

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA AGITACIÓN PARA LA  
PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROALGAL EN UN FBR PANEL PLANO A  
ESCALA LABORATORIO**

**JENNIFER LISETH DONCEL NUÑEZ  
HEIDY LILIANA MORENO SABOYA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA AGITACIÓN PARA LA  
PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROALGAL EN UN FBR PANEL PLANO A  
ESCALA LABORATORIO**

**JENNIFER LISETH DONCEL NUÑEZ  
HEIDY LILIANA MORENO SABOYA**

**Proyecto integral de grado para optar el título:  
INGENIERO QUIMICO**

**Director  
DIEGO RUBIO  
Biólogo**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bogotá, D.C., Septiembre 2017**

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrectoría de Desarrollo y Recursos humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Secretario General

**Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA**

Decano Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director de Investigaciones

**Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS**

Director Programa de Ingeniería Química

**Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ**

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

## DEDICATORIA

*En primer lugar, dedico este proyecto de grado a DIOS ya que sin él no podría haber cumplido este gran logro y por permitirme encontrar en mi camino personas tan maravillosa.*

*A mis padres por estar siempre a mi lado, por apoyarme, por su paciencia y comprensión. Quiero dedicarles este logro porque sin su ayuda no sería posible.*

*A mi abuela Luz Mila por estar siempre a mi lado, por creer en mí, por su dedicación y comprensión en cada momento difícil o bueno de este camino hacia el gran logro.*

*A Diego Calderón quien estuvo siempre conmigo ayudándome con amor, paciencia y dedicación, agradezco desde lo más profundo a DIOS por permitirme conocer y compartir mi vida al lado de él.*

*A mi familia, que de alguna u otra manera me abrieron las puertas de sus hogares para poder iniciar este logro.*

*Por último, a Heidy Moreno por su compañía, dedicación en este proyecto de grado, y a su familia quienes me brindaron mucho amor y fueron parte importante durante este proceso.*

**Jennifer Liseth Doncel Núñez**

## DEDICATORIA

*Inicialmente, dedico este trabajo a Dios y a la Virgen, quienes en su gracia han puesto en mi camino personas maravillosas.*

*A mis padres, por hacerme la persona quien soy; por todo su trabajo, colaboración, comprensión y apoyo, sin los cuales no hubiese llegado jamás a donde me encuentro.*

*A cada miembro de mi familia, por su preocupación y compañía, por cada uno de los detalles e instantes compartidos.*

*A mis compañeros, por brindarme tan buenos e increíbles momentos, por compartirme parte de su sabiduría la cual me permitió y me permite tener un punto de vista diferente de las cosas.*

*A mi compañera Jennifer Doncel por su paciencia, comprensión y entrega en el transcurso de este proyecto y a su familia por el apoyo incondicional manifestado en el desarrollo del mismo.*

*En definitiva, mis agradecimientos a todas y cada una de aquellas personas que han sido participes en el recorrido de este camino, porque sin su confianza nada de esto hubiese sido posible.*

**Heidy Liliana Moreno Saboyá**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La universidad de América, que, en colaboración con un grupo de docentes de alta calidad, nos formaron como ingenieras químicas.

Al grupo de investigación BIOTECFUA, que nos formó como investigadores y nos brindó la oportunidad de pertenecer a un equipo de trabajo que nos enseñó y permitió fortalecer nuestros conocimientos respecto a procesos biotecnológicos.

A Diego Rubio, que en su calidad de director confió siempre en nosotras y nos guio para alcanzar este proyecto.

A los jurados por su asesoría, aportes y consejos que nos incentivaron a crecer como profesionales y como personas.

A todas aquellas personas que aportaron de una u otra forma con su conocimiento y sobre todo tiempo para llevar a cabo cada fase de este proyecto.



## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	22
<b>OBJETIVOS</b>	23
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	24
<b>1.1 MICROALGA</b>	24
<b>1.2 <i>CHLORELLA VULGARIS</i></b>	24
<b>1.3 CONDICIONES DE CULTIVO</b>	25
<b>1.3.1 Turbulencia</b>	25
<b>1.3.2 Oxígeno disuelto y pH</b>	25
<b>1.3.3 Carbono</b>	25
<b>1.4 SISTEMA DE CULTIVO</b>	26
<b>1.5 AGITACIÓN</b>	29
<b>1.5.1 Dispositivos de agitación en biorreactores</b>	29
<b>1.5.1.1 Turbina y hélices</b>	30
<b>1.5.1.2 Difusores de burbujas</b>	30
<b>1.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGITACIÓN</b>	31
<b>1.7 LOS DIÁMETROS DE ASPERSOR EN EL DIFUSOR</b>	34
<b>1.7.1 Burbujas pequeñas</b>	35
<b>1.7.2 Burbujas grandes</b>	35
<b>1.8 LA IMPORTANCIA DEL CAUDAL DE AIRE</b>	36
<b>1.9 EL CO<sub>2</sub> Y SU IMPORTANCIA ACTUAL</b>	37
<b>1.10 EL CO<sub>2</sub> EN EL CULTIVO</b>	38
<b>1.11 EL CO<sub>2</sub> Y LA MICROALGA</b>	38
<b>1.12 LA IMPORTANCIA DE LA TRANSFERENCIA DE MASA</b>	39
<b>1.13 MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA EN UN FBR PANEL PLANO</b>	39
<b>1.13.1 Teoría de la película</b>	39

1.13.2 Balance de materia de CO <sub>2</sub>	41
<b>2. METODOLOGÍA</b>	43
2.1 OBTENCIÓN DE LA CEPA MICROALGAL	45
2.2 PREPARACIÓN DEL MEDIO DE CULTIVO	45
2.3 PREPARACIÓN DEL INÓCULO	45
2.4 ESCALAMIENTO DEL CULTIVO	47
2.5 DESARROLLO DE LA PRE-EXPERIMENTACION	49
2.5.1 Sistema de agitación	49
2.5.2 Control del fotoperiodo	50
2.5.3 Construcción del fotobiorreactor panel plano	50
2.5.3.1 Materiales y dimensionamiento	50
2.5.3.2 Control de temperatura en el FBR	52
2.5.3.3 Dimensionamiento de los difusores	52
2.5.3.4 Agitación del FBR	52
2.5.3.5 Implementación de la agitación en el FBR	53
2.6 MONTAJE DEL SISTEMA DE LA PARTE PRE-EXPERIMENTAL	53
2.6.1. Medición de la presión	54
2.7 CONTEO CELULAR DE MICROORGANISMOS	55
2.8 ANÁLISIS DE VARIANZA	56
2.9 COMPARACIÓN ENTRE PAREJAS: Método C.W. Dunnet	56
2.10 DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	57
2.10.1 Selección de la concentración de CO <sub>2</sub>	57
2.10.2 Montaje del sistema	58
2.10.2.1 Sistema de agitación	59
2.10.2.1.1 Cilindro de CO <sub>2</sub>	59
2.10.2.1.2 Regulador de flujo	60
2.10.2.2 Tarjeta CO <sub>2</sub> K-33 ICB	60
2.10.2.3 Sistema de monitoreo de pH	61
2.11 CONTEO CELULAR DE LA MICROALGA EN LA EXPERIMENTACION	61
2.11.1 Tasa de crecimiento o velocidad específica de crecimiento	62

<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	63
<b>3.1 PARTE PRE-EXPERIMENTAL</b>	63
3.1.1 Dimensionamiento de los difusores	63
3.1.2 Presión de entrada al sistema	64
3.1.3.1 Análisis estadístico	67
<b>3.2 PARTE EXPERIMENTAL</b>	70
3.2.1 Curvas de crecimiento con CO <sub>2</sub>	71
3.2.1.1 Método de conteo mediante cámara Neubauer	71
<b>4. ECUACIONES DE LA TRANSFERENCIA DE MASA EN UN FBR PANEL PLANO</b>	75
<b>4.1 INTERFACE GAS-LÍQUIDO</b>	76
4.1.1 La masa de CO <sub>2</sub> que ingresa al cultivo	76
<b>4.2 INTERFACE LÍQUIDO-SÓLIDO</b>	78
4.2.1 La masa de CO <sub>2</sub> acumulada en el cultivo	78
<b>4.3 MASA DE CO<sub>2</sub> CONSUMIDA EN EL CULTIVO</b>	79
<b>4.4 MASA DE CO<sub>2</sub> QUE SALE DEL CULTIVO</b>	79
<b>5. CONCLUSIONES</b>	80
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	81
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	82
<b>ANEXOS</b>	87

## ABREVIATURAS

$a$	Área interfacial ( $m^{-1}$ ).
$\varepsilon$	Atrapamiento total del gas.
$k_L$	Coefficiente de transferencia de masa ( $s^{-1}$ ).
$k_L a$	Coefficiente de transferencia de masa volumétrico global ( $s^{-1}$ ).
$[dCO_2]$	Concentración $CO_2$ disuelto en fase líquida ( $mol/m^3$ ).
$[CO_2^*]$ ( $mol/m^3$ ).	Concentración de $CO_2$ disuelto en la fase líquida sobre la interfase
$H$	Constante de Henry a la temperatura T(K) ( $Pa\ m^3/mol$ ).
$R$	Constante universal de los gases ( $m^3\ Pa/K\ mol$ ).
$d_B$	Diámetro de la burbuja ( $m^{-1}$ ).
$\tau$	Duración media burbujas (s).
$\Gamma$	Flujo de $CO_2$ fuera del FBR ( $mol/s$ ).
$J$	Flujo de gas a través del FBR es constante ( $m^3/s$ ).
$\alpha_{CO_2}$	Flujo de transferencia de masa de $CO_2$ de las burbujas al medio líquido ( $mol/ m^3\ s$ ).
$N_A''$	Flujo por unidad de área ( $mol/m^2s$ ).
$P_{CO_2}^{out}$	Presión parcial de $CO_2$ a la salida del FBR (Pa).
$P_{CO_2(t=\tau)}^{burbuja}$	Presión parcial de $CO_2$ al tiempo $\tau$ (Pa).
$P_{CO_2}^{In}$	Presión parcial de $CO_2$ en la burbuja a la entrada del FBR (Pa).
$P_{CO_2}^X$	Presión parcial de $CO_2$ en la burbuja entrando al FBR en el espacio de cabeza (Pa).
$P_{CO_2(t)}^{burbuja}$	Presión parcial instantánea de $CO_2$ en una burbuja en el tiempo t (Pa).
$N_B$	Promedio Burbujas.
$r_B$	Radio medio eficaz (m).
$R_m$	Resistencia a la transferencia de masa.
$S_B$	Superficie de la burbuja ( $m^2$ ).
$k[dCO_2]$	Velocidad con que el $CO_2$ reacciona dentro del cultivo.

- $\mu$  Velocidad específica de crecimiento celular ( $s^{-1}$ ).
- $\dot{N}_a$  Velocidad volumétrica de transferencia de masa ( $mol/m^3s$ ).
- $V_G$  Volumen de burbujas de gas en el FBR ( $m^3$ ).
- $V_B$  Volumen de la burbuja ( $m^3$ ).
- $V_L$  Volumen de líquido ( $m^3$ ).
- $\mu_{max}$  Máxima velocidad específica ( $s^{-1}$ ).
- $K_S$  Concentración de sustrato a la que se alcanza una tasa de crecimiento igual a la mitad del valor máximo ( $mol/m^3$ ).
- $N_A^*$  Flujo por unidad de longitud ( $mol/m s$ ).
- $C_{CO_2i}$  Concentración de  $CO_2$  en el límite de fase ( $mol/m^3$ ).

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Comparación entre estanques y FBRs para el cultivo de microalgas.	27
<b>Tabla 2.</b> Tipos de fotobiorreactores.	27
<b>Tabla 3.</b> Sistemas de agitación FBRs	31
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y desventajas con relación al tamaño de burbuja	36
<b>Tabla 5.</b> Cuadro comparativo de la concentración de CO <sub>2</sub> por especie y tipo de FBR reportada en artículos científicos	57
<b>Tabla 6.</b> Distancia entre aspersores para cada diámetro de difusor	63
<b>Tabla 7.</b> Valores necesarios para la ecuación de continuidad	64
<b>Tabla 8.</b> Valores ecuación de Bernoulli	65
<b>Tabla 9.</b> Tasas de crecimiento	66
<b>Tabla 10.</b> Resultados Análisis de varianza ANOVA	67
<b>Tabla 11.</b> Análisis de varianzas desiguales entre los grupos de 1mm y 2 mm	68
<b>Tabla 12.</b> Análisis de varianzas desiguales entre los grupos de 2 mm y 4 mm	68
<b>Tabla 12.</b> (Continuación)	69
<b>Tabla 13.</b> Análisis de varianzas desiguales entre los grupos de 1 mm y 4 mm	69
<b>Tabla 14.</b> Valores de los volúmenes en la mezcla y densidades	70
<b>Tabla 15.</b> Masa de la mezcla	70
<b>Tabla 16.</b> Valores ecuación de Bernoulli	71
<b>Tabla 17.</b> Tasas de crecimiento con CO <sub>2</sub>	74
<b>Tabla 18.</b> Composiciones del fertilizante Foliagro.	88
<b>Tabla 19.</b> Concentraciones celulares y Ln promedio para 1 mm de diámetro de aspersor.	99
<b>Tabla 20.</b> Concentraciones celulares y Ln promedio para 2 mm de diámetro de aspersor.	100
<b>Tabla 21.</b> Concentraciones celulares y Ln promedio para 4 mm de diámetro de aspersor.	101
<b>Tabla 22.</b> Concentraciones celulares y Ln promedio para 1 mm de diámetro de aspersor con CO <sub>2</sub> .	102
<b>Tabla 23.</b> Concentraciones celulares y Ln promedio para 2 mm de diámetro de aspersor con CO <sub>2</sub> .	103
<b>Tabla 24.</b> pH registrado en cada réplica, bajo 1 mm de diámetro de aspersor con CO <sub>2</sub>	104
<b>Tabla 25.</b> pH registrado en cada réplica, bajo 2 mm de diámetro de aspersor con CO <sub>2</sub>	104

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Chlorella vulgaris.	25
<b>Figura 2.</b> Diferentes móviles de agitación a) turbina b) hélice c) hélice.	30
<b>Figura 3.</b> Difusor y aspersor	34
<b>Figura 4.</b> Relación entre la agitación, agarre del gas y coeficiente volumétrico de transferencia de masa.	37
<b>Figura 5.</b> Esquema sobre los pasos del modelo de película.	41
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo de la metodología	43
<b>Figura 7.</b> Horno para esterilizar y sus respectivas especificaciones	45
<b>Figura 8.</b> Incubadora	46
<b>Figura 9.</b> Incubadora con las lámparas de halógeno	46
<b>Figura 10.</b> Temporizador digital	47
<b>Figura 11.</b> Recipiente de vidrio	47
<b>Figura 12.</b> Montaje del cultivo	48
<b>Figura 13.</b> Fase inicial del cultivo en la incubadora	48
<b>Figura 14.</b> Bomba y filtro de trompo	49
<b>Figura 15.</b> Lámina de las caras frontales	50
<b>Figura 16.</b> Lámina de las caras laterales	51
<b>Figura 17.</b> Lámina superior	51
<b>Figura 18.</b> Características del tubo difusor	52
<b>Figura 19.</b> FBR panel plano	53
<b>Figura 20.</b> Montaje del sistema de la parte pre-experimental	53
<b>Figura 21.</b> Conteo en zing-zang	55
<b>Figura 22.</b> Montaje del sistema experimental	59
<b>Figura 23.</b> Etiqueta de la mezcla en el cilindro	59
<b>Figura 24.</b> Cilindro de CO <sub>2</sub> y regulador de flujo	60
<b>Figura 25.</b> Tarjeta K-33 ICB	60
<b>Figura 26.</b> pHmetro	61
<b>Figura 27.</b> Dimensionamiento del espaciamiento entre los aspersores de los tubos difusores	64
<b>Figura 28.</b> Esquema de la transferencia de masa	75

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Especificación del fertilizante foliagro	88
Anexo B. Características de los manómetros	89
Anexo C. Certificado de análisis de la mezcla 9% CO <sub>2</sub> y 91% aire	90
Anexo D. Ficha técnica de la mezcla	91
Anexo E. Hoja de datos de seguridad del dióxido de carbono en oxígeno y nitrógeno	92
Anexo F. Certificado de calibración y ensayo del sensor k-33 ICB	98
Anexo G. Concentraciones celulares en el pre-experimento	99
Anexo H. Concentraciones celulares en el pre-experimento	100
Anexo I. Concentraciones celulares en el pre-experimento	101
Anexo J. Concentraciones celulares en el experimento	102
Anexo K. Concentraciones celulares en el experimento	103
Anexo L. pH registrados con los diámetros de aspersor en el difusor	104



## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Curvas de crecimiento de Chlorella Vulgaris a los diferentes diámetros de aspersor	66
<b>Gráfica 2.</b> Curva de crecimiento con CO <sub>2</sub> a 2 mm diámetro en el aspersor.	72
<b>Gráfica 3.</b> Curva de crecimiento con CO <sub>2</sub> a 1 mm diámetro en el aspersor.	72
<b>Gráfica 4.</b> Curvas de crecimiento con CO <sub>2</sub> a los diferentes diámetros de aspersor.	73

## GLOSARIO

**AGITACIÓN:** se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente.

**ÁREA INTERFACIAL:** área disponible entre las burbujas de gas y el líquido que la rodea para efectuar la transferencia de masa.

