complica la implementación de sensores para medición de alguna variable. Opción adecuada si no es necesario el muestreo del contenido en el reactor. Proporciona un buen coeficiente global de transmisión de calor. Dispone de área limitada para llevar a cabo la transmisión de calor. Requiere atención para evitar fugas de agua. Se coloca en la parte externa del reactor. No se recomienda trabajar con vapor de agua, debido a que parte del agua se perdería en forma de vapor.
Almohadillas o cintas de calefacción	Son de material de aislamiento térmico. Generan una mayor área de contacto, calefacción más uniforme. Opción más común para reactores con volumen grande. Evitar el uso en materiales PMMA y PVC, debido a que si existe punto de contacto entre ellos puede generar sobrecalentamiento u otro tipo de daño grave. Reducen la disipación de energía. Disminuye la observabilidad del proceso en los reactores. Evitan que el sistema que está siendo calentado se enfríe. Mantienen constante la temperatura del proceso.

Nota. La tabla muestra las características presentadas por cada sistema de calefacción.

Según lo mencionado, y tomando en consideración las características de carácter económico y técnico más relevantes de cada alternativa, las cuales fueron seleccionadas en consenso entre las dos investigadoras del estudio, se procedió a realizar una evaluación cuantitativa. La evaluación de alternativas se realizó con base en matrices de calificación (**Tabla 12** y **Tabla 13**) las cuales constan de una primera columna donde se listan las categorías o características relevantes del tipo de material o del sistema de calefacción, seguido de las opciones que fueron evaluadas y la última columna se fijó para el peso: a cada criterio se le adiciona un grado diferente de importancia en el diseño y, en consecuencia, se le asignó un valor de ponderación. Las opciones se clasifican según la puntuación obtenida.

Para asignar el peso de importancia de las características seleccionadas en el sistema se tuvo en cuenta la siguiente rúbrica: **MUY IMPORTANTE** (0,8 a 1), **IMPORTANTE** (0,6 a 0,8), **POCO IMPORTANTE** (0,4 a 0,6) y **NO IMPORTANTE** (0 a 0,3). Y, para fijar los valores con relación a las particularidades de cada alternativa se consideró lo siguiente: **ALTO** (0,7 a 1), **MEDIO** (0,4 a 0,7) y **BAJO** (0 a 0,4).

Teniendo en cuenta lo anterior, para cada criterio se consideró lo siguiente:

- ❖ La transparencia es el porcentaje de intensidad lumínica que atraviesa sobre el material, en este caso se determinó que los materiales que permitieran una incidencia de luz entre un 100% y un 80% serían clasificados en nivel alto, de 70% a 50% nivel medio y de 40% a 10% nivel bajo. Este criterio cuenta con un peso de 1, ya que al ser sistemas a escala laboratorio es de vital importancia la visualización dentro del reactor UASB por motivos de granulación de los lodos presentes y en el fotobiorreactor por la incidencia de luz que es necesaria para el crecimiento microalgal.
- ❖ La resistencia al impacto y fácil manipulación, se relacionan con el aguante de un material, fácil manejo y fácil adecuación en el sistema, teniendo en cuenta que es a nivel laboratorio se consideraron como criterios con un peso de 0,8 (muy importante), ya que es necesario altos porcentajes de estos para evitar fisuras que generen fugas en el sistema o accidentes de los operarios. En este caso se determinó que los materiales que tuvieran una solidez entre un 40% y 10% serían clasificados en nivel bajo, de 70% a 50% nivel medio y 100% a 80% nivel alto.
- ❖ El costo del material se determinó como un criterio con un peso de 1, debido a que, al tratarse de una experimentación, se llevarán a cabo varias réplicas de los equipos por lo que es de vital importancia encontrar una opción que no incremente significativamente los costos del nuevo sistema. El nivel alto, medio y bajo se determinó principalmente revisando el precio actual de cada material en el mercado.
- ❖ La resistencia química es la capacidad que tiene el material de soportar los procesos de deterioro lo que es importante debido a que, el material seleccionado debe poder soportar todos los procesos que ocurran dentro del sistema. En este caso se determinó que los materiales que tuvieran una resistencia entre un 40% y 10% serían clasificados en nivel bajo, de 70% a 50% nivel medio y 100% a 80% nivel alto.

Tabla 12.*Matriz de selección del tipo de material.*

Tipo de Material	PMMA	Vidrio de borosilicato	PVC	Peso
Transparencia	0,94	0,85	0,65	1
Alta resistencia a impactos	0,8	0,4	0,65	0,8
Ligero	0,8	0,4	0,6	0,5
Bajo Costo	0,75	0,5	0,9	1
Facil manipulación	0,8	0,4	0,7	0,8
Puntaje	3,37	2,19	2,93	
Decisión	Primer puesto	Tercer puesto	Segundo puesto	

Nota. La tabla muestra los criterios correspondientes a cada alternativa para la evaluación de cada material.

En la **Tabla 12.**, a partir de la asignación de valores entre 0 y 1 con respecto a cada criterio, se puede evidenciar, que uno de los criterios de mayor peso en el diseño es la transparencia, por su importancia en la inspección visual dentro del reactor. De igual forma la característica considerada con menor relevancia fue que tan pesado o liviano es el material, debido a que no es un factor tan influyente en la selección de éste. La clasificación para cada opción de material está relacionada de acuerdo al puntaje obtenido, en este caso el PMMA fue el material seleccionado al obtener la valoración más alta con respecto a los demás.

Tabla 13.*Matriz de selección del sistema de calefacción.*

Sistema de Calefacción	Principio de la chaqueta de agua	Almohadillas o cinta calefactora	Peso
Utilizado a nivel laboratorio	1	0,5	1
Visibilidad en el reactor	0,8	0,5	0,8
Resistencia al PMMA	1	0,3	1
Costo	0,9	0,5	0,7
Puntaje	3,27	1,55	
Decisión	Primer puesto	Segunda opción	

Nota. La tabla muestra los criterios de cada alternativa para la valoración de cada sistema de calefacción.

En la **Tabla 13**, se manejó el mismo método de valoración expuesto anteriormente, los criterios asignados con un valor 1 fueron la utilización a nivel laboratorio y la resistencia al PMMA, por su relación directa con el tamaño y tipo de material utilizado en la construcción. La ponderación más alta expuesta la tuvo el principio de la chaqueta de agua, al ser la alternativa más óptima para la adecuación en el sistema UASB.

3.1.5 Análisis y selección de las alternativas

Cada uno de los materiales y sistemas de calefacción antes mencionados se pueden utilizar para la construcción de un reactor UASB, sin embargo, consideramos que la selección es cuestión de presupuesto y de utilidad en el laboratorio.

El tamaño del reactor juega un papel importante para la elección del material y sistema de calefacción. Para el material, según Pererva, Miller & Sims [40], se debe tener en cuenta que para reactores pequeños se hace uso de vidrio de borosilicato, para reactores pequeños y medianos PVC y PMMA, y a escala piloto acero inoxidable. El vidrio de borosilicato con respecto a las otras dos alternativas, en nuestra opinión es la opción menos favorable para el sistema, al ser un material costoso tanto al momento de adquirirlo como de mantenerlo, además, es frágil, pesado y propenso a la generación de grietas por vibraciones.

Las dos alternativas restantes son el PVC y el PMMA. Éstos poseen peculiaridades similares al tratarse de plásticos, sin embargo, consideramos que el PMMA es la mejor opción para la construcción del sistema ya que, en comparación con el PVC, es más ligero y resistente, posee una mayor dureza, es decir, alta resistencia a posibles impactos, y con respecto a su claridad es conocido como el polímero más transparente y estable [43].

Y, en relación al sistema de calefacción, entre los diseños estudiados se determinó que, aunque existen diversas formas de calentamiento, no todas son óptimas para utilizar en un proceso biológico. Por ejemplo, «entre ellas encontramos, la posibilidad de llevar a cabo un pre calentamiento del fluido antes de ingresar al reactor, lo que

resulta problemático, ya que la temperatura tiende a disminuir rápidamente a lo largo del reactor y, además, cierta parte de la carga orgánica se elimina o se acidifica antes de ingresar al sistema, lo que hace más difícil el seguimiento de la eficiencia en el proceso» [41].