**ASPERSOR:** orificios que se encuentran perforados en el difusor.

**BIOFIJACIÓN:** las microalgas tienen la capacidad de biofijación de  $\text{CO}_2$  en su biomasa y representan hoy en día una de las alternativas más importantes para el enfrentamiento al calentamiento global.

**BURBUJA:** es un cuerpo esférico de aire o gas, formado dentro de un líquido. El límite físico de la burbuja está formado por el medio líquido en el que se encuentre.

**CÁMARA DE NEUBAUER:** instrumento utilizado en medicina y biología para el recuento de microorganismos o células en un medio líquido, que puede ser cultivo celular, orina, sangre, etc.

**CEPA:** población de células de una sola especie que proviene de una única célula, donde viven, crecen y mueren en un medio de cultivo establecido.

**COALESCENCIA:** es la posibilidad de dos o más materiales de unirse en un único cuerpo cuando varias burbujas se unen forman una burbuja mayor disminuyendo su área y la transferencia de masa.

**COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE  $\text{CO}_2$ :** el coeficiente de transferencia de  $\text{CO}_2$  ( $k_{\text{LA}}$ ) es una medida de la transferencia de  $\text{CO}_2$  de la fase gaseosa a la fase líquida.

**CURVA DE CRECIMIENTO:** representación gráfica de la concentración celular por mililitro en unos lapsos de tiempo, presenta 4 fases: adaptación, exponencial, estacionaria y muerte.

**DIFUSIÓN MOLECULAR:** la difusión molecular es el movimiento de las moléculas componentes en una mezcla bajo la influencia de una diferencia de concentración en el sistema. La difusión de moléculas ocurre en la dirección requerida para destruir el gradiente de concentración.

**DIFUSOR:** es un dispositivo que permite reducir la velocidad y aumentar la presión de un fluido que pasa a través de un sistema.

**DIOXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>):** es un gas incoloro, denso y poco reactivo. se genera cuando se quema cualquier sustancia que contiene carbono. Las plantas absorben dióxido de carbono durante la fotosíntesis.

**ESCALAMIENTO:** operación que involucra el incremento de volumen en un cultivo.

**FERTILIZANTE FOLIAR:** sustancia utilizada para la fertilidad de los suelos, ayuda adquirir los nutrientes necesarios que el suelo carece.

**FOTOBIORREACTOR:** son dispositivos utilizados para el cultivo de microalgas, estas se deben mantener en un medio estable (temperatura, pH, baja concentración de O<sub>2</sub>) y proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento incluyendo la luz.

**FOTOPERIODO:** relación entre luz y oscuridad a la que está sometido un microorganismo para su crecimiento.

**INCUBADORA:** equipo creado para simular condiciones adecuadas para el crecimiento de microorganismos.

**INÓCULO:** suspensión de microorganismos vivos adaptados para reproducirse en un medio específico.

**MEDIO DE CULTIVO:** material nutritivo que se usa en los laboratorios para estimular el crecimiento de microorganismos vivos.

**MICROALGA:** son organismos fotoautótrofos, es decir, obtienen la energía de la luz proveniente del sol. Son altamente eficientes en la fijación del CO<sub>2</sub> y utilización de la energía solar para producir biomasa, con una eficiencia hasta cuatro veces superior a la de las plantas.

**RETENCIÓN DEL GAS ( $\epsilon$ ):** determina el tiempo de residencia del gas en el líquido, junto con el tamaño determina el área interfacial gas-líquido disponible para la transferencia de masa.

**TIEMPO DE RESIDENCIA:** en procesos continuos, es el tiempo en que un elemento fluido particular permanece en una región dada del biorreactor.

**VELOCIDAD SUPERFICIAL:** velocidad aparente de un fluido en el sistema.

**VOLUMEN EFECTIVO:** generalmente los bioreactores se llenan hasta un 70% de su capacidad debido a la formación de espuma.

## RESUMEN

El presente proyecto evalúa la influencia de la agitación sobre la producción de biomasa en un fotobiorreactor panel plano, mediante la modificación de los aspersores en el difusor los cuales forman la burbuja. Como primera medida, se elaboraron 3 difusores con diámetros de aspersor diferentes (1, 2 y 4 mm), estos fueron puestos a prueba para afectar la formación de la burbuja en el FBR, a continuación, mediante un análisis de varianza de un factor (ANOVA) y la prueba t se definieron los niveles (diámetros de aspersor) que afectan a la variable respuesta (tasa de crecimiento), seleccionando dos de los 3 difusores implementados (1 y 2 mm).

Con los diámetros de aspersor anteriormente seleccionados y como parte experimental se adicionó CO<sub>2</sub> al 9% v/v y se obtuvo una tasa de crecimiento de 0.37 días<sup>-1</sup> con 1 mm como diámetro de aspersor en el difusor y de 0.35 días<sup>-1</sup> con 2 mm como diámetro de aspersor, lo cual indica que a menor diámetro de aspersor en el difusor mayor tasa de crecimiento; lo anterior, utilizando un caudal de 0.17 vvm y una presión parcial de CO<sub>2</sub> de 0.225 KPa, que evitó reducir el pH y de esta manera disminuir la actividad fotosintética e inhibir el crecimiento.

Por otra parte, fue posible aproximarse a plantear de manera teórica, las ecuaciones de transferencia de masa para el FBR panel plano; verificando que la disminución del tamaño de la burbuja y por lo tanto el aumento del área interfacial promueve la transferencia de masa entre las fases gas-liquido.

**Palabras clave:** Microalgas, fotobiorreactores, agitación, difusor, dióxido de carbono.

## INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación BIOTECFUA en su objetivo de mejorar las condiciones para el crecimiento de la microalga ha desarrollado diferentes proyectos en los cuales se evalúa el crecimiento desde varios tipos de FBRs, entre estos los tipo placa plana y airlift, sin embargo, no se ha determinado hasta el momento un análisis con respecto a la agitación, por lo que este trabajo de grado busca proponer e incluir este factor (agitación) en el cultivo de la microalga, la cual es una alternativa prometedora en procesos de biorremediación de CO<sub>2</sub>; garantizando de esta forma la mejor distribución de este en el medio cultivo.

Teniendo en cuenta que las microalgas en FBRs placa plana poseen altas eficiencias fotosintéticas; pero al mismo tiempo presentan problemas en el control de difusión de CO<sub>2</sub> relacionado con la transferencia de masa<sup>1</sup> en este tipo de FBR, la evaluación de la agitación se hace necesaria. El hecho de que la agitación se relacione con la transferencia afecta la disponibilidad de CO<sub>2</sub> para la microalga *Chlorella Vulgaris* y por lo tanto la producción de biomasa en este tipo de FBR.

En tanto que la agitación neumática utilizada en este tipo de FBR se genera mediante un difusor (tubo perforado) que involucra aspectos como cantidad de burbujas y diámetro de burbuja<sup>2</sup>, estos aspectos han sido objeto de estudio en el presente proyecto.

---

<sup>1</sup> SOO, Suh and CHOULD-GYUN, Lee. Photobioreactor Engineering: Design and Performance, (2003), vol.8. p. 1.

<sup>2</sup> NEDBAL, Ladislav; CERVENÝ, Jan; KEREN, Nir; KAPLAN, Aaron. Experimental Validation of a Nonequilibrium Model of CO<sub>2</sub> Fluxes between Gas, Liquid Medium, and Algae in a Flat-Panel Photobioreactor. En: Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. vol. 37, no. 12, p. 1319-1326.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la influencia de la agitación en un FBR panel plano bajo diferentes diámetros del difusor.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Construir el FBR panel plano con diseños ya planteados.
- Seleccionar 2 diámetros en el difusor donde se ve afectado el tamaño de la burbuja de acuerdo con valores reportados.
- Establecer la cinética de crecimiento de la microalga como función del diámetro del difusor a una concentración de  $\text{CO}_2$  constante.
- Plantear las ecuaciones de transferencia de masa para el FBR panel plano.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 MICROALGA

Son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos, pueden producir oxígeno a partir de la radiación solar por medio de los cloroplastos<sup>3</sup>. Tiene una eficiencia más alta a la de las plantas con respecto a la producción de biomasa, utilizando como fuente el CO<sub>2</sub> y la energía solar<sup>4</sup>. Se han utilizado en diversos campos de la biotecnología, tales como: acuicultura, alimentación humana, tratamiento de aguas, agricultura, biomedicina y farmacología<sup>5</sup>.

La producción de microalgas se divide en<sup>6</sup>:

- Fotoautótrofa: Obtienen la energía del sol y el carbono de compuestos inorgánicos.
- Fotoheterótrofa: Obtienen la energía del sol y el carbono de compuestos orgánicos.
- Mixotrófica: Obtienen la energía de la luz y de la materia orgánica, y el carbono lo obtienen de compuestos orgánicos y del CO<sub>2</sub>. Algunas de estas microalgas son *Spirulina platensis* o *Chlamydomonas reinhardtii*.
- Heterótrofa: Algunas microalgas pueden desarrollarse bajo ausencia de luz, tales como la *Chlorella protothecoides*.

## 1.2 CHLORELLA VULGARIS

La cepa empleada es la *Chlorella vulgaris*. Debido a la facilidad que tiene para ajustar su composición bioquímica a cualquier condición de cultivo, además cuando se tiene bajos niveles de nitrógeno provoca acumulación de grasas y a comparación de otras especies fotoautótrofas puede obtener una capacidad de crecimiento y de generación de biomasa más alta y esto se puede lograr por medio de luz como energía y CO<sub>2</sub> como fuente de carbono<sup>7</sup>. La figura 1 muestra un esquema de la microalga.

---

<sup>3</sup> J, Silvia y LOPEZ, Adrian. La Colección de Microalgas Dulceacuicolas Y Marinas de La Península de Yucatan Merida, Yucatan, Mexico: 2005, p. 13.

<sup>4</sup> SANTOS, Ana María, et al. Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. En: *Anales de Mecánica Y Electricidad*, 2014, p. 21.

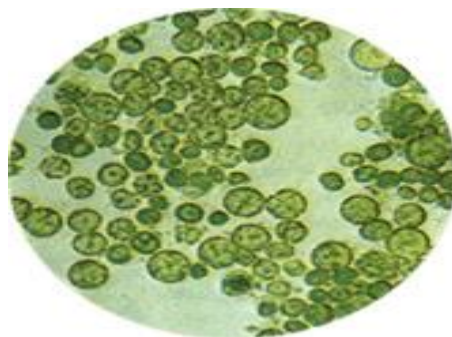
<sup>5</sup> GÓMEZ LUNA, Liliana Maria. Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. En: Laboratorio de Ecotoxicología Marina, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente. Marzo, 2015, p. 6.

<sup>6</sup>GRUPO COORPORATIVO CAJAMAR, ¿Qué Son Las Microalgas? Interés Y Uso, *Cajamar*, 2015, p. 1–11.

<sup>7</sup> SEVILLA FERNANDEZ, Jose Maria. Ingeniería de Procesos Aplicada a La Biotecnología de Microalgas, 2014.



**Figura 1.** *Chlorella vulgaris*.



Fuente: Sun chlorella <<http://www.chlorella.es/que-es-chlorella/>>

### **1.3 CONDICIONES DE CULTIVO**

Hay varios factores que influyen en el cultivo de microalgas, como es la radiación y los nutrientes. También se debe tener en cuenta otras variables con respecto al control en el crecimiento de las microalgas, tales como: salinidad, pH del medio de cultivo, temperatura, turbidez y contenido en oxígeno. Los nutrientes se dividen en: macronutrientes que son el carbono, el nitrógeno, el azufre y el fósforo; y los micronutrientes que son las vitaminas, ciertos metales, y la EDTA (ácido etilendiaminotetraacético). Los siguientes factores son unos de los muchos que se tienen en cuenta con respecto a la agitación<sup>8</sup>.

**1.3.1 Turbulencia.** Se debe emplear un tipo de agitación mecánica o neumática, la cual produce turbulencia e impide la sedimentación. Esta afecta la producción puesto que las microalgas no se encuentran en todo momento en la superficie de fotobiorreactor lo que evita la fotoinhibición<sup>9</sup>.

**1.3.2 Oxígeno disuelto y pH.** El oxígeno producido por las microalgas durante la fotosíntesis puede alcanzar una concentración tan elevada que inhiba su crecimiento y la producción del cultivo disminuya. Esto se puede evitar si se agita el cultivo, favoreciendo el paso del oxígeno a la atmósfera. El pH es otro factor importante en el cultivo porque la ingestión del carbono inorgánico por las microalgas aumenta el pH del medio y desplaza el equilibrio hacia los carbonatos, lo cual puede ocasionar una disminución en el crecimiento por el carbono<sup>10</sup>.

**1.3.3 Carbono.** Las principales fuentes de carbono inorgánico para el cultivo de microalgas son el dióxido de carbono libre y el bicarbonato. En ocasiones, se emplea dióxido de carbono mezclado con aire en medios sintéticos para los cultivos de microalga. El método más empleado consiste en inyectar CO<sub>2</sub>

---

<sup>8</sup> ÁLVAREZ COBELAS, Miguel y GALLARDO, Tomás. Una Revisión Sobre La Biotecnología de Las Algas. Madrid: Universidad Complutense. Facultad de Biología. Departamento de Biología Vegetal, 1989, p. 22–30.

<sup>9</sup> Ibid., p. 26

<sup>10</sup> Ibid., p. 27

mezclado con aire en tuberías que finalizan en tubos perforados ubicados en el fondo de los estanques del cultivo, sin embargo, dependiendo de los diámetros de los aspersores en el tubo, estos pueden presentar problemas debido a que burbujas pequeñas inducen la flotación de las microalgas y la reducción de la producción<sup>11</sup>.

#### 1.4 SISTEMA DE CULTIVO

Los sistemas de cultivo de microalgas se pueden clasificar, según su configuración y tipo de funcionamiento, en sistemas abiertos (estanques) y sistemas cerrados (fotobiorreactores FBRs)<sup>12</sup>.

Los sistemas abiertos son los más utilizados en la producción de microalgas, cultivándolas en estanques de varios centímetros de profundidad. Las microalgas obtienen el CO<sub>2</sub> que necesitan por difusión desde la atmósfera o de emisiones de gases industriales, aunque a veces es necesario instalar difusores en el fondo del estanque. Una de sus ventajas es que es un método muy económico con respecto a mantenimiento y consumo energético. Sin embargo, posee desventajas con respecto al mezclado, facilidad de contaminación, y la luz es limitada en las capas inferiores<sup>13</sup>.

Los fotobiorreactores (FBR) son sistemas cerrados transparentes, de plástico o vidrio, con geometrías de diversos tipos (tubulares, cilíndricas o planas). Su desarrollo depende de su configuración, de su geometría, del producto a obtener y del sistema. Estos sistemas obtienen una mayor productividad, debido a su mejora en la eficiencia de la fotosíntesis y la capacidad de fijación del CO<sub>2</sub>. Una de sus ventajas es mantener un cultivo sin contaminación por otras especies<sup>14</sup>. Su desventaja es que los costos de operación, inversión y mantenimiento son altos, dependiendo del tamaño del FBR a utilizar<sup>15</sup>.

En la Tabla 1<sup>16</sup> se muestra una comparación de algunas variables que afectan el cultivo de microalgas en los FBRs y los estanques.

---

<sup>11</sup> Ibid., p. 28

<sup>12</sup> SANTOS, Ana María, et al. Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. *En: Anales de Mecánica Y Electricidad*, 2014, p. 21.

<sup>13</sup> Ibid., p. 21

<sup>14</sup> BHATTACHARJEE, Meenakshi. Pharmaceutically Valuable Bioactive Compounds of Algae. *En: Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*. 2016, vol. 9, no. 6.

<sup>15</sup> SANTOS, Ana María. Op. cit., p. 21

<sup>16</sup> Ibid., p. 21

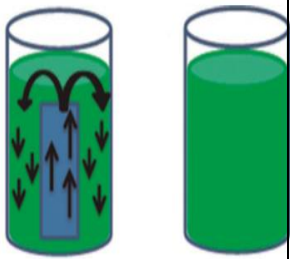
**Tabla 1.** Comparación entre estanques y FBRs para el cultivo de microalgas.