Al ser seleccionado anteriormente para el sistema el material PMMA, la alternativa de las almohadillas o cintas calefactoras se descarta, debido a que si existiera contacto entre estas sería perjudicial para el sistema, al generarse sobrecalentamientos y daños irreversibles en la parte física del equipo. Asimismo, es comúnmente empleado en diseños más grandes y tiene la gran desventaja de reducir la visibilidad en el reactor.

Es por esto, que partiendo de la particularidades del equipo, la alternativa óptima para el calentamiento a lo largo del reactor UASB, es el principio utilizado en la chaqueta de agua, es decir, la chaqueta de agua es el sistema adecuado, pero en conocidos estudios se utilizó simplemente su principio de calentamiento al reemplazar la chaqueta alrededor del reactor por una manguera tipo serpentín externo, reduciendo costos de material térmico, controlando de una manera más eficaz las fugas y dando una visibilidad amplia de la parte interior del reactor.

3.2 Diseño conceptual del fotobiorreactor

3.2.1 *Objetivo del biorreactor*

El objetivo fundamental para llevar a cabo el diseño del Fotobiorreactor, era determinar las características y parámetros para el adecuado crecimiento de la biomasa que permita altas productividades a bajos costos de construcción y operación, así como la reducción de impactos ambientales.

3.2.2 *Consideraciones del diseño*

El diseño de un fotobiorreactor va en función de diversos factores, debido a que este reactor abarca todo el proceso de crecimiento microalgal, entre los que encontramos concentración de biomasa, suministro de nutrientes, condiciones de esterilidad,

agitaciones eficaces en todo el sistema, entre otros, todo esto con el objetivo de crear un ambiente favorable para el metabolismo y la actividad microalgal.

Para controlar la operación dentro del biorreactor, y de acuerdo con la revisión sistemática presentada en el capítulo anterior, los parámetros más relevantes para incrementar la velocidad de crecimiento y conseguir una considerable proporción de biomasa son los siguientes:

- a. Temperatura: La temperatura es un factor importante en el medio de cultivo de cualquier microalga, ya que requiere de un control para mantenerse dentro del rango óptimo, con el fin de evitar un efecto inhibitorio en el crecimiento de esta. El rango óptimo de temperatura para el crecimiento microalgal depende de la especie involucrada y de su producto de interés, en este caso el rango óptimo para la microalga *Chlorella vulgaris* es de 24°C - 26°C.
- b. pH: Es una variable relevante en el cultivo, ya que desequilibrios en este pueden ocasionar efectos fatales en el crecimiento de las especies de microalgas. Para la especie *Chlorella vulgaris* este valor se encuentra entre 6,5 a 7,5, por lo que se considera un microorganismo neutro.
- c. Intensidad lumínica: Este factor es primordial para el proceso biológico de la fotosíntesis, ya que controla la productividad en el cultivo. El rango óptimo de intensidad lumínica a nivel laboratorio para la especie *Chlorella vulgaris* es de 1000 lx a 12000 lx.

3.2.3 Alternativas del diseño

Para el diseño del fotobiorreactor se tendrán en cuenta dos parámetros fundamentales, para la construcción y mejora del sistema encargado en el crecimiento y mantenimiento del cultivo de microalgas.

El desarrollo de un fotobiorreactor depende principalmente de su configuración geométrica, del producto a obtener y del sistema. Basados en estas características se seleccionó la geometría como el primer criterio a evaluar, “ya que es la base de la configuración porque se busca una relación adecuada de superficie-volumen que

permita maximizar el paso de luz en el espacio del biorreactor” [44]. Para lograr dicha relación se han desarrollado varias geometrías que se pueden agrupar en tres tipos básicos: tubular, placa plana y tanque agitado. Sin embargo, en este estudio se tendrán en cuenta únicamente la geometría tubular y de placa plana al ser las más empleadas para el diseño y construcción de este sistema.

Y el segundo parámetro, “es el material del reactor que debe cumplir con características de alta transparencia, flexibilidad, durabilidad, toxicidad nula, resistencia a productos químicos, resistencia a la intemperie y bajo costo con el fin de crear un diseño apropiado para el cultivo” [45]. En este estudio se compararon cualitativamente cuatro materiales para la construcción del equipo: polimetilmetacrilato (PMMA), polietileno, policarbonato y vidrio de borosilicato.

Tabla 14.

Alternativas para cada criterio en el FBR.

CRITERIO	ALTERNATIVAS
Configuración geométrica	Tubular
	Placa plana
Material	Policarbonato
	Polietileno
	Polimetilmetacrilato (PMMA)
	Vidrio

Nota. La tabla muestra las alternativas proporcionadas para los criterios de configuración geométrica y material en el FBR.

3.2.4 Evaluación de las alternativas

Para el análisis y selección de las alternativas adecuadas para el sistema, se consideraron las características más relevantes de cada parámetro de forma cualitativa, que se darán a conocer en la **Tabla 15.** para cada modelo de configuración geométrica [46] y en la **Tabla 16.** para el tipo de material de construcción [47], [49].

Tabla 15.

Tipos de geometrías para el FBR con sus características específicas.

TIPO DE GEOMETRÍA	CARACTERÍSTICAS
Geometría tubular	<p>Vertical: Es fácil de esterilizar, reduce la fotoinhibición y fotooxidación. El diámetro del reactor debe ser alto en comparación con los reactores de placa plana, lo que a su vez disminuye la relación área/volumen reduciendo la eficiencia fotosintética. Son comúnmente construidos en polietileno y tubos de vidrio. Su agitación se da por medio de burbujeo de aire. Tiene las ventajas de tener un intercambio de gases eficiente, un bajo esfuerzo cortante, una buena mezcla, bajo consumo de energía y bajo costo. Posee la desventaja de tener una baja relación superficie/volumen. Además, dentro de este tipo de geometría encontramos los reactores de columna burbujeo y de tipo Airlift.</p> <p>Horizontal: Este tipo de geometría tiene alta productividad en el cultivo de microalgas. Son tubos generalmente delgados que proporcionan una alta relación superficie/volumen brindando una eficiencia óptima de la captura de la luz. Pueden manejar grandes volúmenes de trabajo, debido a que no son susceptibles a la contaminación. Las desventajas de usar este tipo de reactores es el bajo intercambio de gases, alto aporte de energía, difícil control de temperatura y acumulación de biomasa en los tubos.</p>
Geometría de placa plana	<p>Esta geometría posee un parámetro primordial para el ensamblaje del equipo y es la relación superficie/volumen, el cual permite determinar si el equipo es adecuado para el proceso fotosintético. Sus principales ventajas es la alta productividad y distribución uniforme de la luz. Dependiendo del método de agitación utilizado se puede lograr una alta velocidad de mezcla, además de un bajo esfuerzo cortante.</p>

Nota. La tabla muestra las características de la geometría tubular y de placa plana para el FBR.

Tabla 16.

Tipos de materiales para el FBR con sus características específicas.

TIPO DE MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Buena resistencia al rayado. Material transparente. Alta resistencia química. Alta resistencia térmica. Alta resistencia mecánica. Fácil manipulación. Baja fragilidad. Costo accesible. 100% reciclable. Resistencia a la interperie.
Polietileno	Alta resistencia química. Alta resistencia térmica. Alta resistencia al impacto. Alta flexibilidad incluso a bajas temperaturas. No es reactivo. Aspecto blanquecino y translúcido. No es buen conductor de calor y electricidad.
Policarbonato	Es un termoplástico. Alta resistencia a impactos. Aislante térmico. Soporta deformación térmica. Alto grado de transparencia. Resistente a la interperie. Índice de transmisión lumínica entre el 80% y el 90%. Excelente relación entre calidad/precio. Fácil instalación. No se astilla. Larga vida útil. Material reutilizable.
Vidrio borosilicato	No soporta cambios bruscos de temperatura. Alta resistencia a la corrosión. Material transparente. Resistente a ataques químicos. No se degrada en presencia de rayos ultravioleta. Material costoso.

Nota. La tabla muestra las características de cada opción planteada de material para el diseño del FBR.