	<b>ESTANQUES</b>	<b>FBRs</b>
Capacidad de fijación CO <sub>2</sub>	Baja	Alta
Productividad biomasa	Baja	Alta
Velocidad de crecimiento	Baja	Alta
Riesgo de contaminación	Extremadamente alto	Bajo
Perdidas por evaporación	Altas	Bajas
Eficiencia de fotosíntesis	Baja	Alta
Área superficial	Baja	Extremadamente alta
Control del proceso	Difícil	Fácil
Coste de operación	Bajo	Alto
Escalado	Fácil	Difícil

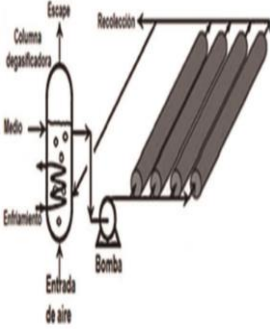
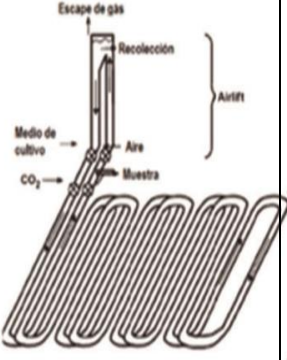
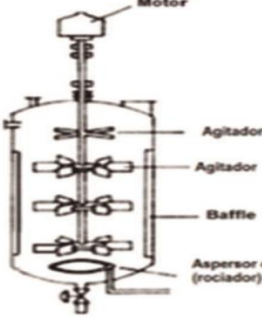
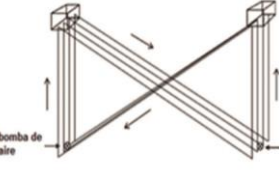
Fuente: SANTOS, Ana María, et al. Uso Y Aplicaciones Potenciales de Las Microalgas, 2014.

Hay varios tipos de fotobiorreactores con propiedades específicas, Tabla 2, que pueden agruparse en tres tipos básicos: tubulares, de superficie plana (flat plate) y de tanque agitado. Los tubulares y de superficie plana son los más empleados considerando que utilizan luz solar.

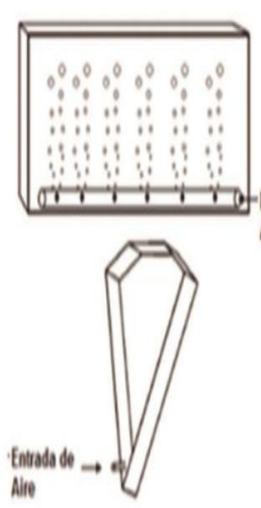
**Tabla 2.** Tipos de fotobiorreactores.

<b>CLASE</b>	<b>SUBCLASE</b>	<b>ESQUEMA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>TUBULAR</b>	<b>VERTICAL</b>		Consiste en tubos verticales transparentes de vidrio o polietileno para aprovechar la penetración de luz. Fácil de esterilizar, reduce fotoinhibición y fotooxidación.

**Tabla 2.** (Continuación)

CLASE	SUBCLASE	ESQUEMA	CARACTERÍSTICAS
	<b>HORIZONTAL</b>		<p>Tiene una alta eficiencia de luz. La transferencia de gas se realiza en las conexiones de los tubos o en una unidad para el intercambio de gas. Maneja volúmenes grandes, pero genera cantidades considerables de calor.</p>
	<b>HELICOIDAL</b>		<p>Consiste en un set de tubos de polietileno enrollados en un armazón circular abierto, acoplado en una torre de intercambio de gas y a un intercambiador de calor. Una bomba centrífuga hace llegar el medio de cultivo hasta la torre de intercambiador de gas. Posee una alta relación S/V.</p>
<b>FERMENTADOR TANQUE AGITADO</b>			<p>La agitación se da mecánicamente por un impulsor de diferentes tamaños y formas. Los deflectores reducen el efecto torbellino. Tiene baja relación S/V lo que provoca disminución de eficiencia fotosintética.</p>
<b>HIBRIDO</b>			<p>Consiste en la fusión entre dos tipos de reactores, en donde se complementan las ventajas y desventajas de cada uno.</p>

**Tabla 2.** (Continuación)

CLASE	SUBCLASE	ESQUEMA	CARACTERÍSTICAS
PLATOS	CUADRADO		<p>Tiene buena eficiencia de luz solar y su relación S/V es alta. Se puede hacer en materiales transparentes tales como: vidrio, plexiglás y policarbonato.</p> <p>La agitación puede ser por burbujeo de aire o por rotación mecánica a través de un motor. Tiene alta productividad de biomasa, es económico, fácil en la limpieza y baja acumulación de oxígeno.</p>
	TRIANGULAR		

Fuente: RAMIREZ MÉRIDA, Luis Guillermo, et al. Fotobiorreactor: Herramienta Para Cultivo de Cianobacterias, 2013, p. 14–17.

## 1.5 AGITACIÓN

La agitación es un factor que afecta la disponibilidad de nutrientes hecho que influye en un nivel de producción más elevado; en tanto que afecta la cantidad de luz que recibe cada microalga mientras se dispersan al interior del FBR ya que, evita que las células se asienten e incide en la distribución homogénea de los nutrientes al proporcionar un suministro adecuado de CO<sub>2</sub> a través de la interface cultivo-burbuja y así mismo la eliminación de O<sub>2</sub> al generar turbulencia en el medio<sup>17</sup>.

### 1.5.1 Dispositivos de agitación en biorreactores

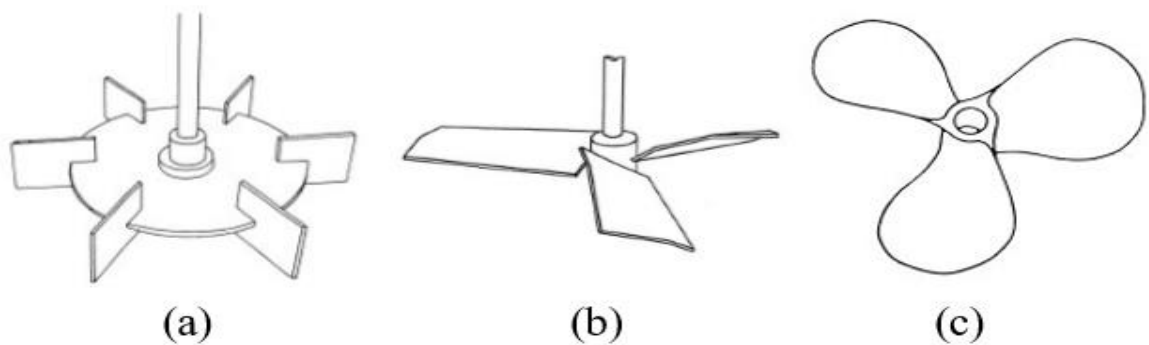
- Difusores de burbujas gruesas y finas
  - Tubos perforados
  - Tubos ranurados
  - Discos y cúpulas
- Agitación mecánica
  - Hélices
  - Turbinas

<sup>17</sup> ST-ONGE, Pierre. Optimisation En Temps Réel de La Production de Microalgues En Photobioréacteur Par La Commande Extrémale. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI, 2013. 45 p.

Los dispositivos de agitación mecánica, los cuales se utilizan comúnmente en fotobiorreactores tubular horizontales y verticales se presentan a continuación:

**1.5.1.1 Turbina y hélices.** Dispositivos que agitan el interior del FBR girados por motores. Cualquiera que sea su forma y diámetro, la agitación corresponde a un tercio del cilindro siendo en su caso un FBR. Las turbinas son eficaces para homogeneizar el medio, pero entre sus desventajas se encuentra la formación de incrustaciones en las paredes<sup>18</sup>.

**Figura 2.** Diferentes móviles de agitación a) turbina b) hélice c) hélice.



Fuente: OLIVO, Erell. Conception et Etude D'un Photobioreacteur Pour La Production En Continu de Microalgues En Ecloseries Aquacoles, UNIVERSITE DE NANTES, 2007.

**1.5.1.2 Difusores de burbujas.** Se clasifican comúnmente por el tamaño de las burbujas producidas por el difusor.

Difusores de burbujas finas se generan mediante algún material poroso y se encuentra disponible en el mercado en forma de placas, domos, discos y tubos. Por otro lado, los difusores de burbujas gruesas utilizan aspersores más grandes y se encuentra en el mercado en forma de tubos perforados, pulverizadores, tubos ranurados, orificio con válvula, tubos estáticos, mangueras perforadas, aireadores de chorro, aspirador y tubo en V<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> OLIVO, Erell. Conception et Etude D'un Photobioreacteur Pour La Production En Continu de Microalgues En Ecloseries Aquacoles. Thèse de doctorat, Universite de nantes, 2007. 34 p.

<sup>19</sup> FARMER, R y ARNDT, R.E.A. Development of an Efficient Aeration System for Aquaculture. St. Paul, Minnesota: University of minnesota. Minnesota department of agriculture, 1995. 13-17 p.

## 1.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGITACIÓN

De acuerdo la clasificación se elige el sistema de agitación, este se encuentra condicionado principalmente por el volumen del cultivo y la geometría del fotobiorreactor.

Una forma de clasificar los reactores por sus volúmenes es la siguiente<sup>20</sup>:

	Volumen
Pequeño	<10 litros
Mediano	10-50 litros
Grande	100 litros o mas

(OLIVO, 2007) realizo un estudio en fotobiorreactores, el cual demostró que el 7% de los sistemas de agitación son hélices o turbinas con relación al 38% correspondiente a los distribuidores de gas y otro 20% que serían sistemas de agitación completamente diferentes a los mencionados anteriormente <sup>21</sup>. Así mismo cualquiera que sea el volumen considerado, hay que resaltar que en un 55% de equipos se utiliza la inyección de gas como medio de agitación. Por otro lado, con respecto a la geometría, se tiene que la agitación por inyección de gas se encuentra muy extendida en los reactores de placa plana, alrededor de un 36%<sup>22</sup>. En los FBR placa plana, los inconvenientes de la agitación por burbujeo residen en el flujo de gas, que cuando es muy alto para el cultivo genera espuma, lo que involucraría el uso de un agente antiespumante.

La Tabla 3 explica los diferentes sistemas de agitación de acuerdo con el fotobiorreactor:

**Tabla 3.** Sistemas de agitación FBRs

	REACTOR	Como se desarrolla la agitación	CARACTERÍSTICAS
PLATOS	Placa plana	La agitación se proporciona burbujeando aire desde el fondo del reactor mediante un tubo perforado <sup>23</sup> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sujetos a velocidades de transferencia de masa relativamente bajas a causa del espacio entre los paneles; lo cual reduce la eficiencia de eliminación del O<sub>2</sub> disuelto producido por la fotosíntesis.</li> </ul>

<sup>20</sup> OLIVO, Op. cit., p. 35.

<sup>21</sup> Ibid., p. 36

<sup>22</sup> Ibid., p. 36

<sup>23</sup> ZHANG, Xing. Microalgae Removal of CO<sub>2</sub> from Flue Gas Flue Gas. London: IEA Clean Coal Centre, 2015. 36 p.

**Tabla 3.** (Continuación)

	<b>REACTOR</b>	<b>Como se desarrolla la agitación</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los reactores de placa plana proporcionan flexibilidad operativa, ya que pueden funcionar tanto en modo discontinuo como en modo continuo.</li> <li>• Existe la posibilidad de agrupamiento de células de microalgas en la pared del reactor y la incompatibilidad con ciertas cepas de microalgas<sup>24</sup>.</li> <li>• *Requiere una alta potencia en la bomba, para alcanzar un coeficiente transferencia de masa de 0,006 l/s es necesario 53 W/m<sup>325</sup>.</li> <li>• Los reactores de panel plano trabajan con respecto a la transferencia de masa similar a las columnas de burbujas<sup>26</sup>.</li> </ul>

<sup>24</sup> RAMIREZ MÉRIDA, Luis Guillermo, et al. Fotobiorreactor: Herramienta Para Cultivo de Cianobacterias. En: Ciencia y Tecnología. Julio-diciembre, 2013, p. 16.

<sup>25</sup> SIERRA, E, et al. Characterization of a Flat Plate Photobioreactor for the Production of Microalgae. En: Chemical Engineering Journal. 2008. vol. 138, no. 1-3, p. 138.

<sup>26</sup> BOROWITZKA, Michael A y MOHEIMANI, Navid Reza. Algal for biofuels and energy. En: Developments in Applied Phycology. 2013. vol. 5, p. 136.



**Tabla 3.** (Continuación)

	<b>REACTOR</b>	<b>Como se desarrolla la agitación</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
TUBULAR-VERTICAL	Columna de burbujas	El difusor es una placa perforada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• *Requiere una potencia baja en la bomba, para alcanzar un coeficiente transferencia de masa de 0,006 l/s es necesario 40 W/m<sup>3</sup><sup>27</sup>.</li> <li>• El tamaño de burbuja de equilibrio es de 6 mm, un valor superior induce burbujas inestables<sup>28</sup>.</li> <li>• Tienen mejores tasas de transferencia de masa que otros tipos de fotobiorreactores<sup>29</sup>.</li> </ul>
TUBULAR-VERTICAL	Tubulares	En la parte inferior se instala el difusor de gas por lo que no se necesita un sistema de agitación física <sup>30</sup> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>• *Requiere una alta potencia en la bomba, para alcanzar un coeficiente transferencia de masa de 0,006 l/s es necesario 2400-3200 W/m<sup>3</sup><sup>31</sup>.</li> </ul>
TUBULAR-VERTICAL	Airlift	El difusor genera burbujas que se desplazan por el tubo ascendente (solo esta área localizada), mientras que el tubo descendente no recibe el gas <sup>32</sup> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rangos de burbuja entre 2-10 mm son los más usados<sup>33</sup>.</li> </ul>

<sup>27</sup> SIERRA, E, et al. Op. cit., p. 146.

<sup>28</sup> TRAMPER, Johannes y VAN'T RIET, Klaas. Basic biorreactor design. New York: Marcel Dekker, Inc, 1991. 112 p. ISBN 0-8247-8446-4.

<sup>29</sup> KOMMAREDDY, Anil R., et al. The Impact of Air Flow Rate on Photobioreactor Sparger/diffuser Bubble Size(s) and Distribution. En: ASABE. July , 2013, p .2.

<sup>30</sup> ZHANG, Op, cit., p. 34.

<sup>31</sup> SIERRA, E, et al. Op. cit., p. 147.

<sup>32</sup> ZHANG, Op, cit., p. 35.

<sup>33</sup> DENG, Zhonghuo, et al. Gas Holdup, Bubble Behavior and Mass Transfer in a 5 M High Internal-Loop Airlift Reactor with Non-Newtonian FLui. En: Chemical engineering journal. *Beijing Key Laboratory of Green Reaction Engineering and Technology*. June, 2010. vol. 160, no. 2, p. 734.

**Tabla 3.** (Continuación)

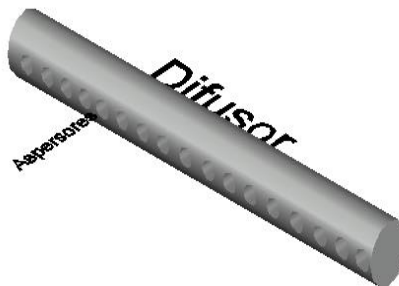
	<b>REACTOR</b>	<b>Como se desarrolla la agitación</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
TUBULAR-HORIZONTAL	Horizontal	La mezcla y la agitación del cultivo se mantienen mediante una bomba de aire para proporcionar circulación.	

\* La eliminación de oxígeno es sustancialmente más fácil en reactores de panel plano y columna de burbujas que en tubos tubulares. Los fotobiorreactores de panel plano requieren menos suministro de energía que los fotobiorreactores tubulares para lograr suficiente transferencia de masa, mezcla y capacidad de transferencia de calor<sup>34</sup>.

### 1.7 LOS DIÁMETROS DE ASPERSOR EN EL DIFUSOR

El difusor hace referencia a un tubo perforado que se encuentra en el fotobiorreactor panel plano que permite la agitación de la microalga y los aspersores son los orificios dentro del difusor que forman el tamaño de la burbuja (figura 3). La velocidad del gas, la presión de entrada y el diámetro del aspersor son variables para tener en cuenta en la formación de la burbuja<sup>35</sup>.

**Figura 3.** Difusor y aspersor



<sup>34</sup> SIERRA, E, et al. Op. cit., p. 147.

<sup>35</sup> ALKHALIDI, Ammar A.T y AMANO, R.S. Factors Affecting Fine Bubble Creation and Bubble Size for Activated Sludge. En: Water and Environment Journal. March, 2015. vol. 29, no. 2, p. 110.

El tamaño de la burbuja determina la velocidad con la que asciende la burbuja y el tiempo de residencia del gas, parámetros que influyen en el área interfacial (que se define como el área de contacto entre la partícula y el medio)<sup>36</sup> y sobre todo la tasa de transferencia de masa gas-liquido<sup>37</sup>.

Una vez liberadas las burbujas del difusor se someten a los procesos de dispersión y coalescencia, fenómenos que se encuentran relacionados con la probabilidad de colisión (unión entre pares de burbujas)<sup>38</sup> y que afectan el tamaño de la burbuja y a su vez la transferencia de masa<sup>39</sup>.

En un medio en el que no prevalece la coalescencia se hace más sencillo controlar el tamaño de la burbuja desde el diámetro de aspersor en el difusor, dado que no hay incertidumbre por cómo se unen y se dispersan las burbujas<sup>40</sup>. En este caso, el tamaño de la burbuja que se desplaza dentro del FBR se puede asumir igual al tamaño de la burbuja que produce el difusor<sup>41</sup>.