De acuerdo con la información recopilada en la **Tabla 15.** y **Tabla 16.,** se plantearon matrices de calificación de las alternativas. A cada una de estas alternativas contempladas por parámetro con los mismos aspectos, se le valora cuantitativamente y se selecciona la opción más adecuada a partir de la sumatoria de calificaciones más alta. Tener en cuenta que los valores asignados en la matriz de calificación siguen la rúbrica especificada para las matrices del reactor UASB.

En la **Tabla 17.** y **Tabla 18.** se contemplan los criterios a evaluar por parámetro, y el valor asignado de importancia de estos en el diseño.

Tabla 17.*Matriz del tipo de material para el FBR.*

Tipo de Material	PMMA	Polietileno	Policarbonato	Vidrio	Peso
Transparencia	0,94	0,4	0,88	0,85	1
Resistencia química	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Alta resistencia al impacto	0,7	0,8	0,9	0,3	0,5
Bajo Costo	0,6	0,8	0,6	0,2	1
Facilidad de manejo	0,8	0,7	0,7	0,4	0,8
Puntaje	3,17	2,8	3,13	2,16	
Decisión	Primer puesto	Tercer puesto	Segundo puesto	Cuarto puesto	

Nota. La tabla muestra la valoración proporcionada para cada alternativa con respecto al tipo de material.

En la **Tabla 17.** la importancia de cada criterio expuesto se encuentra estimado entre valores de 0 a 1. En este caso, para la selección del tipo de material se tuvieron en cuenta 4 opciones las cuales son: el PMMA, polietileno, policarbonato y vidrio. Cabe resaltar que, la transparencia es una de las características principales a considerar en el diseño del FBR, ya que de esta depende la incidencia de luz en el cultivo que se encuentra directamente relacionado con altas tasas de productividad de biomasa microalgal. La estimación final a partir de la sumatoria de calificaciones, arrojó que el PMMA es el material más adecuado para cumplir con los requerimientos del equipo.

Tabla 18.*Matriz del tipo de geometría para el FBR.*

Tipo de Geometría	Tubular	Placa plana	Peso
Productividad	0,7	0,8	1
Bajos costos	0,7	0,8	0,7
Relación superficie/volumen	0,6	0,9	0,8
Menor suministro de energía	0,7	0,8	0,7
Distribución uniforme de la luz	0,6	0,8	1
Puntaje	2,74	3,33	
Decisión	Segundo puesto	Primer puesto	

Nota. La tabla muestra la calificación para cada tipo de geometría.

La matriz mostrada en la **Tabla 18.**, se encuentra desarrollada de igual forma que la anterior, donde la elección de la geometría se llevó a cabo partir de criterios relacionados con la productividad, relación superficie/volumen, suministro de energía y distribución uniforme de la luz; donde se evidencia que la opción de geometría de placa plana presenta valores altos de cada criterio a evaluar, lo cual la convierte en la primera alternativa para el diseño del reactor FBR.

3.2.5 Análisis y selección de las alternativas

En primer lugar, de acuerdo con la información recolectada anteriormente, en la última década los fotobiorreactores tubulares y de placas planas han recibido mucha atención ya que permiten obtener cultivos de alta densidad celular en comparación con los sistemas convencionales de carrusel. Lo anterior tiene ventajas como la facilidad para cosechar la biomasa, el mantenimiento del cultivo sin contaminación, un mayor control de las condiciones de cultivo y una menor inversión de capital en la construcción y operación del fotobiorreactor [46].

Para la selección del tipo de geometría, se conocieron múltiples características de las dos geometrías estudiadas, llegando a la conclusión de que el fotobiorreactor de tipo placa plana, es la opción más adecuada para el diseño al tener el valor ponderado más alto en la matriz de calificación expuesta en la **Tabla 18.**, ya que en comparación con la geometría tubular, “presenta una mayor área de superficie iluminada, buena trayectoria de luz, alta productividad de biomasa, bajos costos, además facilita los ciclos de luz-oscuridad para el cultivo (fotoperiodo), requiere menos suministro de energía al proporcionar suficiente transferencia de masa, mezcla y capacidad de transferencia de calor” [46].

El material de construcción, se seleccionó a partir de los criterios mencionados anteriormente. En primera instancia, se descartó el vidrio de borosilicato, por su alta densidad, lo que lo hace propenso a rupturas, lo que lo convierte en un elemento frágil, con poca flexibilidad, con una superficie más turbia en comparación con las otras alternativas y con un alto valor adquisitivo en el mercado. De igual forma, el polietileno a pesar de ser un plástico con alta resistencia química, térmica y corrosiva, y de poseer un bajo costo, se eliminó al tener una baja transferencia de luz para el

adecuado crecimiento fotosintético dentro del equipo, comparado con las presentadas por los otros materiales.

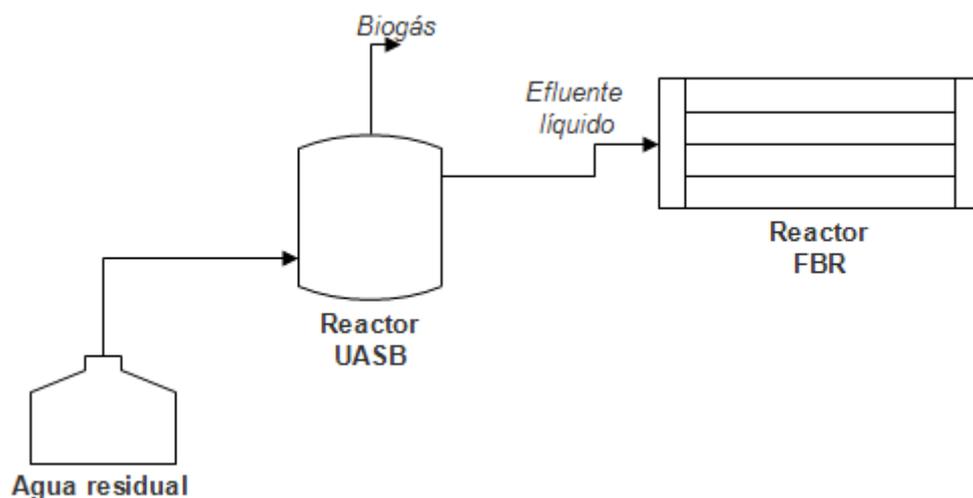
«El polimetilmetacrilato y el policarbonato, fueron señalados como las alternativas más adecuadas para el diseño del fotobiorreactor, sin embargo, al presentar ciertas diferencias frente al porcentaje de transmisión de luz, rigidez, resistencia a químicos, valor en el mercado y manejo, se seleccionó el PMMA. Este material, además de cumplir con los requerimientos de construcción, posee buena disponibilidad y aplicabilidad, es amigable con el medio ambiente, tiene una larga vida útil, mayor transparencia generando alta transferencia de luz a través de sus paredes para la productividad en el cultivo» [47].

3.3 Diseño conceptual del sistema continuo biorreactor UASB y FBR

Con la información mencionada anteriormente, se procedió a elaborar una propuesta de un sistema continuo que tiene como principal objetivo la depuración de agua residual y el crecimiento microalgal. Éste consta de un FBR alimentado con el líquido residual de un biorreactor UASB.

Figura 7.

Esquema del sistema que consta de un UASB conectado a un FBR.



Nota. La figura representa el esquema generalizado del sistema contemplado para el UASB y el FBR.

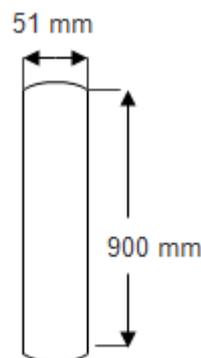
En primer lugar, “el diseño del biorreactor UASB se estableció a partir de modelos geométricos y correlaciones vigentes que se encuentran en la literatura y el dimensionamiento propio del grupo de investigación GRESIA, con el propósito de asegurar la degradación de contaminantes presentes en el agua residual” [48].

El volumen del reactor, la altura, el tiempo de retención, material de construcción, la carga orgánica y el porcentaje de remoción del reactor UASB serán los siguientes:

- ❖ **Volumen del reactor:** 1,8 L.
- ❖ **Altura del reactor:** 900 mm.
- ❖ **Tiempo de retención:** 1 día.
- ❖ **Material de construcción:** polimetilmetacrilato (PMMA).
- ❖ **Carga orgánica:** 2000 mg/L de DQO [48].
- ❖ **Porcentaje de remoción esperado:** 90% aprox [48].