A continuación, se explica más detalladamente como el tamaño de burbuja influye en el FBR panel plano:

**1.7.1 Burbujas pequeñas.** Las burbujas con tamaños muy pequeños causan disminución en el crecimiento y en el peor de los casos la muerte de las microalgas, lo que se respalda en que a este tamaño las burbujas están cerca del tamaño de los microorganismos<sup>42</sup>.

**1.7.2 Burbujas grandes.** A partir de varias simulaciones se encontró que las burbujas más grandes fluyen con mayor velocidad que las burbujas más pequeñas. Por lo anterior, burbujas grandes tienen números de Reynolds más altos que las burbujas pequeñas<sup>43</sup>. La Tabla 4 complementa la información anteriormente mencionada<sup>44</sup>:

---

<sup>36</sup> GARCÍA GAMIZ, Mari Luz y MOLINERO LEYVA, M<sup>a</sup> Jesús. Formulación Magistral. 1st ed. 2014, 126 p. ISBN 9788497324533.

<sup>37</sup> MORTUZA, S.M, et al. Computational and Experimental Investigation of Bubble Circulation Patterns within a Column Photobioreactor. En: ASME. January, 2011. p. 6.

<sup>38</sup> Anales Academia Nacional de Ciencias. En: Anales. p. 149.

<sup>39</sup> CZERMAK, Peter, et al. Cell and tissue reaction engineering. Principle and practice. 120 p. ISBN: 978-3-540-68175-5.

<sup>40</sup> DOBLE, Mukesh, et al. Biotransformations and Bioprocess. New York: MARCEL DEK, 2004. 262 p. ISBN: 0-8247-4775-5.

<sup>41</sup> VAN'T RIET, Klaas, Op. Cit., p 112.

<sup>42</sup> KOMMAREDDY, Anil, et al. Op. cit., p. 4.

<sup>43</sup> MORTUZA, S.M, et al. Op. cit., p. 6.

<sup>44</sup> MOOER Product. Bubble Diffuser Differences. <<http://www.mooersproductsinc.com/bubble-diffuser-aeration-differences/>>.

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas con relación al tamaño de burbuja

	Ventajas	Desventajas
Burbujas pequeñas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta tasa de transferencia de masa.</li> <li>• Requiere menos energía para funcionar, por lo que se requiere menor caudal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Susceptible a ensuciamiento biológico.</li> </ul>
Burbujas grandes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consume más energía para funcionar.</li> <li>• Transferencia de masa menor.</li> <li>• Menos tiempo de contacto entre la burbuja y el medio de cultivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor susceptibilidad a ensuciamiento y taponamiento.</li> </ul>

Fuente: MOOER Product. Bubble Diffuser Differences. <<http://www.moersproductsinc.com/bubble-diffuser-aeration-differences/>>.

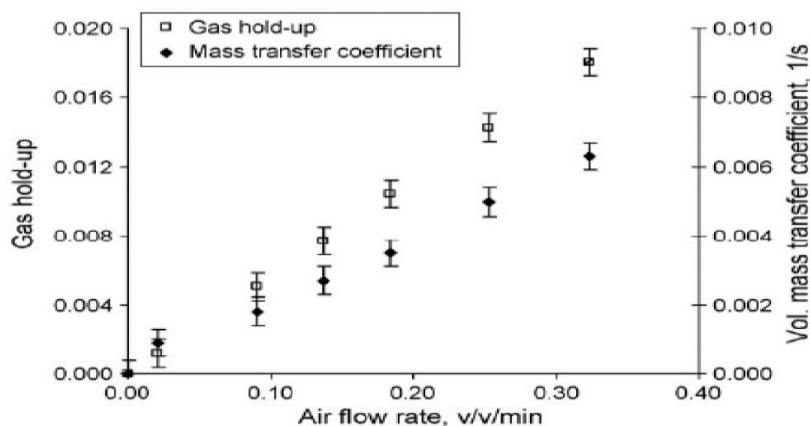
## 1.8 LA IMPORTANCIA DEL CAUDAL DE AIRE

El caudal de aire como el diámetro del aspersor son parámetros importantes en el tamaño de la burbuja<sup>45</sup>, el primero influye relevantemente sobre el tiempo que dura la burbuja dentro del medio de cultivo (tiempo de residencia) y el coeficiente volumétrico de transferencia de masa del reactor. Según investigaciones estos dos parámetros aumentan linealmente con el caudal de aire, como se aprecia en la figura 4<sup>46</sup>.

<sup>45</sup> LIMA NETO, Iran Eduardo. Tamanho de Bolhas de Ar Formadas Por Difusores Não Porosos Na Água. *En: Eng Sanit Ambient.* Abr-Jun, 2015. vol 20, no. 2, p. 175–80.

<sup>46</sup> SIERRA, E, et al. Op. cit., p. 142.

**Figura 4.** Relación entre la agitación, agarre del gas y coeficiente volumétrico de transferencia de masa.



Fuente: SIERRA, E, et al. Characterization of a Flat Plate Photobioreactor for the Production of Microalgae, *Chemical Engineering Journal*, 2008.

## 1.9 EL CO<sub>2</sub> Y SU IMPORTANCIA ACTUAL

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) también denominado gas carbónico o anhídrido carbónico a temperatura y presión ambiente es un gas que presenta una baja solubilidad en agua<sup>47</sup>. Este gas, ha estado presente en la atmosfera por millones de años y a su vez es un producto del metabolismo de los seres vivos y también el principal producto de procesos de combustión. Más en la actualidad, es el gas efecto invernadero más importante debido a su descontrolado aumento a nivel mundial. En efecto, acciones internacionales son llevadas a cabo con vistas a la estabilización y reducción de estos gases. Técnicas que van desde el almacenamiento geológico, la adsorción como absorción química y vías biológicas son propuestas para la reducción de este gas<sup>48</sup>.

Debido a que las microalgas son capaces de asimilar el CO<sub>2</sub>, y en el proceso producir O<sub>2</sub> y metabolitos secundarios, la biofijación a escala laboratorio de CO<sub>2</sub> por las microalgas es prometedora<sup>49</sup>. Mas es necesario aclarar, que la tasa de fijación de CO<sub>2</sub> se encuentra directamente relacionada con la eficiencia de utilización de la luz y la densidad celular<sup>50</sup>.

<sup>47</sup> GOMEZ FUENTES, Ana Milena y JAIMES VILLARREAL, Nestor Andres. Estudio de La Incidencia Del Suministro de CO<sub>2</sub> En El Crecimiento de Las Microalgas En Un Fotobiorreactor a Escala Laboratorio. Bucaramanga: Universidad industrial de santander. Facultad de Ingenierías fisico-químicas. Escuela de ingeniería química, 2010. 10 p.

<sup>48</sup> TEBBANI, Sihem, et al. CO<sub>2</sub> Biofixation by Microalgae, 2014, p. Intro (IX).

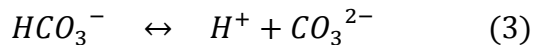
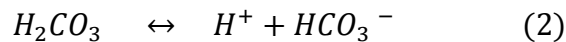
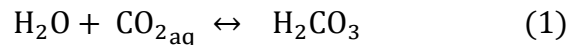
<sup>49</sup> Ibid., p. Intro (IX).

<sup>50</sup> KLINTHONG, Worasaung, et al. En: A Review : Microalgae and Their Applications in CO<sub>2</sub> Capture and Renewable. London: ISTE and Hoboken: Jhon Willey, 2015. p. 712–742.

## 1.10 EL CO<sub>2</sub> EN EL CULTIVO

Cuando se expone el CO<sub>2</sub> en forma de burbuja al cultivo, entre la fase líquida y la fase gaseosa se produce un intercambio continuo de moléculas. Tan pronto como la concentración de saturación en la fase líquida se alcanza, no ocurren más cambios en las concentraciones del gas en ambas fases. A continuación, en la fase líquida se pueden encontrar las 4 especies: CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ácido carbónico), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bicarbonato) y el ion carbonato CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Es relevante mencionar, que las concentraciones en equilibrio de las especies mencionadas dependen del pH y la temperatura<sup>51</sup>.

Es esencial comprender que el burbujeo de CO<sub>2</sub> en la fase líquida no conduce a una disolución total del CO<sub>2</sub> dado que una parte del CO<sub>2</sub> inyectado se pierde a la salida del fotobiorreactor. La cantidad de CO<sub>2</sub> que pasa a la fase líquida es función del coeficiente de masa volumétrico k<sub>LA</sub> que se presenta más adelante, la transferencia de masa en general y el tiempo de residencia del gas<sup>52</sup>. Para obtener las anteriores especies en el FBR panel plano, el CO<sub>2</sub> reacciona de la siguiente manera en la fase líquida del cultivo<sup>53</sup>:



Ahora bien, la microalga fija el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en el proceso de fotosíntesis, pero como el ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) tiene una baja concentración en el líquido, es muy habitual considerar que el CO<sub>2</sub> disuelto y H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> hacen parte del CO<sub>2</sub> total disponible para la microalga en la fase líquida<sup>54</sup>.

## 1.11 EL CO<sub>2</sub> Y LA MICROALGA

Conforme a lo anterior, la microalga puede asimilar 2 formas diferentes de carbono orgánico y mediante diferentes mecanismos. El primero, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a través de la membrana plasmática. El segundo, bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) mediante la enzima anhidrasa que convierte el bicarbonato en dióxido de carbono y el

---

<sup>51</sup> CLEMENT-LAROSIÈRE, Barbara. Etude de La Croissance de Chlorella Vulgaris En Photobioréacteur Batch et Continu , En Présence de Concentrations Élevées de CO<sub>2</sub>, (Ecole Centrale Paris, 2012), p. 9.

<sup>52</sup> JACOB-LOPEZ, Eduardo y TEIXEIRA FRANCO, Telma. Microalgae-Based Systems for Carbon Dioxide Sequestration and Industrial Biorefineries. September 2010, p. 139.

<sup>53</sup> GOMEZ FUENTES, A. y JAIMES VILLARREAL, N. Op. cit., p. 10.

<sup>54</sup> CLEMENT-LAROSIÈRE, Barbara, Op. cit., p. 8.

tercero, el transporte directo del bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) a través de la membrana plasmática<sup>55</sup>.

Ahora bien, la fotosíntesis es el principal modelo metabólico de las microalgas por el cual se convierte la energía lumínica en energía química, en este proceso se transforma el  $CO_2$  captado. Esta ocurre en las fases siguientes:

- Fase fotoquímica: Donde el  $H_2O$  participa como donante de electrones y se libera oxígeno después del hidrólisis.
- Fase oscura: Donde el  $CO_2$  se reduce y se da lugar a la síntesis de materia orgánica que será utilizada por la célula para producir nuevos compuestos o se guarda como reserva. El 95% del carbono se fija por este medio bajo el ciclo de Calvin, solo el 5% restante ocurre por otra vía de fijación de carbono denominada  $\beta$ -carboxilación (transferencia  $CO_2$  microalga).

## 1.12 LA IMPORTANCIA DE LA TRANSFERENCIA DE MASA

La transferencia de masa se describe como un proceso complejo que envuelve en general tres fases:

1. Fase gaseosa (burbuja  $CO_2$ ).
2. Fase líquida (medio de cultivo).
3. Fase sólida (microalga).

Teniendo en cuenta que el  $CO_2$  tiene un coeficiente de transferencia de masa bajo, la transferencia de masa desde el gas a la fase líquida es el paso limitante principal en el cultivo de microalgas<sup>56</sup>. La transferencia de masa en la interface gas-líquido se ve afectada por muchos factores entre ellos: el método utilizado para la aireación, el tipo de difusor, el tamaño de la burbuja, la velocidad de desplazamiento de la burbuja y la turbulencia que se genera con estas burbujas, así como la temperatura, el tamaño del tanque y las propiedades del líquido <sup>57</sup>.

## 1.13 MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA EN UN FBR PANEL PLANO

Las ecuaciones de transferencia de masa que se plantean en este proyecto hacen parte de una revisión bibliográfica a diferentes fuentes. Conceptos para tener en cuenta para su comprensión se desarrollan a continuación:

**1.13.1 Teoría de la película.** En la actualidad existen muchos modelos de transferencia, pero la mayoría dependen de tres supuestos. El primero, es que la transferencia de masa entre las fases se da como una resistencia en serie. El segundo, plantea que la transferencia de masa de una fase a otra depende del

---

<sup>55</sup> KLINTHONG, Worasaung, et al. Op. cit., p. 718.

<sup>56</sup> ZHANG, Op, cit., p. 27.

<sup>57</sup> NAVISA, J, et al. Effect of Bubble Size on Aeration Process. En: Asian Journal of Scientific. March, 2014. vol. 7, no. 4. p. 485.

equilibrio cerca de la interfase. El tercero supone que los gases son componentes únicos dado que los componentes múltiples son más complicados<sup>58</sup>. La teoría de la película que utiliza estos supuestos es un modelo útil para la explicación de la transferencia de masa, el cual implica el transporte desde la fase hasta la interfase o capa límite (se forma donde quiera que haya un contacto entre las dos fases), y luego desde la interfaz hasta una segunda fase. De acuerdo con esta teoría la turbulencia muere en la interfase y la transferencia a través de esta se lleva a cabo solamente por difusión molecular<sup>59</sup>.

Entre otros supuestos que utiliza este modelo de película se encuentra que el grosor y la difusividad de la película líquida son constantes sobre la superficie de la burbuja, pero esto en muchos casos puede resultar ser erróneo. Con lo anterior una ecuación teórica que sea ampliamente aplicable no existe<sup>60</sup>.

El modelo de película consiste en una explicación de la trayectoria del sustrato gaseoso desde la burbuja hasta un organelo en el microorganismo como se aprecia en la figura 5 esto se puede dividir en diferentes pasos como se presenta a continuación<sup>61</sup>:

1. Resistencia del gas dentro de la burbuja.
2. Resistencia en la interfase gas (burbuja) – líquido (cultivo).
3. Resistencia en el líquido a granel (capa del líquido).
4. Resistencia en la interfase líquido (cultivo) – célula
5. Resistencia celular interna
6. Resistencia en el sitio de la reacción bioquímica

Es de resaltar que todas las resistencias mencionadas anteriormente son físicas excepto la última. Es posible descuidar muchas de estas resistencias en la mayoría de los biorreactores exceptuando aquellos alrededores de la interfase gas-líquido (paso 2 y 4)<sup>62</sup>.

La difusión a través de la interfase gas (burbuja) – líquido (cultivo) es la más lenta entre las descritas anteriormente y por lo tanto esta controla la velocidad total de transferencia de masa hecho que influye en la tasa de metabolismo celular. La agitación aumenta la velocidad de transferencia de masa en estos pasos<sup>63</sup>.

---

<sup>58</sup> KADIC, Enes y HEINDEL, Theodore J. *En: An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. p. 12. ISBN: 978-1-118-10401-9

<sup>59</sup> DORAN, Pauline M., *Bioprocess Engineering Principles*. En: Elsevier Science & Technology Books. 2 ed. vol. 9, no. 1, 1996. 192 p. ISBN: 0122208552.

<sup>60</sup> KADIC, E, and HEINDEL, T. Op. cit., p. 16.

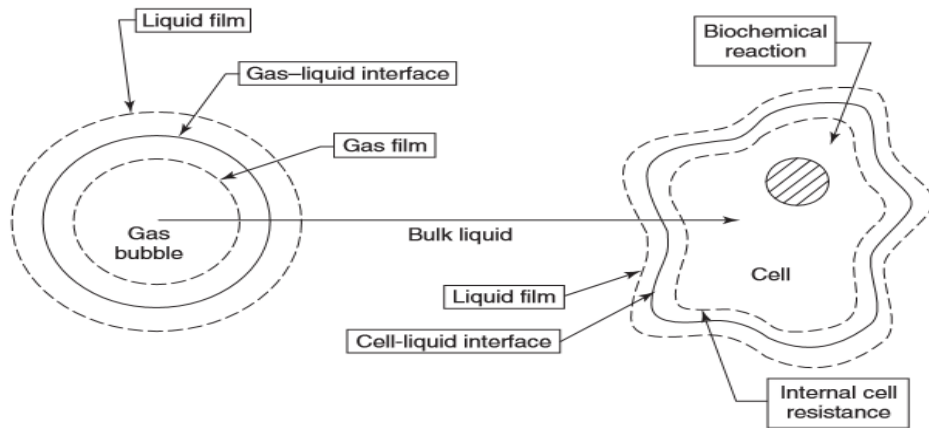
<sup>61</sup> DUTTA, Rajiv. *Fundamentals of Biochemical Engineering*. vol. 2, no. 1, 2008. 224 p.

<sup>62</sup> KADIC, E, and HEINDEL, T. Op. cit., p. 10.

<sup>63</sup> DUTTA, R. Op. cit., p. 223.



**Figura 5.** Esquema sobre los pasos del modelo de película.



Fuente: DORAN, Pauline M., *Bioprocess Engineering Principles*, Elsevier Science & Technology Books, vol. 9, 1996.