Figura 8.

Dimensiones reactor UASB.



Nota. Esta figura muestra las dimensiones del reactor UASB.

El volumen establecido para el reactor UASB (1,8 L) es relativamente pequeño, debido a que, se requiere de un ahorro de reactivos al tratarse de una experimentación, cabe resaltar que, aunque estos no presentan altos costos, al operar el equipo por meses ocasionaría un incremento significativo por estos. Además, es importante mencionar que por estudios previos del grupo GRESIA, se fijó este volumen, ya que si este dispositivo se construye más pequeño no cumplirá con los

limites técnicos relacionados con el régimen de flujo y su control será difícil al requerir equipos más sofisticados.

Para el diseño del fotobiorreactor de polimetilmetacrilato (PMMA), se tuvo en cuenta la elección de geometría de placa plana mencionada anteriormente, sin embargo, también se presenta un dimensionamiento con geometría tubular vertical, debido a que es el prototipo más empleado a nivel laboratorio tanto en literatura como por el grupo GRESIA. Es importante resaltar, que las geometrías aseguran un ambiente adecuado para el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*.

En ambas geometrías, las características y dimensiones, se determinaron a partir del volumen del reactor UASB (1,8 L) y el tiempo de retención en el FBR aproximado de 27 días [48]. Con esta información, se estableció que el volumen del fotobiorreactor debería ser de 48,6 L. El cálculo de este volumen se presenta a continuación:

Ecuación 3.

Volumen FBR.

$$V_{FBR} = \frac{V_{UASB} * t_{FBR}}{t_{UASB}}$$

Nota. La ecuación es utilizada para determinar el cálculo del volumen del fotobiorreactor a partir del UASB.

donde:

V_{FBR} es el volumen en litros del FBR, V_{UASB} es el volumen en litros del UASB, t_{FBR} es el tiempo de retención en días del FBR y t_{UASB} es el tiempo de retención en días del UASB.

$$V_{FBR} = \frac{1,8 \text{ L} * 27 \text{ días}}{1 \text{ día}} = 48,6 \text{ L}$$

Una vez establecido el volumen del FBR, se procedió a calcular las dimensiones tomando como referencia la información encontrada en la revisión de diferentes artículos.

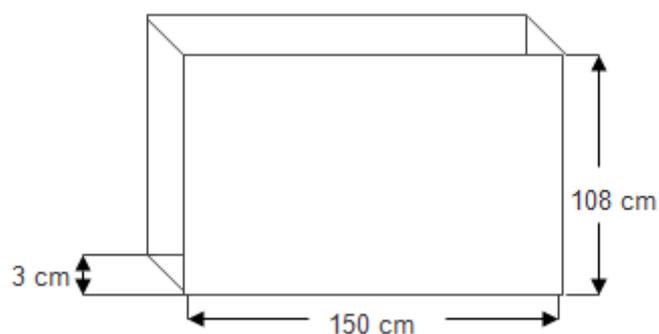
3.3.1 Fotobiorreactor de geometría de placa plana

A partir de los artículos “Avance en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas”[46] y “Incidencia del nitrógeno en la producción de biomasa y ácidos grasos de la microalga *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de panel plano a escala laboratorio” [29], se consideró que el factor más importante para el diseño del fotobiorreactor de geometría de placa plana, es la distancia existente entre placa y placa ya que, influye directamente con las rutas luminosas dentro del equipo. Los valores de rutas luminosas mayores a 10 cm no son viables para la distribución de la luz, es decir, tienden a decrecer la densidad del cultivo, sin embargo, el rango más adecuado para este parámetro se encuentra entre 2,6 cm y 3 cm.

De acuerdo con lo anterior, tomando el volumen del reactor FBR (48,6 L) y una distancia entre placas de 3 cm, se calcularon las siguientes dimensiones:

- ❖ **Caras laterales:** 150 cm x 108 cm.
- ❖ **Caras frontales:** 3 cm x 108 cm.
- ❖ **Pieza superior e inferior:** 3 cm x 150 cm.

Figura 9.
Dimensiones en el FBR de placa plana.



Nota. La figura muestra las dimensiones del FBR de placa plana.

La relación de superficie/volumen es un cálculo relevante debido a que indica si el FBR presenta un buen acceso de luz, permitiendo así que las microalgas realicen sin dificultades su proceso fotosintético. Es por esto, que se debe asegurar que este parámetro de diseño sea alto y se encuentre en un rango entre 20 y 200 m⁻¹ [29]. Para este diseño la relación de superficie/volumen es de 33 m⁻¹. El cálculo de este parámetro se presenta a continuación:

Ecuación 4.

Relación superficie/volumen.

$$\text{Relación Sup - Vol} = \frac{\text{Área de la placa lateral}}{\text{Volumen de equipo}}$$

Nota. La ecuación es utilizada para determinar la relación superficie/volumen. Tomado de: Incidencia del nitrógeno en la producción de biomasa y ácidos grasos de la microalga *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de panel plano a escala laboratorio, [En línea]. Disponible: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/140> [Acceso: sep.12.2022].

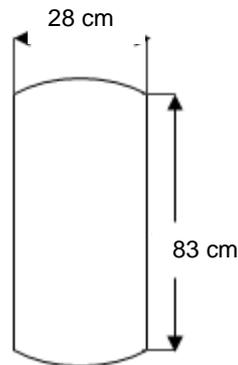
$$\text{Relación Sup - Vol} = \frac{(1,5m \times 1,08m)}{(1,5m \times 1,08m \times 0,03m)} = 33,33 \text{ m}^{-1}$$

3.3.2 Fotobiorreactor de geometría tubular vertical (*Air-lift*)

El artículo base para este diseño fue “*Diseño, montaje y caracterización de fotobiorreactor Air-lift para el cultivo de la microalga Chlorella Sorokiniana*” [49], del cual se extrajo el factor de forma de 3, que es la relación entre la altura y el diámetro de la base del reactor. A partir de ello, se calculó la altura y el diámetro de éste, dando como resultado 82,26 cm y 27,42 cm, respectivamente. “Según estas dimensiones calculadas y lo expuesto en la literatura, las dimensiones planteadas cumplen con las especificaciones de diámetro de columna no superior a 0,2 m para evitar reducir la disponibilidad de luz y la altura es limitada a 4 m, ya que sobre este valor la concentración de oxígeno disuelto aumenta exponencialmente” [50].

Figura 10.

Dimensiones fotobiorreactor tubular.



Nota. La figura representa el fotobiorreactor tubular con sus respectivas dimensiones de diámetro y altura.

Ecuación 5.

Dimensiones del FBR.

$$\text{factor de forma} = \frac{h}{D} = 3 \quad \rightarrow \quad 3D = h$$

$$V_{\text{cilindro}} = \pi * r^2 * h$$

Nota. Las ecuaciones son utilizadas para determinar las dimensiones del FBR tubular.

$$48600 \text{ cm}^3 = 6\pi * r^3 \rightarrow r = 13,712 \text{ cm}$$

$$h = 6r \rightarrow h = 82,26 \text{ cm}$$

3.4 Estimación del desempeño del fotobiorreactor

El cultivo de microorganismos fotoautótrofos como las microalgas, se ha llevado a cabo en fotobiorreactores (FBR), los cuales tienen múltiples diseños. Los avances tecnológicos en el diseño de estos sistemas han permitido mejorar notablemente la densidad celular, la productividad y por ende la economía de los cultivos para distintos fines [46].

Con la información recopilada en los capítulos anteriores, para la estimación del desempeño del equipo se efectuó una comparación de la concentración de biomasa de *Chlorella vulgaris* obtenida entre un fotobiorreactor de placa plana y uno de tipo *Air-lift*, teniendo en cuenta los parámetros de intensidad lumínica y DQO.

La intensidad lumínica considerada en los artículos a tener en cuenta en este capítulo, se encontró dentro de 1000 a 12000 lx, rango establecido en la revisión sistemática para el medio de cultivo en el fotobiorreactor de este sistema [51].