**1.13.2 Balance de materia de CO<sub>2</sub>.** Teniendo en cuenta que la masa de CO<sub>2</sub> en el sistema no es constante es necesario saber cómo varía la masa en función del tiempo. Para evaluar la tasa de cambio de masa de CO<sub>2</sub> es necesario aplicar inicialmente la ecuación general del balance de masa (4)<sup>64</sup>:

$$\begin{aligned}
 & \{ \text{Masa que entra al sistema de CO}_2 \} - \{ \text{Masa que sale del sistema de CO}_2 \} \\
 & + \{ \text{Masa generada dentro del sistema de CO}_2 \} \\
 & - \{ \text{Masa consumida dentro del sistema de CO}_2 \} \\
 & = \{ \text{Masa acumulada dentro del sistema de CO}_2 \} \quad (4)
 \end{aligned}$$

Utilizando como volumen de estudio el FBR se obtiene que:

- La masa que entra al sistema de CO<sub>2</sub> se relaciona con la presión parcial de CO<sub>2</sub> en la burbuja que ingresa por la parte inferior del FBR.
- La masa que sale del sistema CO<sub>2</sub> se relación con la presión parcial de CO<sub>2</sub> que sale por el ducto desgasificador.
- Debido a que en el FBR no se genera CO<sub>2</sub>, este término en la ecuación es igual a 0.
- La masa consumida dentro del FBR es la masa de CO<sub>2</sub> biofijada por la microalga.
- La masa acumulada por el FBR es todo lo que queda diluido dentro del medio de cultivo.

Ahora bien, si se realiza un análisis de manera más detallada de lo que sucede dentro del FBR y en este sentido haciendo uso de los supuestos que se encuentran en la sección 1.13.1 (resistencias en serie, interfases gas (burbuja) –

<sup>64</sup> DORAN, Pauline M. Op. cit., p. 110.

líquido (cultivo) y líquido (cultivo) – sólido (microalga)), se determina que la masa de CO<sub>2</sub> que ingresa al cultivo (con volumen efectivo de 3L) es una función de la variable  $\frac{dP_{CO_2}^{Burbuja}}{dt}$ . La masa de CO<sub>2</sub> que sale del cultivo se encuentra expresado en función del  $\Gamma$ , el término de acumulación de CO<sub>2</sub> se encuentran expresado por  $\alpha_{CO_2}$  y  $k[dCO_2]$ <sup>65</sup> y a su vez el término de consumo se encuentra expresado por  $\mu$ <sup>66</sup>.

---

<sup>65</sup> NEDBAL, Ladislav, et al. Experimental Validation of a Nonequilibrium Model of CO<sub>2</sub> Fluxes between Gas, Liquid Medium, and Algae in a Flat-Panel Photobioreactor. En: Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. September, 2012, vol. 37, no. 12., p. 1321.

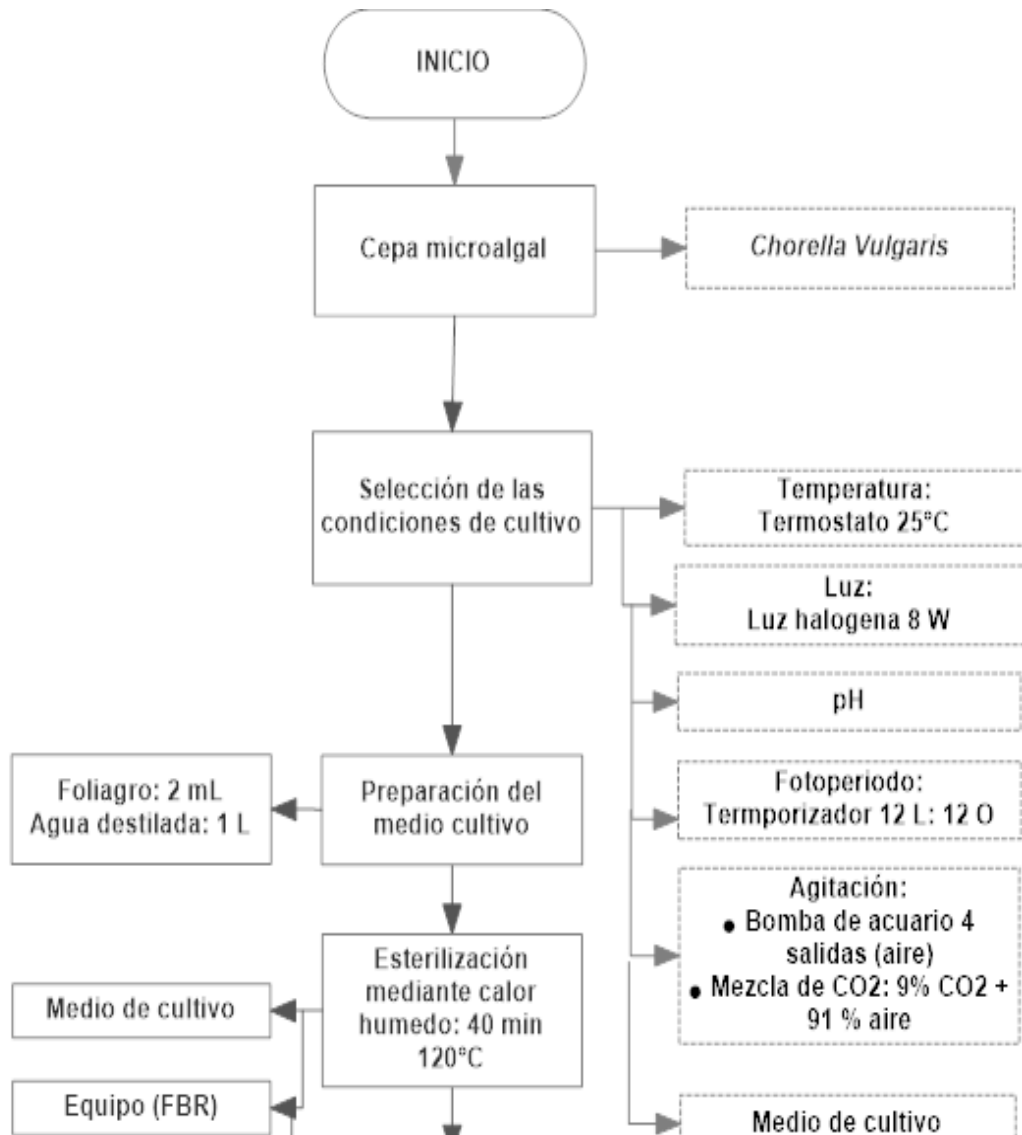
<sup>66</sup> FOGLER, H. Scott. *Elementos de Ingeniería de Las Reacciones Químicas*. 3 ed. 2001, 396 p.

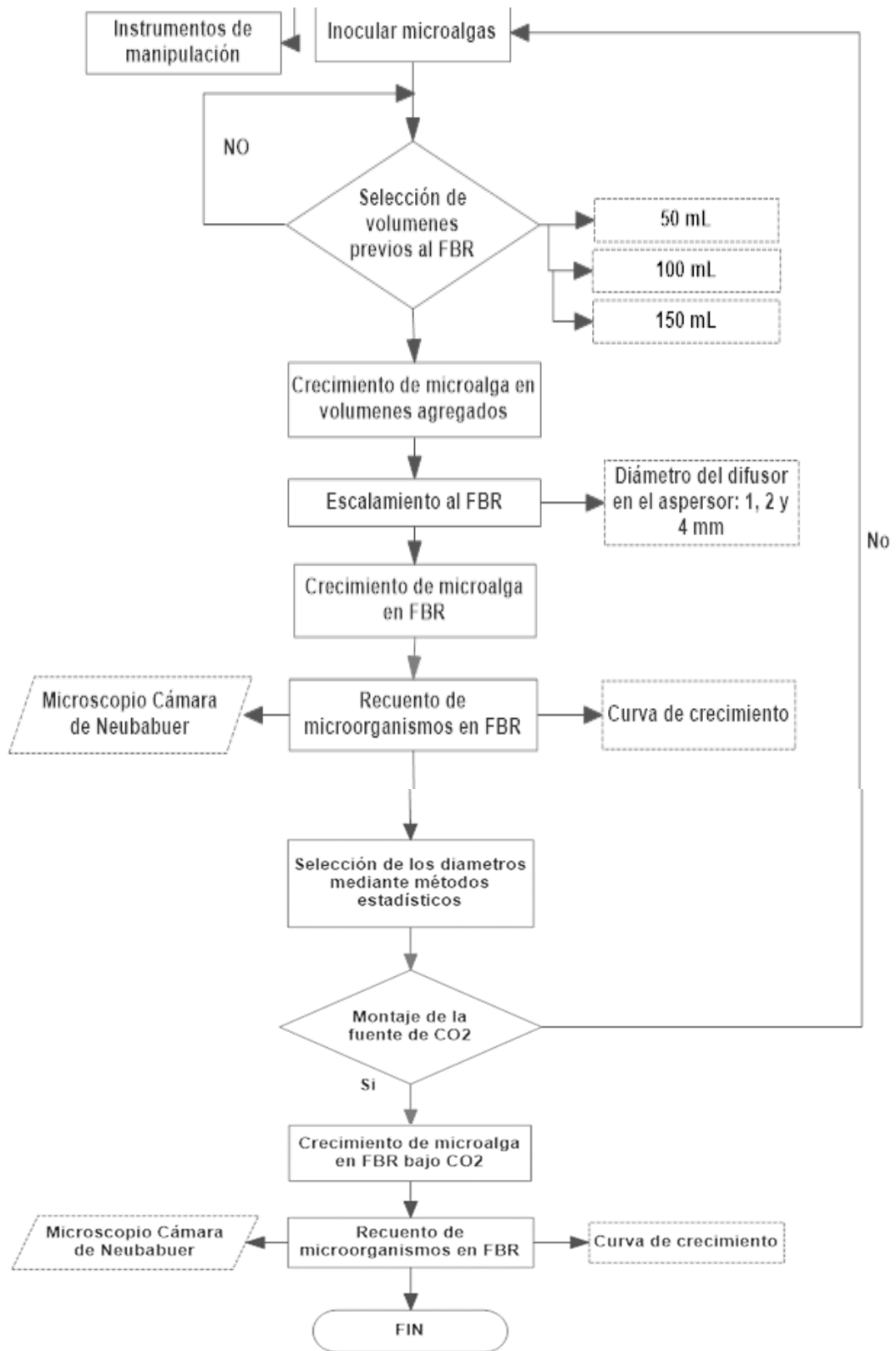
## 2. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta que el presente proyecto trabaja los diámetros de difusor como variable independiente ante la velocidad específica de crecimiento celular de la microalga *Chlorella Vulgaris* como variable dependiente, se dispone de una serie de etapas para el desarrollo del proyecto. A continuación, se muestra el procedimiento empleado mediante un diagrama de flujo (figura 6), este presenta la parte pre-experimental como experimental.

A su vez este proyecto desarrolla un apartado en donde se plantea teóricamente las ecuaciones de transferencia de masa que ocurren en un FBR panel plano.

**Figura 6.** Diagrama de flujo de la metodología





## 2.1 OBTENCIÓN DE LA CEPA MICROALGAL

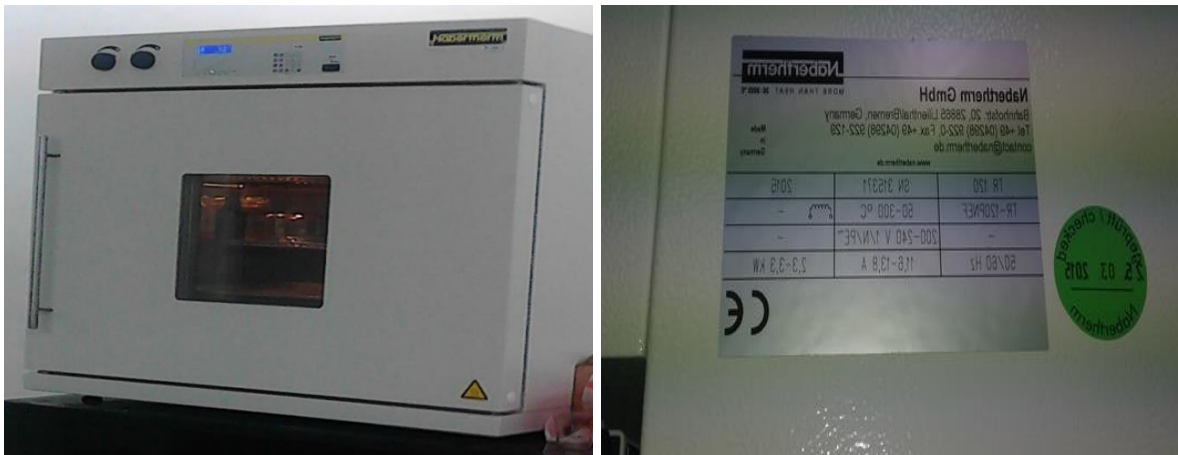
La cepa es suministrada por el grupo de investigación BIOTECFUA de la Fundación Universidad de América, esta se encuentra en medio líquido en tubos de ensayo con una capacidad de 50 mL cada uno, siendo un back up de la cepa pura que es adquirida por los anteriores grupos de investigación; con el fin de desarrollar los cultivos necesarios para obtener la cantidad de biomasa esperada.

## 2.2 PREPARACIÓN DEL MEDIO DE CULTIVO

El medio de cultivo se prepara a partir de fertilizante, en una concentración de 2 mL en 1 L de agua destilada, se selecciona como medio de cultivo el fertilizante agrícola foliar, Foliagro, debido a su bajo costo en el mercado, por permitir un buen crecimiento celular y concentración de biomasa algal considerable.

El medio de cultivo se utiliza desde el momento del crecimiento de la microalga hasta cada proceso del escalamiento y posterior paso al fotobiorreactor. Este se esteriliza en un horno como se muestra en la figura 7, en los laboratorios de la Fundación de la universidad de América a una temperatura de 120°C durante 40 minutos. En el anexo A se muestra la composición del fertilizante Foliagro.

**Figura 7.** Horno para esterilizar y sus respectivas especificaciones

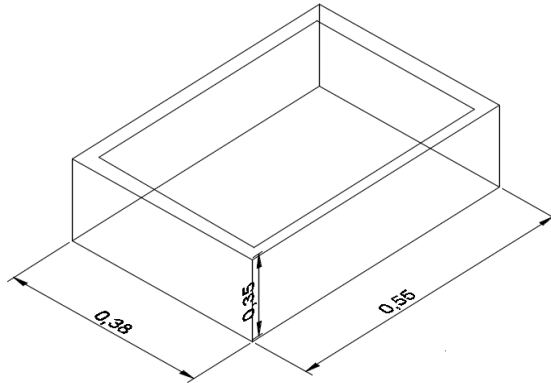


## 2.3 PREPARACIÓN DEL INÓCULO

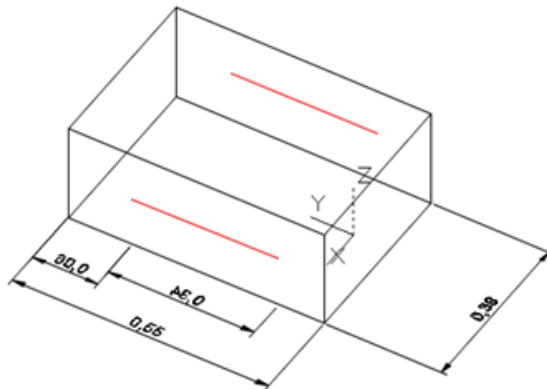
En la preparación del inóculo se toma 10 mL de microalga y se introduce en un recipiente de 500 mL de capacidad, el cual contiene 30 mL de medio de cultivo. Luego, se esteriliza y se incuba teniendo en cuenta los requerimientos

ambientales del microorganismo<sup>67</sup>, por lo tanto, este recipiente es almacenado en una incubadora (figura 8), que corresponde a una caja de icopor o poliestireno expandido (EPS) cuyas dimensiones son de 0,38 m de ancho, 0,55 m de largo y 0,35 m de alto. Se emplean 2 lámparas de halógeno de color rojo de 8 W como fuente lumínica, estas se instalan en las paredes frontales de la incubadora (figura 9), a su vez estas lamparas se encuentran conectadas al temporizador digital (figura 10) para poder controlar los fotoperiodos que corresponden a ciclos de 12 horas luz y 12 horas oscuridad.

**Figura 8.** Incubadora



**Figura 9.** Incubadora con las lámparas de halógeno



---

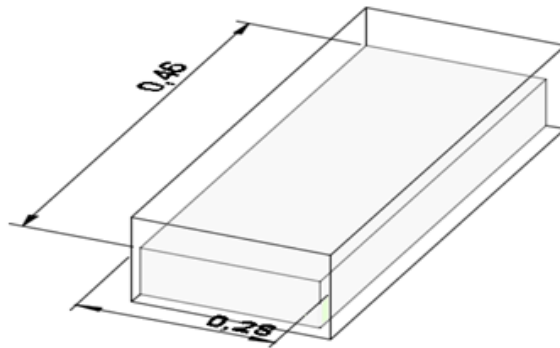
<sup>67</sup> ORTIZ MORENO, Martha L. et al. Evaluación Del Crecimiento de La Microalga *Chlorella Sorokiniana* En Diferentes Medios de Cultivo En Condiciones Autotróficas Y Mixotróficas. September, 2010, p. 14.