Y, respecto a la DQO alimentada al FBR, para fijar sus límites se consideró que a la entrada del UASB, se proporciona una alimentación de agua residual con aproximadamente 2000 mg/L de DQO, carga orgánica empleada en un estudio reciente del grupo GRESIA [48], y teniendo presente que dentro de este reactor se cuenta con una remoción del 85% al 95% [39], el flujo de entrada de DQO del efluente líquido al FBR está en un rango entre 100 mg/L y 300 mg/L de DQO.

El primer artículo a considerar, es "*Microalgal Cultivation and Nutrient Removal from Digested Piggery Wastewater in a Thin-film Flat Plate Photobioreactor*" [51], ya que allí se hace uso de un fotobiorreactor de placa plana el cual cuenta con un volumen de 37,5 L y unas dimensiones de 50 cm de largo x 15 cm de ancho x 50 cm de alto. El funcionamiento del sistema se da con una intensidad lumínica de 11100 lx generada a través de tubos fluorescentes blancos, con un período de luz: oscuridad (12:12) y un medio de cultivo BG11 con una demanda química de oxígeno de 71,22 mg/L.

El segundo artículo a tener en consideración, es "*Cultivation of Chlorella vulgaris in Column Photobioreactor for Biomass Production and Lipid Accumulation*" [52] en donde, el sistema empleado es un fotobiorreactor tubular *Air-lift* con una capacidad de 16 L fabricado en polimetilmetacrilato (PMMA), con 60 cm de altura y 20 cm de diámetro, la intensidad lumínica es de 9000 lx proporcionados por lámparas fluorescentes blancas, un fotoperiodo de luz: oscuridad de 16:8 y un medio de cultivo BG11 con 71,22 mg/ L de DQO.

Una vez recopilados estos parámetros, se procedió a verificar el desempeño en el fotobiorreactor por medio de la concentración de biomasa en cada uno de estos, los

datos encontrados para la geometría de placa plana y tubular tipo *Air-lift* es de 0,63 g/L y 0,52 g/L, respectivamente.

Tabla 19.

Información recopilada de los artículos para el reactor placa plana y Air-lift.

Reactor	DQO (mg/L)	Intensidad lumínica (lx)	Concentración de biomasa (g/L)
Placa plana	71.22 ± 5.36	11.100	0.63
Airlift	71.22 ± 5.36	9.000	0.52

Nota. La tabla muestra el DQO, intensidad lumínica y concentración de masa proporcionada por cada reactor en los artículos estudiados.

A partir de esta información, se puede evidenciar y corroborar con literatura, que la mayor productividad de biomasa se da en un fotobiorreactor de geometría de placa plana, debido a su mayor área de superficie iluminada, factor relevante para el crecimiento y desarrollo adecuado del cultivo.

Sin embargo, debido a que la literatura es escasa, es aconsejable realizar más experimentación sobre este sistema, tanto para geometría placa plana como para geometría tubular del FBR. Por lo que se propone un diseño de experimentos.

CONCLUSIONES

Con base a la literatura las variables que influyen en el crecimiento y adaptación del cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* dentro del FBR fueron la temperatura en un rango de 24°C a 26°C, el pH entre 6,5 a 7,5, la intensidad lumínica de 1000 a 12000 lx y un fotoperiodo de 12:12 Luz/oscuridad.

En el diseño del reactor UASB se realizó la selección del material de construcción y sistema de calefacción, por medio de una metodología de matrices con criterios basados en características fundamentales de influencia directa para el objetivo del equipo. Los resultados arrojaron que el material más adecuado es el PMMA por sus particularidades y costos accesibles, de igual forma el sistema de calefacción elegido es el principio de la chaqueta de agua por su alta transferencia de calor y bajos costos.

En este estudio para el fotobiorreactor se determinó que el material de construcción y la geometría eran dos de los parámetros más importantes para la implementación en el sistema. El material seleccionado para este equipo fue el PMMA por su alta resistencia y transparencia que permite una alta incidencia de luz en el cultivo y, por otro lado, la geometría de placa plana que en comparación con las demás presenta una mayor área de superficie iluminada lo que proporciona un mayor crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*.

A partir de la revisión bibliográfica, se estimó que el desempeño del fotobiorreactor de placa plana presentaba mayores concentraciones de biomasa en comparación con un fotobiorreactor *Air-lift* cuando estos trabajan en condiciones similares.

RECOMENDACIONES

Debido a que la literatura es escasa, es aconsejable realizar más experimentación sobre este sistema, tanto para geometría placa plana como para geometría tubular del FBR.

Para llevar a cabo la experimentación, se recomienda hacer uso de un diseño factorial en donde se planteen variables independientes como el DQO a la entrada del FBR y la intensidad lumínica, ya que son parámetros en los cuales aún se presentan incertidumbres para este sistema. Observar **Anexo 1**.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Reciclado Y Tratamiento de Residuos - VV.AA - Varios Autores - Google Libros.” [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=jXEFxC3GiGQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=+Reciclado+y+tratamiento+de+residuos.+Editorial+UNED,+2008&ots=A0X-O04ZSa&sig=Fz5V_MzcP-sY3scnl1NmbPvR8ew#v=onepage&q=9925&f=false (accessed Dec. 02, 2020).
- [2] D. Recursos, H. Y. Medio, and I. Capítulo, “Universidad De Chile Departamento De Ingeniería Civil ,” pp. 1–17, 2010. [Online]. Available: https://www.google.com/url?hl=es&q=https://www.ucursos.cl/ingenieria/2005/1/CI41B/1/material_docente/bajar?id_material%3D64603&sa=D&ust=1600281911108000&usq=AFQjCNEqZiOlr5qylwMtYZFJ5FzproT5QQ.
- [3] A. Muñoz, “Caracterización y tratamiento de aguas residuales,” Inst. Ciencias Básicas e Ing., p. 114, 2008, [Online]. Available: http://cvonline.uaeh.edu.mx/Cursos/Especialidad/Modulo1_PDF/Gen12/ESTE_M01T01E08.pdf.
- [4] J. L. Palma, *Introducción a La Introducción a La Αποπρωσιξ*, vol. 25, no. 3. 2015. [Online] Available: <https://docero.es/doc/nc8sc1>
- [5] E. Rocha, “Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas,” *Revista*, p. Pág 1-22, 2010, [Online]. Available: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/carbon6.pdf>
- [6] D. I. Caviedes Rubio, R. A. Muñoz Calderón, A. Perdomo Gualtero, D. Rodríguez Acosta, and I. J. Sandoval Rojas, “Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una revisión,” *Ing. y Región*, vol. 13, no. 1, p. 73, 2015, doi: 10.25054/22161325.710.

- [7] “Tecnologías para la sostenibilidad - Juan Antonio Sainz Sastre - Google Libros.”
https://books.google.com.co/books?id=r9aK7UttDU8C&pg=PA327&dq=neutralizaci%C3%B3n+de+aguas+residuales&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjmoekWvI_sAhWHd98KHfPGC9IQ6AEwBnoEACAcQAg#v=onepage&q=neutralizaci%C3%B3n%20de%20aguas%20residuales&f=false .
- [8] “Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño - Google Libros.” [Online]. Available:
https://books.google.com.co/books?id=lxNBDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=procesos+biologicos+tratamiento+de+aguas&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjyquL5v4_sAhVvdt8KHT5CAkcQ6wEwAHoECAAQAQ#v=onepage&q=procesos%20biologicos%20tratamiento%20de%20aguas&f=false.
- [9] A. A. C. Villanueva *et al.*, “Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales,” *Univ. Politec. Cataluña*, vol. 1, no. 3, pp. 39–51, 2013.
- [10] “UNIDAD 2. BIORREACTORES Y SU APLICACIÓN - Bioingeniería.”
<https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion> (accessed Dec. 02, 2020).[Online]. Available:
<https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion>
- [11] “TREATMENT OF DAIRY INDUSTRY WASTEWATER USING UASB ANAEROBIC SYSTEM.” [Online]. Available:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612009000200004&script=sci_arttext (accessed Dec. 02, 2020).
- [12] O. Pulz and K. Scheibenbogen, “Photobioreactors: Design and performance with respect to light energy input,” *Bioprocess Algae React. Technol. Apoptosis*, vol. 59, pp. 123–152, 2007, doi: 10.1007/bfb0102298.
- [13] “BioRefineries Blog.” [Online]. Available:
<https://biorrefineria.blogspot.com/2014/06/2014-12fotobiorreactores.htm>

- [14] A. Ruiz, "Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente.," Univ. Politécnica Val., p. 102, 2011.
- [15] R. Octavio, "Eliminación de nutrientes para el tratamiento biológico de agua residual en crecimiento autotrófico, heterotrófico y mixotrófico." 2009.
- [16] A. Hernández-Pérez and J. I. Labbé, "Microalgas, cultivo y beneficios," *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, vol. 49, no. 2. Universidad de Valparaíso, pp. 157–173, 2014, doi: 10.4067/S0718-19572014000200001.
- [17] "Microalgas para reducir emisiones de CO₂ - Edición 162 - Revista Universidad EAFIT." [Online]. Available: <https://www.eafit.edu.co/investigacion/revistacientifica/edicion-162/Paginas/microalgas-para-reducir-emisiones-de-co2.aspx>
- [18] P. Microalgas and Y. González-arechavala, "Ana-Maria-Santos & Yolanda-Gonzales-Arechavala & Carlos-Martin-Sastre," 2014. [Online]. Available: <https://www.iit.comillas.edu/docs/IIT-14-027A.pdf> .
- [19] J. David and J. Tafur, "Estudio de la producción de biomasa de *Chlorella vulgaris* crecida heterotróficamente sobre vinazas de la caña de azúcar," 2017.
- [20] "Algae Research Supply: Algae Culture *Chlorella vulgaris*." [Online]. Available: <https://algaeresearchsupply.com/products/algae-culture-chlorella-vulgaris> .
- [21] J. Camilo, T. Salamanca, J. Paola, and R. Díaz, "PROPUESTA DE ESCALAMIENTO DE UN FOTOBIOREACTOR PARA LA MICROALGA *CHLORELLA VULGARIS* A NIVEL PILOTO."
- [22] D. Rubio and G. Hernández, "Evaluation of the incidences of salinity and pH on the biomass, productivity and lipids accumulation in cultures of *Chlorella vulgaris* in a flat plate photobioreactor," *Iteckne*, vol. 13, no. 1, pp. 44–56, 2016, [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982016000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=es

- [23] A. Ruiz, "Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente.," *Univ. Politécnica Val.*, p. 102, 2011.
- [24] H. Geijer, R. Udumyan, G. Lohse, and Y. Nilsagård, "Temperature measurements with a temporal scanner: systematic review and meta-analysis," *BMJ Open*, vol. 6, no. 3, p. e009509, Mar. 2016, doi: 10.1136/bmjopen-2015-009509.
- [25] M. F. Blair, B. Kokabian, and V. G. Gude, "Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 665–674, 2014, doi: 10.1016/j.jece.2013.11.005.
- [26] M. G. De Moraes and J. A. V. Costa, "Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors," *Biotechnol. Lett.*, vol. 29, no. 9, pp. 1349–1352, Sep. 2007, doi: 10.1007/s10529-007-9394-6.
- [27] A. H. Scragg, A. M. Illman, A. Carden, and S. W. Shales, "Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor," *Biomass and Bioenergy*, vol. 23, no. 1, pp. 67–73, 2002, doi: 10.1016/S0961-9534(02)00028-4.
- [28] D. Rubio, I. Guauque, and C. Alcalá, "Evaluación de la incidencia de la temperatura en la producción de lípidos obtenidos a partir de biomasa microalgal a escala laboratorio," *Rev. Invest. (Guadalajara)*, vol. 6, no. 2, pp. 31–44, Jul. 2013, doi: 10.29097/2011-639x.146.
- [29] "Determinación de incidencia de la relación carbono: nitrógeno en la producción de biomasa y ácidos grasos de la microalga *Chlorella vulgaris* a escala de laboratorio." [Online]. Available: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/159/154>

- [30] “Incidencia del nitrógeno en la producción de biomasa y ácidos grasos de la microalga *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de panel plano a escala laboratorio.”[Online]. Available: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/140/135>
- [31] “Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/300505269_Cultivation_of_Green_Microalga_Chlorella_vulgaris_for_Biogas_Purification
- [32] L. D. Zhu, Z. H. Li, D. B. Guo, F. Huang, Y. Nugroho, and K. Xia, “Cultivation of *Chlorella* sp. with livestock waste compost for lipid production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 223, pp. 296–300, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2016.09.094.
- [33] “Lipid productivity of microalgae *Chlorella vulgaris* and *nannochloropsis oculata* in externally illuminated lab scale photobioreactor.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/286338665_Lipid_productivity_of_microalgae_Chlorella_vulgaris_and_nannochloropsis_oculata_in_externally_illuminated_lab_scale_photobioreactor
- [34] S. Daliry, A. Hallajisani, J. Mohammadi Roshandeh, H. Nouri, and A. Golzary, “Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth,” *Global Journal of Environmental Science and Management*, vol. 3, no. 2. Iran Solid Waste Association, pp. 217–230, Mar. 01, 2017, doi: 10.22034/gjesm.2017.03.02.010.
- [35] J.C Tovar y J.P Ruíz, *Propuesta de escalamiento de un fotobiorreactor para la microalga Chlorella vulgaris a nivel piloto*, Proyecto integral de grado, Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de America, Bogota D.C, 2016.
- [36] Q. Huang, F. Jiang, L. Wang, and C. Yang, “Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms,” *Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 318–329, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.03.020.

- [37] N. Vidal, R. Bañares-Alcántara, I. Rodríguez-Roda, and M. Poch, "Design of wastewater treatment plants using a conceptual design methodology," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 41, no. 20, pp. 4993–5005, Oct. 2002, doi: 10.1021/ie010652b.
- [38] R. Rodríguez Gómez, "UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REACTOR: MODELLING," 2011. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:394741/FULLTEXT02.pdf>
- [39] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales and Comisión Nacional Del Agua, *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente*. 2015.
- [40] Y. Pererva, C. D. Miller, and R. C. Sims, "Approaches in Design of Laboratory-Scale UASB Reactors," *Processes*, vol. 8, no. 6, p. 734, Jun. 2020, doi: 10.3390/pr8060734.
- [41] "Design of a low Budget lab-scale UASB reactor for research and teaching in low income laboratories." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/301226539_Design_of_a_low_Budget_lab-scale_UASB_reactor_for_research_and_teaching_in_low_income_laboratories
- [42] "CAPITULO IV DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR UASB 4.1 ESTUDIO DE LA ZONA DEL PROYECTO 4.1.1 Generalidades." [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2716/36244-6.pdf>
- [43] "Metacrilato o PVC?" [Online]. Available: <https://serviplast.es/comprar-metacrilato-o-comprar-pvc/#:~:text=El%20PMMA%20es%20m%C3%A1s%20ligero,PMMA%20y%20moldearlo%20a%20medida>

- [44] A. P. Carvalho, L. A. Meireles, and F. X. Malcata, "Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances," *Biotechnology Progress*, vol. 22, no. 6. pp. 1490–1506, Nov. 01, 2006, doi: 10.1021/bp060065r.
- [45] D. Rubio Fernández, J. A. Sierra Herrera, S. Ruiz Fonseca, and J. A. Sandoval Herrera, "Diseño de un fotobiorreactor Airlift a escala banco," *ELEMENTOS*, vol. 4, no. 4, Nov. 2014, doi: 10.15765/e.v4i4.520.
- [46] "AVANCES EN EL DISEÑO CONCEPTUAL DE FOTOBIORREACTORES PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS." https://www.researchgate.net/publication/237243095_AVANCES_EN_EL_DISEÑO_CONCEPTUAL_DE_FOTOBIORREACTORES_PARA_EL_CULTIVO_DE_MICROALGAS (accessed Dec. 03, 2020).
- [47] "Diferencias básicas entre el metacrilato y policarbonato | Monje Hnos." [Online]. Available: <https://monjehnos.com/metacrilato-o-policarbonato/> (accessed Dec. 03, 2020).
- [48] B.B Torres y F.N Cerón, Evaluación de la captura de CO2 para la mejora del biogás, mediante un cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* en un sistema de biorreactores a nivel laboratorio, proyecto de grado, facultad de ingenierías, Fundación Universidad de America, Bogota D.C, 2020.
- [49] M. Fernández, "Diseño , montaje y caracterización de fotobiorreactores airlift para el cultivo de la microalga *Chlorella sorokiniana*," p. 47, 2013.
- [50] F. López, R. Rojas, A. Barajas, and V. Kafarov, "PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES DE TERCERA GENERACIÓN: DISEÑO DE FOTOBIORREACTORES A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE MICROALGAS."
- [51] Z. liang Sun, L. qin Sun, and G. zhong Chen, "Microalgal Cultivation and Nutrient Removal from Digested Piggery Wastewater in a Thin-film Flat Plate

Photobioreactor,” *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 187, no. 4, pp. 1488–1501, Apr. 2019, doi: 10.1007/s12010-018-2889-x.