**Figura 10.** Temporizador digital



Se diseña un recipiente de vidrio (figura 11) al cual se instala un termostato y se agrega agua para mantener la temperatura de los cultivos a 25°C, posee las siguientes dimensiones 0,46 m de largo, 0,28 m de ancho y 0,20 m de alto; este recipiente se encuentra dentro de la incubadora.

**Figura 11.** Recipiente de vidrio



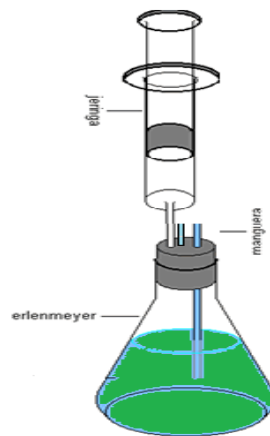
Debido a que se requiere completar el volumen del recipiente de 500 mL, se adiciona 50 mL de medio de cultivo cada día de por medio hasta completar su capacidad.

## **2.4 ESCALAMIENTO DEL CULTIVO**

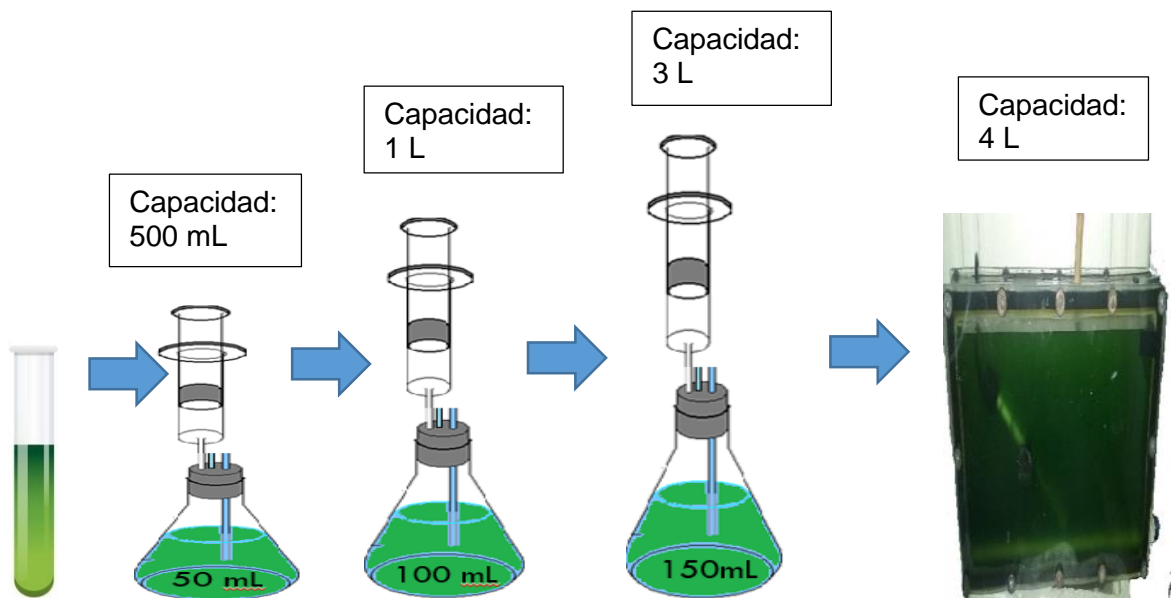
El escalamiento consiste en transferir volúmenes de 500 mL a 3 L. Para esto, se emplearon 2 recipientes, un Erlenmeyer con una capacidad de 1 L y un Erlenmeyer con una capacidad de 3 L, cada uno cuenta con un tapón de caucho, y 2 mangueras para la desgasificación y para la entrada de aire, la inyección de medio se agrega utilizando una jeringa de 50 mL que es colocada en el tapón

(figura 12); las mangueras y los Erlenmeyer han sido previamente esterilizados (figura 7). Este escalamiento se inicia con un volumen de 500 mL agregando cada día de por medio 100 mL de medio de cultivo hasta alcanzar 1 L, luego, desde 1 L hasta 3 L agregando cada día de por medio 150 mL de medio de cultivo. Al alcanzar un volumen de 3L, se continúa con el escalamiento al FBR (figura 13). Las condiciones de cultivo son las mismas para estos recipientes en cuanto al fotoperiodo, temperatura, pH y la luz.

**Figura 12.** Montaje del cultivo



**Figura 13.** Fase inicial del cultivo en la incubadora





## 2.5 DESARROLLO DE LA PRE-EXPERIMENTACION

En esta sección haciendo uso de dos FBRs con las mismas dimensiones, se desarrolla la selección de los 2 diámetros de aspersor en los tubos difusores con respecto a la agitación y la curva de crecimiento.

Inicialmente y con el propósito de considerar un valor superior e inferior al comúnmente usado por el grupo de investigación (2 mm<sup>68</sup>) se selecciona los diámetros 1 y 4 mm. Por lo que la parte pre-experimental se desarrolla con 1,2 y 4 mm como diámetros de aspersor.

Al alcanzar un volumen de 3L, se continúa con el escalamiento al FBR. Para conocer en cuál de los diámetros ocurre un mayor crecimiento microalgal, se realiza un conteo celular durante 15 días cada 24 horas por cada diámetro, mediante una cámara de Neubauer.

Antes de dar inicio a la pre-experimentación se debe tener en cuenta varias condiciones tales como:

**2.5.1 Sistema de agitación.** El sistema de agitación es proporcionado por una bomba de cuatro salidas con una potencia de 9 watts (figura 14, izquierda), a su vez esta se encuentra conectada a un filtro de trompo el cual ayuda en la purificación del aire (figura 14, derecha). El filtro tiene un diámetro de poro de 0,2  $\mu\text{m}$ , 50 mm de diámetro, un área de filtración de 19,6  $\text{cm}^2$ , de material polipropileno y posee un acople para mangueras de 6 mm de pulgada, además de una presión de trabajo menor a 69 mbar. Cabe resaltar que este tamaño de poro evita que el crecimiento se vea afectado por una gran cantidad de virus y bacterias. La descarga de aire es conectada a los dos extremos laterales del difusor.

**Figura 14.** Bomba y filtro de trompo



<sup>68</sup> ÁNGEL CRUZ, María Camila y PIMIENTA BLANCO, Wendy Yulissa. Evaluación de La Incidencia Del Nitrógeno En El Medio de Cultivo BOLD BASAL Para La Producción de Biomasa de La Microalga *Chorella Vulgaris* En Un Fotobiorreactor, Para La Obtención de Ácidos Grasos. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías, 2012. 63 p.

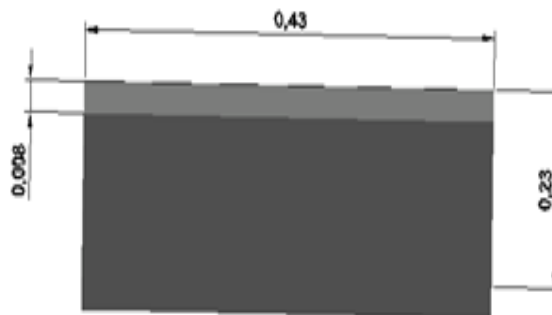
**2.5.2 Control del fotoperiodo.** Se elabora una nueva incubadora con las mismas dimensiones de la figura x para almacenar el FBR; esta se encuentra recubierta con papel aluminio que permite que la luz roja de las lamparas de halógeno que se encuentran en las paredes frontales (figura 9) sea absorbida por las microalgas, a su vez estas lamparas se encuentran conectadas al temporizador digital (figura 10) para poder controlar los fotoperiodos.

### 2.5.3 Construcción del fotobiorreactor panel plano

**2.5.3.1 Materiales y dimensionamiento.** El crecimiento y la producción de la biomasa se realiza en dos fotobiorreactores panel plano. Los FBRs son construidos en polimetil-metacrilato (PMMA), que presenta una buena resistencia al rayado, es transparente y adicionalmente posee muchas cualidades semejantes al vidrio tales como: resistencia química, térmica, mecánica, facilidad al manipularlo, bajo peso, menor fragilidad y costo accesible <sup>69</sup>.

Inicialmente se adquieren dos láminas de polimetil-metacrilato para cada FBR con dimensiones de 0,43 x 0,23 m y de espesor 0,008 m; estas corresponden a las caras frontales del FBR (figura 15), las caras laterales (figura 16) tienen las siguientes dimensiones 0,22 x 0,03 m y de espesor 0,008 m.

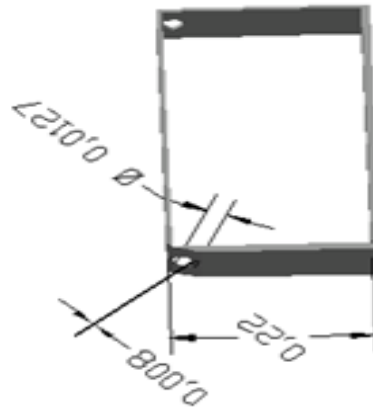
**Figura 15.** Lámina de las caras frontales



---

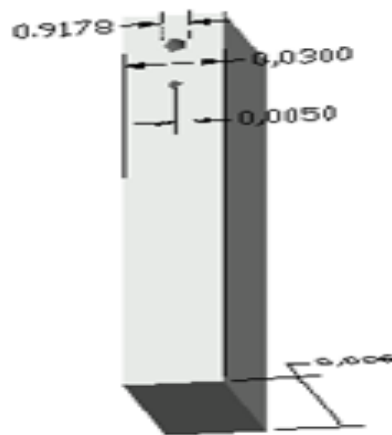
<sup>69</sup> RUBIO FERNANDEZ, Diego y HERNÁNDEZ, Gregorio Alejandro. Evaluación de Las Incidencias de Salinidad Y pH Sobre La Biomasa, Productividad Y Acumulación de Lípidos En Cultivos de Chlorella Vulgaris En Un Fotobiorreactor de Placa Plana. 2016, p. 45.

**Figura 16.** Lámina de las caras laterales



Las láminas superiores (figura 17) tienen las siguientes dimensiones 0,43 x 0,03 m y de 0,006 m de espesor, la pieza superior tiene un orificio de 0,9178 m el cual permite la desgasificación del cultivo, ya que de no ser así el cultivo se satura de gas, provocando cambios en el cultivo. Para la unión de las láminas se utiliza silicona y se deja secar durante 1 día para su uso.

**Figura 17.** Lámina superior



La ecuación que permite determinar si el equipo es el adecuado para el proceso fotosintético es la relación superficie-volumen, cuyas unidades son  $m^{-1}$  <sup>70</sup>:

---

<sup>70</sup> Ibid., p. 47.

$$\text{relación sup - volu} = \frac{\text{área de la placa frontal}}{\text{volumen de equipo}} = \frac{0.08}{0.004} = 20 \text{ m}^{-1} \quad (5)$$

El valor de la relación superficie-volumen cumple con el rango entre 20 hasta 200  $\text{m}^{-1}$  para la adecuación de luz, es decir el equipo presenta buen acceso a la luz, permitiendo que el inóculo realice sin dificultades el proceso fotosintético.

**2.5.3.2 Control de temperatura en el FBR.** El control de temperatura se lleva a cabo mediante un termostato, que mantiene la temperatura a 25°C, este se encuentra instalado en una de las láminas frontales del FBR.

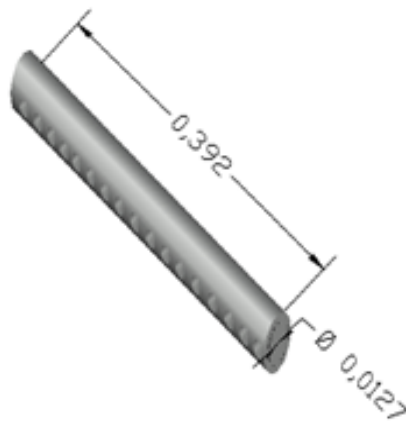
**2.5.3.3 Dimensionamiento de los difusores.** El dimensionamiento del espaciado entre los aspersores del tubo difusor implica el conocimiento del diámetro de cada aspersor en el difusor como el espaciado entre un aspersor y otro. La ecuación (6) se formula como una ayuda al momento de dimensionar cada tubo difusor, en esta ecuación se tiene en cuenta variables como longitud, cantidad de aspersores y diámetro de aspersor.

$$\text{Distancia entre aspersores} = \frac{L - (\text{Cantidad de aspersores} \times \text{Diámetro del aspersor})}{\text{Cantidad de aspersores} + 1} \quad (6)$$

De la anterior expresión se tiene que  $L$  es la longitud del tubo difusor.

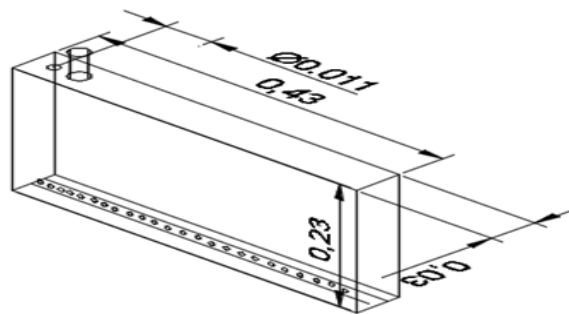
**2.5.3.4 Agitación del FBR.** Los difusores están elaborados en policloruro de vinilo (PVC), se selecciona este material debido a su buena resistencia mecánica como al impacto, alta resistencia a la abrasión y a la corrosión, bajo costo y facilidad al manipularlo. Cada difusor (figura 18) elaborado tiene la misma longitud (0,392 m), área transversal (½ pulgada de diámetro) y la misma cantidad de aspersores (19); por lo cual, la única variación es el diámetro de aspersor (1, 2 y 4 mm) y el espaciado entre estos.

**Figura 18.** Características del tubo difusor



**2.5.3.5 Implementación de la agitación en el FBR.** Los difusores se ubican en la base del equipo (figura 19) y se cambian de forma manual, despegando y pegando el difusor con silicona para vidrios, conforme al diámetro con el cual se va a experimentar, posteriormente se conectan las mangueras.

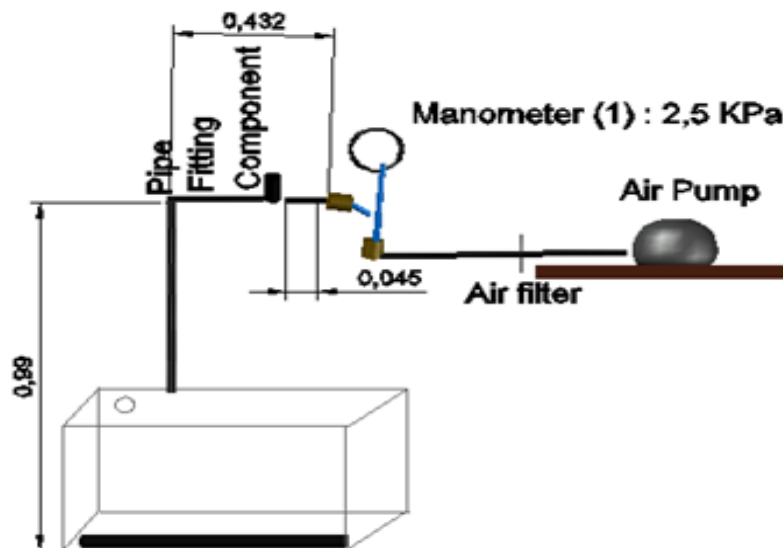
**Figura 19.** FBR panel plano



## 2.6 MONTAJE DEL SISTEMA DE LA PARTE PRE-EXPERIMENTAL

El montaje del sistema de la parte pre-experimental (figura 20), inicia con una bomba (figura 14, izquierda) de 4 salidas, esta se conecta a un filtro de trompo (figura 14, derecha) mediante unas mangueras de 6mm de espesor, este filtro permite garantizar la esterilidad del aire que entra al equipo. Luego se conecta un manómetro que permite conocer la presión del sistema, para mantener la presión se hace uso de llaves ubicadas a la salida del manómetro. Las mangueras que salen de las llaves son conectadas a los extremos laterales del FBR.

**Figura 20.** Montaje del sistema de la parte pre-experimental



**2.6.1. Medición de la presión.** Cabe resaltar que es necesario tener en cuenta la presión que se maneja en el sistema, por lo anterior se utilizan 2 manómetros los cuales se explican en el Anexo B.

Por otra parte, con el fin de conocer la presión de entrada de gas al difusor se introduce las siguientes definiciones:

Ecuación de continuidad: Esta ecuación (7) permite conocer la velocidad de un punto a otro cuando hay una variación en el área transversal<sup>71</sup>, en este caso las mangueras y el tubo difusor. Para el desarrollo de esta ecuación es necesario considerar las expresiones 8 y 9 que hacen referencia al área transversal y al cálculo de la velocidad.