[52] Y. K. Wong, K. C. Ho, Y. F. Tsang, L. Wang, and K. K. L. Yung, “Cultivation of *Chlorella vulgaris* in Column Photobioreactor for Biomass Production and Lipid Accumulation,” *Water Environ. Res.*, vol. 88, no. 1, pp. 40–46, Jan. 2016, doi: 10.2175/106143015x14362865227553.

[53] Z. A. Khoeyi, J. Seyfabadi, and Z. Ramezanzpour, “Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae, *Chlorella vulgaris*,” *Aquac. Int.*, vol. 20, no. 1, pp. 41–49, Feb. 2012, doi: 10.1007/s10499-011-9440-1.

[54] H. Gutierrez y R. De la vara. (2008). Análisis y diseño de experimentos. (2da edición). [Online]. Available: https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf

[55] J. M. Lv, L. H. Cheng, X. H. Xu, L. Zhang, and H. L. Chen, “Enhanced lipid production of *Chlorella vulgaris* by adjustment of cultivation conditions,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 17, pp. 6797–6804, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.120.

[56] A. González Céspedes, “¿Qué Son Las Microalgas?,” *Cajamar ADN Agro*, vol. 011, pp. 1–11, 2015. [Online]. Available: <https://www.cajamar.es/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/investigacion/documentos-y-programas/microalgas-1444391623.pdf>

[57] J. E. Abalde Alonso, A. Cid Blanco, J. P. Fidalgo Paredes, J. E. Torres Vaamonde, and C. Herrero López, *Microalgas: Cultivo y aplicaciones*. 1995. [Online]. Available: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/25013/Abalde_Julio_1995_Microalgas_cultivo_aplicaciones.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- [58] N. Garzón, "Filogenia de los seres vivos: dominio Archaea," *Fac. Farm. Univ. Sevilla Septiembre*, p. 40, 2017, [Online]. Available: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/66487>.
- [59] "Biocombustibles," pp. 99–116, 2010, doi: 10.1787/agr_outlook-2010-6-es.
- [60] I. C. Calderón-Delgado, D. A. Mora-Solarte, and Y. M. Velasco-Santamaría, "Physiological responses and antioxidant capacity of chlorella vulgaris (Chlorellaceae) exposed to phenanthrene," *Acta Biol. Colomb.*, vol. 25, no. 2, pp. 225–234, 2020, doi: 10.15446/abc.v25n2.77783.
- [61] A. Estrada Paneque, M. Gallo González, and E. Nuñez Arroyo, "Contaminación Ambiental, Su Influencia En El Ser Humano, En Especial: El Sistema Reproductor Femenino," *Rev. Univ. y Soc.*, vol. 8, no. 3, pp. 80–86, 2016.
- [62] C. M. Gutiérrez and J. D. Moreno, "Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional," *Ing. Hidráulica Y Ambient.*, vol. XXXIX, no. 3, pp. 97–107, 2018.
- [63] J. C. Schallenberg *et al.*, *Energías renovables y eficiencia energética*.
- [64] S. Velásquez Vásquez and A. Ulate Brenes, "Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor tubular para producir la microalga Chlorella sp.," *Cienc. y Tecnol. Rev. la Univ. Costa Rica*, vol. 30, no. 1, pp. 28–49, 2014.
- [65] M. B. Sathicq, M. Arias, and N. Ferrando, "Optimización de un cultivo de Chlorella vulgaris en función del fotoperíodo y del control de pH," no. November, 2017.
- [66] E. P. Carril, "Fotosíntesis : Aspectos Básicos," vol. 2, no. 3, pp. 1–47, 2009.

GLOSARIO

Aguas residuales: son definidas como todo tipo de agua que contienen gran cantidad de elementos contaminantes debido a que son afectadas por la acción del ser humano, ya sea por el uso del agua en los entornos domésticos y urbanos, industrias y ganadería, entre otros. [2]

Arqueas: son un gran grupo de microorganismos procariotas unicelulares que al igual que las bacterias no presentan núcleo ni orgánulos membranosos internos [58].

Biocombustible: son los productos procedentes de la transformación física, química o biológica de las fuentes de biomasa y que se utilizan como combustibles, pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos [59].

Biomasa: se entiende por biomasa, en términos energéticos, un combustible procedente de productos y residuos naturales, tales como los provenientes de la agricultura, de la actividad forestal e industrias ligadas al bosque, y la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos [59].

Chlorella vulgaris: microalga unicelular perteneciente al reino protista de forma esférica de diámetro aproximado de 2 a 10µm de color verde presente en la mayoría de cuerpos de agua dulce [60].

Contaminación ambiental: se le conoce contaminación ambiental a la presencia de compuestos nocivos ya sean químicos, físicos o biológicos en el medio ambiente, que puedan afectar a los seres vivos [61].

Demanda biológica de oxígeno (DBO): es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas facultativas: *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra [62].

Demanda química de oxígeno (DQO): es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono y agua [62].

Energías renovables: son aquellas cuyo potencial es inagotable, debido a que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua. Son fundamentalmente la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y marinas [63].

Fotobiorreactor: son dispositivos utilizados para el cultivo masivo de microalgas. Por esto, deben mantener un medio estable con respecto a la temperatura, pH, concentración de oxígeno y la intensidad de la luz, para proveer los nutrientes necesarios para el crecimiento [64].

Fotoperiodo: relación entre horas de luz y oscuridad a la que está sometido un microorganismo [65].

Fotosíntesis: proceso en el cual un microorganismo con clorofila captura la energía en forma de luz y la transforma en energía química [66].

Intensidad lumínica: es la potencia percibida por unidad de ángulo sólido [65].

Microalgas: son microorganismos unicelulares eucarióticos que contienen clorofila y otros pigmentos fotosintéticos, capaces de realizar fotosíntesis oxigénica [14].

Oxígeno disuelto (OD): es la cantidad de oxígeno gaseoso que esta disuelto en el agua, este oxígeno se disuelve con facilidad hasta que el agua se satura, una vez disuelto, se difunde lentamente y su distribución depende del movimiento del agua [62].

pH: es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución [65].

Temperatura: grado o nivel térmico de un cuerpo o de la atmósfera [16].

ANEXOS

ANEXO 1

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y para verificar que las condiciones de operación delimitadas sean las adecuadas para el óptimo desempeño en el fotobiorreactor, se propone una metodología basada en un diseño de experimentos.

Para entrar en contexto, el diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor las situaciones complejas de relación causa-efecto [53].

Para el desarrollo del diseño experimental se plantea hacer uso de la guía de los siete (7) pasos que consta de [53]:

1. Identificación y exposición del problema: El problema de estudio radica en encontrar los parámetros adecuados para alcanzar una alta productividad de biomasa de *Chlorella vulgaris* en el fotobiorreactor.

2. Elección de las variables y niveles: Las variables a tener en cuenta para conocer el efecto de los resultados de cada prueba experimental en el sistema son las siguientes:

a. Variables independientes (factores): Carga orgánica de alimentación al FBR e intensidad lumínica.

b. Variables dependientes: pH, carga orgánica en la salida del FBR.

Las variables independientes, es decir la carga orgánica de alimentación al FBR y la intensidad lumínica fueron consideradas como parámetros influyentes en el crecimiento microalgal, ya que la carga orgánica es el factor encargado en el aporte de los nutrientes necesarios y la intensidad lumínica incide sobre los procesos de fotosíntesis y de proliferación celular. Por otro lado, las variables dependientes como el pH y la carga orgánica en la salida del FBR, poseen relación directa con los factores

independientes, debido a que cambios en estos factores de entrada ocasionan alteraciones en sus valores finales.

Los rangos son intervalos determinados dentro del valor mínimo y el valor máximo de cada factor determinado a partir de lo mencionado anteriormente:

- a. **Carga orgánica DQO de alimentación al FBR:** 100 a 300 g/L.
- b. **Intensidad lumínica:** 7000 lx a 12000 lx.

Los niveles son los valores asignados para cada factor en un diseño experimental, en este caso se van a emplear 3 niveles para cada factor, los niveles son [53]:

a. Carga orgánica DQO de alimentación al FBR:

Nivel bajo: 100 g/L

Nivel medio: 200 g/L

Nivel alto: 300 g/L

b. Intensidad lumínica:

Nivel bajo: 7000 lx

Nivel medio: 9000 lx

Nivel alto: 12000 lx

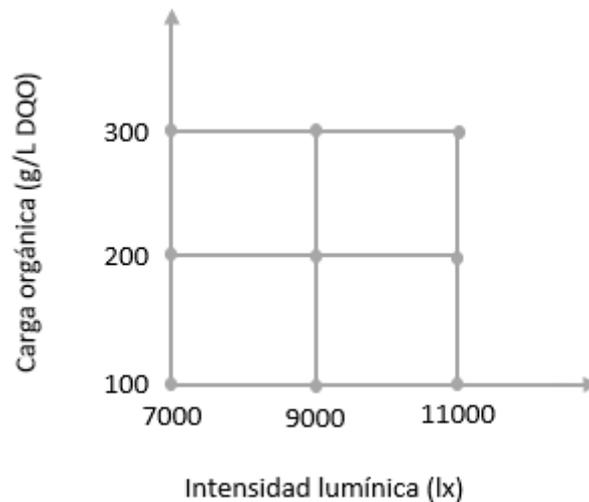
3. Selección de la variable de respuesta: La variable de respuesta es el crecimiento de biomasa debido a que, a partir de los resultados de este parámetro, se lograra la estimación del buen desempeño del fotobiorreactor.

4. Elección del diseño experimental:

A partir del tipo de estudio y resultados esperados, se decide hacer uso de un diseño factorial, ya que permite comprender el efecto de dos variables independientes respecto de una única variable de respuesta. Además de simplificar el proceso y presentar disminución en el costo de investigación, permite múltiples niveles de análisis, resalta la relación entre las variables y muestra los efectos de la manipulación proporcionados por una sola variable [54].

De acuerdo con esto, para la experimentación se llevará a cabo un diseño factorial con $K=2$ factores, ambos con tres niveles (bajo, medio y alto), donde se forma el diseño factorial $3 \times 3 = 3^2$ que consiste en 9 combinaciones o puntos experimentales. De igual forma, el diseño establece que se debe duplicar los experimentos, por lo que el total de repeticiones para cada tratamiento es de 18.

Figura 11.
Arreglo factorial.



Nota. La figura evidencia el arreglo factorial propuesto.

5. Realización del experimento: este paso consta de una serie de pruebas de las variables de entrada para medir el efecto del cambio en los resultados, que será desarrollada por el experimentador.

6. Análisis estadístico de los datos: el tratamiento estadístico propuesto para verificar los resultados obtenidos es un ANOVA (análisis de varianza), que consta del procesamiento de todos los datos del experimento, con la finalidad de determinar si existe o no variación entre los parámetros.

Partiendo de la elección del tratamiento estadístico, a continuación, se mostrará un ejemplo de referencia. Cabe aclarar que no corresponde a un experimento real sino a la construcción de un estimado para dar una idea de cómo debe llevarse a cabo la metodología propuesta.

Los datos numéricos fueron tomados de los artículos "*Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae, Chlorella*

vulgaris” [53] y “*Enhanced lipid production of Chlorella vulgaris by adjustment of cultivation conditions*” [55].

Los rangos de intensidad lumínica y carga orgánica de entrada al FBR para el ejemplo están entre 1000 a 9000 lx y 100 a 300 mg/L de DQO.

Los datos del estudio son los siguientes:

Tabla 20.

Niveles para los factores del diseño de experimentos.

Intensidad lumínica (lx)	
A1	1776
A2	4440
A3	8880
Carga orgánica (mg/L de DQO)	
B1	100
B2	200
B3	300

Nota. La tabla muestra los niveles para los factores del diseño de experimentos del experimento.

Tabla 21.

Datos experimentales supuestos de concentración de biomasa por interacción entre parámetros.

		INTENSIDAD LUMÍNICA (lx)		
		A1	A2	A3
CARGA ORGÁNICA (mg/L de DQO)	B1	0,37	0,70	0,63
		0,36	0,68	0,62
	B2	0,39	0,76	0,69
		0,40	0,75	0,67
	B3	0,47	0,80	0,70
		0,48	0,82	0,72

Nota. La tabla representa los datos experimentales de concentración de biomasa en g/L recopilados en la interacción de factores.

Para desarrollar el análisis estadístico (ANOVA), se hace uso de la herramienta Excel, donde por medio de la opción análisis de datos se realiza el procesamiento

de los datos para determinar si existe variación entre las variables y su interacción entre ellas. El valor de alfa utilizado fue de 0,05.

Tabla 22.

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo del ejemplo de referencia.

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo				
RESUMEN	A1	A2	A3	Total
B1				
Cuenta	2	2	2	6
Suma	0,73	1,38	1,25	3,36
Promedio	0,365	0,69	0,625	0,56
Varianza	5E-05	0,0002	5E-05	0,02372
B2				
Cuenta	2	2	2	6
Suma	0,79	1,51	1,36	3,66
Promedio	0,395	0,755	0,68	0,61
Varianza	5E-05	5E-05	0,0002	0,02892
B3				
Cuenta	2	2	2	6
Suma	0,95	1,62	1,42	3,99
Promedio	0,475	0,81	0,71	0,665
Varianza	5E-05	0,0002	0,0002	0,02375
Total				
Cuenta	6	6	6	
Suma	2,47	4,51	4,03	
Promedio	0,411666667	0,751666667	0,671666667	
Varianza	0,002616667	0,002976667	0,001576667	

Nota. La tabla representa una serie de datos calculados para llevar a cabo el análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo.

Tabla 23.

Análisis de varianza para el ejemplo de referencia.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	0,0331	2	0,01655	141,8571429	1,56709E-07	4,256494729
Columnas	0,3792	2	0,1896	1625,142857	3,0552E-12	4,256494729
Interacción	0,0017	4	0,000425	3,642857143	0,049665564	3,633088511
Dentro del grupo	0,00105	9	0,000116667			
Total	0,41505	17				

Nota. La tabla representa una serie de parámetros calculados para llevar a cabo el análisis de varianza

En la **Tabla 23**, se evidencia que el valor de F calculado para la carga orgánica es mayor (141,85) al valor de F representado para la distribución de Fisher (4,2564) para el primer factor, lo que significa que al ser mayor existe una diferencia significativa en el crecimiento microalgal entre cada una de las cargas orgánicas.

Lo mismo sucede con la segunda variable que es la intensidad lumínica, donde se observa 1625 contra 4, 25, lo que representa que también existe una variación significativa entre cada valor de intensidad lumínica. Con respecto a la interacción de las dos variables, se analiza que el F calculado (3,64) es mayor al valor de F representado para la distribución de Fisher, lo que indica que hay diferencias en el crecimiento de biomasa cuando las dos variables son ejercidas. De igual manera, se puede observar que en el análisis independiente de cada una de las variables el valor de P (promedio) se encuentra por debajo del alfa de 0.05, lo que manifiesta una certidumbre de la relación con más del 95 % de veracidad, al igual que en la interacción de las dos variables.

7. Conclusiones: este último paso de la guía se atribuye en la finalización de los experimentos, con la recolección de información y análisis propio del experimentador.

Con el planteamiento, desarrollo y finalización de esta metodología se espera determinar las condiciones y características adecuadas para el crecimiento exponencial del cultivo en el fotobiorreactor, para que junto con el UASB se logre un sistema con altos rendimientos.