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (7)$$

$$A_T = \pi/4 D^2 \quad (8)$$

$$V = \frac{Q}{A_T} \quad (9)$$

Por otro lado, la ecuación de Bernoulli (10) expresa el flujo de un fluido entre una sección de entrada 1 y la sección de salida 2<sup>72</sup>. Esta ecuación se utiliza para describir el flujo en un sistema de tuberías teniendo en cuenta la viscosidad del fluido, la turbulencia y la rugosidad de las paredes de la tubería. Con esta expresión se obtiene la presión a la salida 2 de la siguiente manera:

$$P_2 = \frac{\rho * (V_1^2 - V_2^2)}{2} + P_1 + (Z_1 - Z_2) * \rho * g \quad (10)$$

Los parámetros utilizados en la ecuación (10) se presentan a continuación:

$P_2$  Presión a la entrada del difusor (se calcula mediante la ecuación Bernoulli).

$V_1^2$  Velocidad a la salida de la bomba (parte pre-experimental) o del regulador (parte experimental).

$V_2^2$  Velocidad a la entrada del difusor (se calcula mediante la ecuación de continuidad).

$P_1$  Presión registrada por el manómetro.

$Z_1$  Punto de referencia en el que se encuentra el difusor.

---

<sup>71</sup> ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.

educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22\_ecuacin\_de\_continuidad.html <http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22\_ecuacin\_de\_continuidad.html >

<sup>72</sup> LYCÉE, J. Jaurés. Dynamique Des Fluides Équations de Continuité et Équations de Bernoulli, p. 1–4.

$Z_2$  Punto en el que se encuentra el manómetro utilizando como referencia el difusor.

$\rho$  Densidad del aire por referencia bibliografía (parte pre-experimental) o densidad de la mezcla calculada (parte experimental).

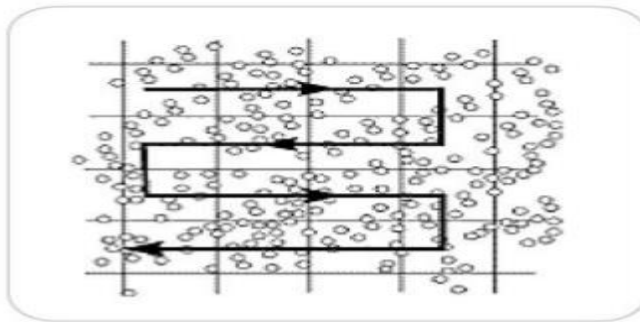
$g$  Aceleración gravitacional

## 2.7 CONTEO CELULAR DE MICROORGANISMOS

El conteo celular de microorganismos se llevó a cabo mediante una cámara Neubauer durante 15 días (para un mayor periodo de estudio) cada 24 horas para cada diámetro, donde se obtuvieron 3 réplicas de cada uno.

Se inicia tomando una muestra de 1 mL de solución de microalga del fotobiorreactor mediante una micropipeta, esta se coloca en la cámara de Neubauer para iniciar el conteo en la cuadrícula de 5 x 5 (25 cuadrículas totales); cabe resaltar que el conteo se lleva a cabo en forma de zig-zag (figura 21)<sup>73</sup> sin tener en cuenta las células que tocan los bordes de la cuadrícula.

**Figura 21.** Conteo en zing-zang



Fuente: BASTIDAS, Oscar. Conteo Celular Con Hematocitómetro, *Technical Note-Neubauer Chamber Cell Counting*, 2011.

El número de células por mL se determina mediante la ecuación 11 a la cual se le realiza la corrección por volumen. El factor de dilución se tiene en cuenta si se dificulta el conteo por la concentración de la muestra<sup>74</sup>.

$$\frac{\text{Células}}{\text{mL}} = \frac{\text{número de células} * \text{factor de dilución}}{\text{volumen} * \frac{\text{cuadrantes contados}}{\text{cuadrantes totales}}} * \frac{1000 \text{ mm}^3}{1 \text{ mL}} \quad (11)$$

<sup>73</sup> BASTIDAS, Oscar. Conteo Celular Con Hematocitómetro. En: *Celeromics*. 2011. p. 4.

<sup>74</sup> HERNANDEZ HERNANDEZ, Gregorio Alejandro, Evaluación de Las Incidencias de Salinidad Y pH Sobre La Biomasa, Productividad Y Acumulación de Lípidos En Cultivos de Chlorella Vulgaris En Un Fotobiorreactor de Placa Plana. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. 2014. 45 p.

## 2.8 ANÁLISIS DE VARIANZA

El análisis de varianza, como método estadístico tiene en cuenta las interacciones sobre la variable dependiente, velocidad específica de crecimiento celular, con respecto a los diámetros de los aspersores en el difusor como variable independiente<sup>75</sup>.

Para este método se rechaza o acepta la hipótesis nula teniendo en cuenta el valor de F con respecto al valor de F crítico, al mismo tiempo se tiene en cuenta el valor de la probabilidad, un valor de probabilidad menor al valor de significancia obliga a rechazar la hipótesis nula.

Las ecuaciones para este método se presentan a continuación:

$$SST = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{T^2}{nk} \quad (12)$$

$$SSA = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n \frac{Y_i^2}{n} - \frac{\sum_{i=0}^K T^2}{nk} \quad (13)$$

$$SSE = SST - SSA \quad (14)$$

$$V_1 = k - 1 \quad (15)$$

$$V_2 = k(n - 1) \quad (16)$$

$$V_T = nk - 1 \quad (17)$$

$$CME_{TR} = \frac{SSA}{k - 1} \quad (18)$$

$$CMD_{ER} = \frac{SSE}{nk - 1} \quad (19)$$

$$F = \frac{CME_{TR}}{CMD_{ER}} \quad (20)$$

## 2.9 COMPARACIÓN ENTRE PAREJAS: Método C.W. Dunnet

Este método actúa como una medida que compara las medias entre parejas cuando no se presentan cambios significativos en el análisis de varianza. Las siguientes ecuaciones tienen en cuenta la interacción del control con respecto a las variables a analizar:

---

<sup>75</sup> Ibid., p. 48.



$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{\sum_{i=0}^k Ti^2}{n} \quad (21)$$

$$S^2 = \frac{SSE}{(k+1)(n-1)} \quad (22)$$

$$di = \frac{\bar{Y}_i - Y_0}{\sqrt{\frac{2S^2}{n}}} \quad (23)$$

$$V_2 = (k+1)(n-1) \quad (24)$$

## 2.10 DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

En esta sección se emplean los 2 diámetros de aspersor (1 y 2 mm) en los tubos difusores que han sido seleccionados en la sección 2.9 mediante la prueba t student, esta evidencia que existen cambios significativos en las tasas de crecimiento con estos aspersores.

Es importante mencionar que en esta parte experimental se modifica el sistema de agitación, empleando un cilindro de 6 m<sup>3</sup> con una mezcla de CO<sub>2</sub> y aire.

**2.10.1 Selección de la concentración de CO<sub>2</sub>.** En el presente proyecto se consultó diferentes fuentes bibliográficas con el propósito de seleccionar la concentración de CO<sub>2</sub> a manejar, en la Tabla 5 se presenta la información de forma resumida.

**Tabla 5.** Cuadro comparativo de la concentración de CO<sub>2</sub> por especie y tipo de FBR reportada en artículos científicos

Concentración	Cepa	Tipo de reactor	Año
5% (v/v) de CO <sub>2</sub>	<i>Chlorella Vulgaris</i> AC 149	FBR columna de burbuja	Modelo propuesto por Rayen Filali, 2010, cumple con el reporte (Nouals, 2000).
15% de (v/v) de CO <sub>2</sub>	<i>Chlorella sp</i>	FBR columna de burbuja	Modelo propuesto por Sheng-Yi Chiu, 2007, cumple con reporte (Lee et al., 2002; Yoshihara et al., 1996; Yun et al., 1997).

**Tabla 5.** (Continuación)

<b>Concentración</b>	<b>Cepa</b>	<b>Tipo de reactor</b>	<b>Año</b>
5% de (v/v) de CO <sub>2</sub>	<i>Chlorella sp</i>	FBR columna de burbuja	Modelo propuesto por Geetanjali Yadav, 2015, cumple con reporte (Chiu et al., 2008, 2009; de Morais and Costa, 2007; Cheah et al., 2015).
18% de (v/v) de CO <sub>2</sub>	<i>Chlorella vulgaris</i> CBS 15-2075	FBR columna de burbuja.	Modelo propuesto por Bo Yang, (2015).

Por otro lado, en revisión bibliográfica a trabajos de grado desarrollados en la Fundación Universidad de América, se encontraron valores máximos reportados de 9% (Chicagui & Suarez, 2014) hasta 22%<sup>76</sup> (Astros, Navarro, Páez, 2014).

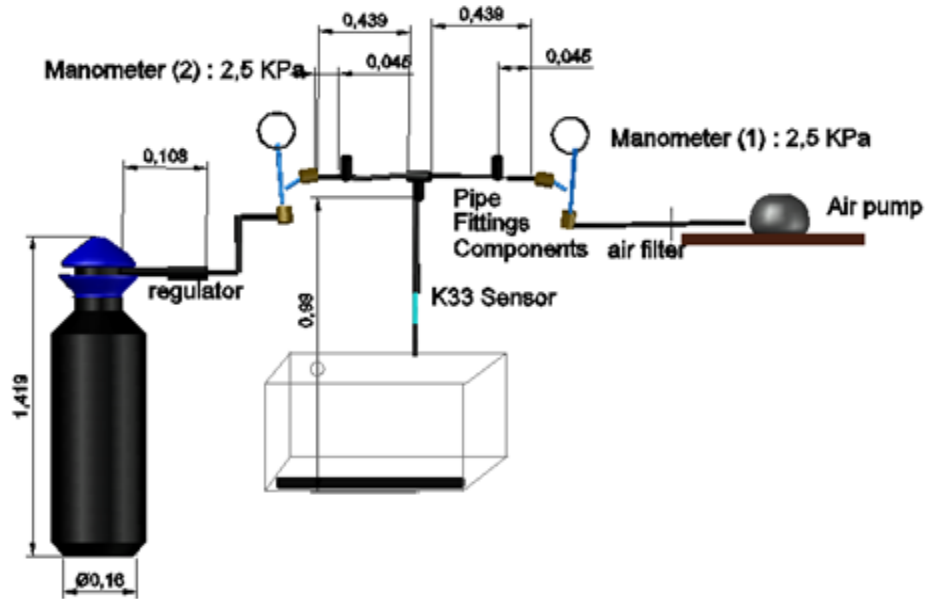
Haciendo uso de la información anteriormente mencionada, se seleccionan como porcentajes para la mezcla: 9% de CO<sub>2</sub> y 91% aire.

**2.10.2 Montaje del sistema.** El diseño del montaje de la parte experimental (figura 22), consiste en un cilindro de CO<sub>2</sub> y una bomba (figura 14, izquierda) de 4 salidas. A estos equipos se le conectan mangueras siliconadas de 6mm de espesor y un filtro de trompo (figura 14, derecha) que permite la purificación del aire, a su vez estos se encuentran conectados a un respectivo manómetro para conocer la presión del sistema. Luego, se instalan llaves a las mangueras siliconadas para poder regular el paso del aire y se conecta la tarjeta K-33 ICB para verificar el porcentaje de CO<sub>2</sub> que está entrando al FBR. Por último, se conectan las mangueras al difusor a los extremos laterales del FBR.

---

<sup>76</sup> ASTROS, Iván Rodrigo, et al. Evaluación Del Cambio En La Concentración de Dióxido de Carbono En Una Corriente de Gas Mediante El Uso de Chlorella Vulgaris, 2014, p. 117.

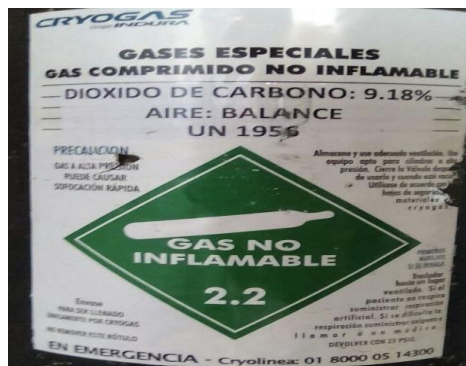
Figura 22. Montaje del sistema experimental



**2.10.2.1 Sistema de agitación.** El sistema de agitación es proporcionado por un cilindro de CO<sub>2</sub> durante 6 horas, y una bomba de cuatro salidas con una potencia de 9 watts (figura 14, izquierda) durante las 18 horas restantes. La bomba se encuentra conectada a un filtro de trompo el cual ayuda a la purificación del aire (figura 14, derecha).

**2.10.2.1.1 Cilindro de CO<sub>2</sub>.** El cilindro tiene una capacidad de 6 m<sup>3</sup>, es de color negro y contiene una mezcla de 9% CO<sub>2</sub> y 91% aire como se puede observar en la figura 23 y en el Anexo E donde se verifica la mezcla. Por otro lado, en el Anexo D se muestra la ficha técnica de la mezcla y en el Anexo E se muestra la hoja de datos de seguridad del dióxido de carbono en oxígeno y nitrógeno.

Figura 23. Etiqueta de la mezcla en el cilindro



La mezcla es inyectada y suministrada al FBR durante 6 horas por 10 días para cada diámetro de aspersor en el tubo difusor.

**2.10.2.1.2 Regulador de flujo.** Es el instrumento más importante del sistema, debido a que permite conocer y mantener un caudal fijo; este maneja un rango de 0 a 4 L/min que pueden ser ingresados al FBR. El regulador de flujo se conectó al cilindro de CO<sub>2</sub> como se puede observar en la figura 24.

**Figura 24.** Cilindro de CO<sub>2</sub> y regulador de flujo



**2.10.2.2 Tarjeta CO<sub>2</sub> K-33 ICB.** La tarjeta permite medir el flujo de CO<sub>2</sub> que entra al FBR, esta se encuentra conectada a un computador y mediante el programa DAS se genera la gráfica que especifica el porcentaje de CO<sub>2</sub>. En el Anexo F se puede observar sus especificaciones.

**Figura 25.** Tarjeta K-33 ICB



La tarjeta funciona con un sensor (K-33) que puede medir el CO<sub>2</sub> que ingresa por el tubo de 0.8 mm; allí se genera un pequeño vacío y el gas queda atrapado para

la lectura gracias a un filtro adaptado al sistema. En el momento que se hace la detección automática del flujo, el doble infrarrojo utiliza su configuración y se proyecta desde el sensor, el cual al estar conectado al computador vía JP5, envía comunicación 12C con la información que es comprendida y transformada por el software <sup>77</sup> .

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema, se debe asegurar que las líneas de transmisión de señales no estén bloqueadas y se encuentren lo más uniformes posibles, pues una alteración por flujos altos puede convertir en equívoca la lectura. La separación recomendada entre las líneas es de 2 mm, máximo 5.08 mm. Otro factor que considerar es la orientación de la cabeza de acoplamiento sea de 120 centígrados y que la fuente de alimentación provea el voltaje de 5 a 14 voltios para evitar corto circuito y daños irreversibles en el convertidor, las terminales o los colectores de entrada o salida<sup>78</sup>.

**2.10.2.3 Sistema de monitoreo de pH.** Teniendo en cuenta que las microalgas muestran una gran dependencia respecto al pH el cual varía conforme a la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto, este es monitoreado mediante un pHmetro (figura 26) que consiste en un regulador electrónico, conformado por una sonda que mide constantemente el pH de las microalgas en el FBR. El sistema registro un valor máximo de 7, 5.

**Figura 26.** pHmetro



## 2.11 CONTEO CELULAR DE LA MICROALGA EN LA EXPERIMENTACION

El conteo celular de microorganismos se lleva a cabo mediante una cámara Neubauer (figura 21), durante 10 días para los diámetros 1 y 2 mm, se obtienen 3

---

<sup>77</sup> SUÁREZ CHAPARRO, Miryam Yessenia, et al. Op. cit., p. 61.

<sup>78</sup> Ibid., p. 61.

réplicas de cada uno. El conteo se realiza durante el tiempo de agitación con el cilindro de CO<sub>2</sub>.

El número de células por mL se determina con la ecuación (11) de la misma manera que en la parte pre-experimental.

En tanto se realizan diluciones seriadas con un factor de dilución 1:10, por ejemplo, iniciando con una primera dilución correspondiente a la relación 1:10 donde se toma 0,1 mL de muestra y 0,9 mL de agua destilada, este factor debe ser incorporado en la ecuación; a su vez valores como el volumen de la cámara que corresponde a 0,1 mm<sup>3</sup> y los cuadrantes contados 25 /25 totales son tenidos en cuenta.

**2.11.1 Tasa de crecimiento o velocidad específica de crecimiento.** Las microalgas se reproducen principalmente por división celular, que es binaria en la mayoría de los casos. En general, las condiciones cambian con el tiempo de cultivo lo que con lleva a un cambio en la velocidad de crecimiento poblacional; esto permite reconocer diferentes fases de crecimiento, que sirven para describir la forma en la cual cambia la concentración celular o de biomasa. Por lo anterior, es necesario hacer uso de parámetros poblaciones como la velocidad específica de crecimiento o también conocida como tasa de crecimiento ( $\mu$ ) <sup>79</sup>:

$$\mu = \frac{(\ln x_2 - \ln x_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (25)$$

En donde  $x_2$  y  $x_1$  son concentraciones determinadas en los tiempos  $t_2$  y  $t_1$

De acuerdo con las propiedades de los logaritmos, la ecuación anterior se puede escribir:

$$\mu = \frac{\ln(x_2/x_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (26)$$

En vista de que la mayoría de las microalgas se reproduce mediante división binaria, la tasa de crecimiento se puede obtener directamente en número de divisiones celulares o de duplicaciones diarias de biomasa, utilizando en la ecuación anterior logaritmos en base 2 de acuerdo con la fórmula:

$$\mu = \frac{\left[ \frac{\ln \left( \frac{x_2}{x_1} \right)}{\ln(2)} \right]}{(t_2 - t_1)} \quad (27)$$

---

<sup>79</sup> ARREDONDO, Bertha Olivia y DOMENICO, Voltolina. Métodos Y Herramientas Analíticas En La Evaluación de La Biomasa Microalgal, 2007, p. 25-27.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la primera parte y lo que concierne a la parte pre-experimental se presenta el dimensionamiento de cada difusor conforme al diámetro de cada aspersor en el difusor, seguido por los cálculos relacionados a la presión, para proseguir con las curvas de crecimiento y el diseño de experimentos que permite seleccionar los 2 diámetros que influyen en el tamaño y con los cuales se trabaja la parte experimental con CO<sub>2</sub>.

#### 3.1 PARTE PRE-EXPERIMENTAL

**3.1.1 Dimensionamiento de los difusores.** Inicialmente, se dimensionan los tres difusores con los respectivos diámetros de aspersor 1,2 y 4 mm.

Para este fin, se calcula la distancia entre un aspersor y otro que depende primordialmente de la longitud del tubo, así como la cantidad de aspersores totales con los que cuenta el difusor. Por lo anterior y para cada tubo difusor se desarrolla la ecuación 6 descrita en metodología, teniendo en cuenta que cada tubo tiene 0,392 m de longitud y un total de 19 aspersores.

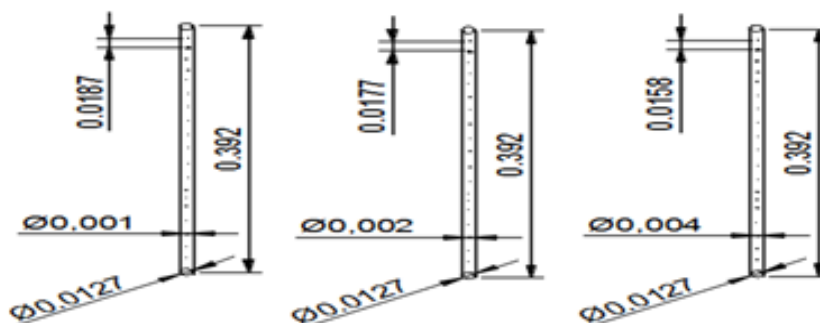
Los resultados obtenidos para cada difusor se presentan a continuación en la Tabla 6:

**Tabla 6.** Distancia entre aspersores para cada diámetro de difusor

<b>Diámetro del aspersor (metros)</b>	<b>Distancia entre aspersores (metros)</b>
<b>1*10<sup>-3</sup></b>	0,01865
<b>2*10<sup>-3</sup></b>	0,0177
<b>4*10<sup>-3</sup></b>	0,0158

La figura 27 presenta el resultado final de cada difusor:

**Figura 27.** Dimensionamiento del espaciamiento entre los aspersores de los tubos difusores



**3.1.2 Presión de entrada al sistema.** Al tener los tres difusores con los respectivos diámetros se procede a calcular la presión necesaria con la que debe ingresar el gas al FBR; estos cálculos se realizan utilizando la presión que registra el manómetro de 2,5 KPa.

Como ya se mencionó, la presión total del sistema influye en la formación de la burbuja por lo que es de vital importancia calcular la presión con la que ingresa el aire en el FBR, este cálculo se realiza haciendo uso de la ecuación de continuidad y la ecuación de Bernoulli, ecuación 7 y 10 respectivamente, es necesario resaltar que la presión que se obtiene en el manómetro no ha de ser la misma por la trayectoria de las mangueras y las pérdidas que estas puedan generar.

El área 1 así como la velocidad 1 hacen referencia al área transversal de la manguera que se encuentra conectada al manómetro; el área 2 como la velocidad 2 hace referencia al área transversal del difusor, las ecuaciones y el desarrollo de los cálculos se presentan a continuación.

Para el cálculo del área transversal como la velocidad del aire entre la manguera, así como la del difusor, se utilizan la ecuación 8 y 9, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Valores necesarios para la ecuación de continuidad

	Manguera	Difusor
Área transversal (m <sup>2</sup> )	1,96 *10 <sup>-5</sup>	1,26*10 <sup>-4</sup>
Velocidad del aire (m/s)	0,4272	(Ecuación 7)

Al despejar  $V_2$  de la ecuación de continuidad se obtuvo:



$$\frac{A_1 V_1}{A_2} = V_2 = 0,0665 \text{ m/s}$$

Después de obtener la  $V_2$ , se procede a calcular la presión del aire a la entrada del difusor mediante la ecuación del Bernoulli, los datos empleados se presentan a continuación en la Tabla 8:

**Tabla 8.** Valores ecuación de Bernoulli

Variable	Magnitud
$Z_1$	0,99 m
$Z_2$	0 m
$P_1$	2500 Pa
$\rho$	1,185 Kg/m <sup>3</sup>
$g$	9,8 m/s

Donde  $Z_1$  corresponde a la altura donde se obtiene la lectura del manómetro,  $Z_2$  que corresponde a la altura en la que se encuentra el difusor,  $P_1$  la lectura que se registra en el manómetro,  $\rho$  la densidad del aire a las condiciones de operación y  $g$  como la gravedad. Obteniendo que la presión 2 corresponde a un valor de:

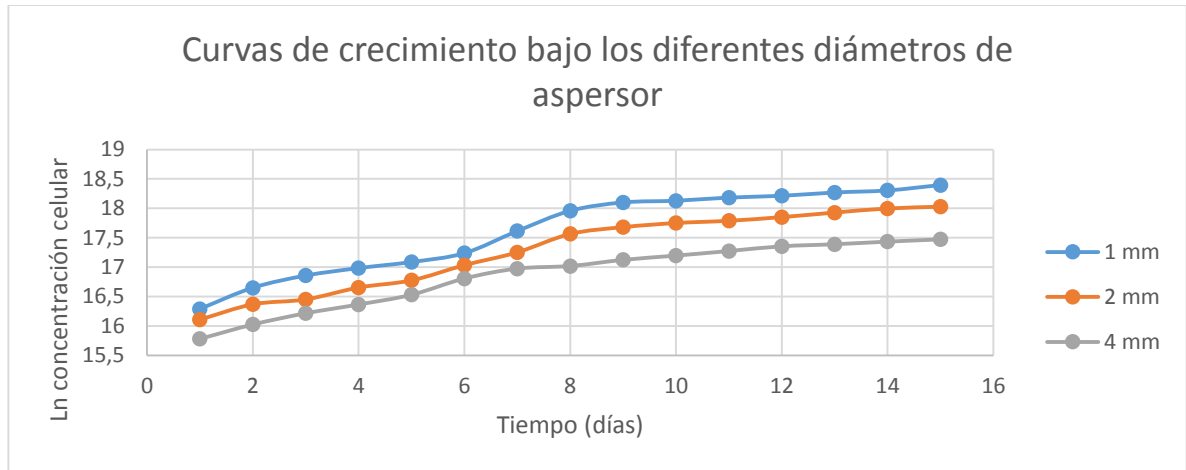
$$P_2 = 2511,60 \text{ Pa}$$

**3.1.3 Curvas de crecimiento.** Bajo las condiciones que se presentaron en la metodología y manteniendo la presión a la entrada del difusor que se calculó anteriormente, se procede a desarrollar la curva de crecimiento de la microalga por cada día de conteo en el fotobiorreactor, con los diferentes diámetros de aspersor 1, 2 y 4 mm respectivamente.

La gráfica 1 muestran las curvas de crecimiento en los diferentes diámetros utilizados en el difusor, teniendo en cuenta el promedio de cada una de las réplicas por día y a las cuales se le aplica el logaritmo natural para cada concentración.

En la curva de 4 mm se observa que la fase exponencial se prolonga desde el día 5 hasta el día 7. En cambio, en la curva de 2 mm su fase exponencial se ve reflejada en el día 6 hasta el día 9 respectivamente. Por último, la curva de 1 mm presenta una fase exponencial más prolongada que inicia en el día 6 hasta el día 10 dejando una diferencia de 4 días.

**Gráfica 1.** Curvas de crecimiento de *Chlorella Vulgaris* a los diferentes diámetros de aspersor



Las curvas de crecimiento generadas para cada diámetro no presentan diferencias significativas entre cada día de cultivo, debido a la tasa de crecimiento, según una investigación desarrollada por (Mohsenpour & Willoughby, 2015), muestra que la tasa de crecimiento para un cultivo con aireación de 99,97 % de aire y el 0,03 % de CO<sub>2</sub> es mayor con respecto a los datos obtenidos en esta investigación, como se aprecia en la Tabla 9 <sup>80</sup>:

**Tabla 9.** Tasas de crecimiento

<b>Diámetros (mm)</b>	<b>Tasa de crecimiento, días<sup>-1</sup> (propia).</b>	<b>Tasa de crecimiento, días<sup>-1</sup> (Mohsenpour &amp; Willoughby, 2015)</b>
1	0,217	0,42
2	0,198	
4	0,174	

Los resultados muestran que la tasa de crecimiento de dicha investigación es el doble con respecto a la mejor tasa de crecimiento obtenida previamente en esta investigación que fue para el diámetro de 1 mm, esto se debe a la cantidad de flujo de aire que afecta el crecimiento, ya que para obtener una alta tasa de crecimiento a volúmenes de cultivo similares se debe emplear un flujo de 4.44 vvm, conforme a los investigadores (Mohsenpour & Willoughby, 2013) que utilizando este flujo y bajo la incidencia de la luz roja obtuvieron buenos resultados. En este sentido y por cuestiones económicas, esta investigación empleó un flujo de 0.17 vvm, que es menor al flujo anteriormente mencionado, lo que en efecto provocó que la

<sup>80</sup> MOHSENPOUR, Seyedeh Fatemeh, et al. Effect of CO<sub>2</sub> Aeration on Cultivation of Microalgae in Luminescent Photobioreactors. *En: Biomass and Bioenergy*. 2015. vol.85. p. 172

fluidización no fuese suficiente para que cada una de las microalgas recibieran la misma cantidad de luz proveniente de las lamparas de halógeno de color roja; de esta manera se produjo una desaceleración en el crecimiento del cultivo <sup>81</sup>.

Por otro lado, los valores promedio de las tasas de crecimiento permiten apreciar que bajo los diámetros de aspersor de 1 y 2 mm se presenta una mayor velocidad de crecimiento con respecto al resultado bajo el diámetro de 4mm, sin embargo, esto es puesto a prueba posteriormente con el análisis de varianza ANOVA y la prueba t.

**3.1.3.1 Análisis estadístico.** Las curvas de crecimiento bajo cada difusor son evaluadas bajo un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, con el fin de conocer si existe o no diferencias significativas en las tasas de crecimiento celular debido a los diámetros del aspersor. Las hipótesis planteadas se presentan a continuación:

**Hipótesis Nula (Ho):** No hay diferencia significativa en las tasas de crecimiento por el cambio en el diámetro en los aspersores.

**Hipótesis Alterna (Ha):** Hay diferencia significativa en las tasas de crecimiento por el cambio en el diámetro en los aspersores.

Utilizando las ecuaciones 12, 13, 14, 15,16, 17, 18, 19 y 20 que se presentan en la metodología, se obtiene la Tabla 10 con los resultados del análisis de varianza:

**Tabla 10.** Resultados Análisis de varianza ANOVA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,013694307	2	0,006847153	0,346894226	0,70888621	3,219942293
Dentro de los grupos	0,829014783	42	0,019738447			
Total	0,842709089	44				

Como se aprecia, el valor de F es menor al valor del F crítico (3,2199) y el valor de la probabilidad es mayor a 0,05 (Siendo 0,05 el nivel de significancia), este

<sup>81</sup> MOHSENPOUR, Seyedeh Fatemeh y WILLOUGHBY, Nik. Luminescent Photobioreactor Design for Improved Algal Growth and Photosynthetic Pigment Production through Spectral Conversion of Light. *En: Bioresource technology*. 2013. vol. 142. p. 150.

resultado obliga a aceptar la hipótesis nula y a afirmar que no hay diferencia significativa en las tasas de crecimiento por el cambio de diámetros de los aspersores.

Ante este resultado, se procede a desarrollar la comparación entre parejas que se describe en la sección 2.9, necesario para simplificar los niveles (diámetros) y encontrar aquellos que afectan la variable respuesta (tasas de crecimiento).

**Tabla 11.** Análisis de varianzas desiguales entre los grupos de 1 mm y 2 mm

	<b>1 mm</b>	<b>2 mm</b>
Media	0,217071218	0,197806213
Varianza	0,032387217	0,01831539
Observaciones	14	14
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	24	
Estadístico t	0,320123824	
P(T<=t) una cola	0,375822423	
Valor crítico de t (una cola)	1,71088208	
P(T<=t) dos colas	0,751644847	
Valor crítico de t (dos colas)	2,063898562	

Tomando como ejemplo la primera pareja de 1 mm y 2 mm, Tabla 11, se puede observar en el análisis de varianza que entre estos dos diámetros hubo cambios significativos debido a la comparación del valor de la probabilidad de dos colas P(T<=t) con respecto a la probabilidad de la tabla ANOVA, cuyo valor es mayor, por lo que se puede determinar que estos diámetros son los adecuados para desarrollar la parte experimental en el fotobiorreactor; en las siguientes tablas se muestra las interacciones de los demás diámetros.

**Tabla 12.** Análisis de varianzas desiguales entre los grupos de 2 mm y 4 mm

	<b>2 mm</b>	<b>4 mm</b>
Media	0,197806213	0,174407286
Varianza	0,01831539	0,01306776
Observaciones	14	14
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	25	

**Tabla 13.** (Continuación)

	<b>2 mm</b>	<b>4 mm</b>
Estadístico t	0,494210189	
P(T<=t) una cola	0,312736225	
Valor crítico de t (una cola)	1,708140761	
P(T<=t) dos colas	0,625472451	
Valor crítico de t (dos colas)	2,059538553	

El resultado de la Tabla 12 muestra que los diámetros de 2 mm y 4 mm no presentan cambios significativos debido a la comparación de la probabilidad de dos colas P (T<=t) con la probabilidad de la tabla ANOVA.

**Tabla 14.** Análisis de varianzas desiguales entre los grupos de 1 mm y 4 mm

	<b>1 mm</b>	<b>4 mm</b>
Media	0,217071218	0,174407286
Varianza	0,032387217	0,01306776
Observaciones	14	14
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	22	
Estadístico t	0,748745417	
P(T<=t) una cola	0,230970713	
Valor crítico de t (una cola)	1,717144374	
P(T<=t) dos colas	0,461941427	
Valor crítico de t (dos colas)	2,073873068	

El resultado de la Tabla 13 muestra que los diámetros de 1 mm y 4 mm no presentan cambios significativos debido a la comparación de la probabilidad de dos colas P (T<=t) con la probabilidad de la tabla ANOVA.

Por lo anterior, se simplifica los 3 niveles a 2 obteniendo como diámetros de trabajo 1 y 2 mm.

Con la información de los diámetros obtenidos anteriormente, se procede a realizar a continuación la parte experimental.

### 3.2 PARTE EXPERIMENTAL

En la fase experimental se calcula la presión para asegurar que no exista un cambio significativo entre la lectura registrada por el manómetro y la presión a la entrada del difusor debido a la mezcla. Posteriormente, se presenta un análisis de las curvas de crecimiento obtenidas bajo los diámetros de 1 y 2 mm de aspersor en el difusor, los cuales fueron seleccionados en la pre-experimentación.

Como se ha mencionado anteriormente es necesario hacer uso de la ecuación de continuidad (7) y la ecuación de Bernoulli (10).

Debido a que se mantiene el área de las mangueras siliconadas, se procede a calcular la velocidad 2 ( $V_2$ ) que corresponde a la velocidad de la mezcla a la entrada del difusor con la ecuación (7). Al mantener la velocidad de la mezcla en el regulador en 0,4272 m/s, se obtiene como valor de  $V_2 = 0,0665 \text{ m/s}$ .

Con la ecuación (10) se calcula la presión de la mezcla a la entrada del difusor; como la densidad de la parte experimental (mezcla) varía con respecto a la densidad utilizada en la parte pre-experimental (aire), se procede a calcular la densidad de la mezcla. Conociendo la densidad del aire y la densidad del  $\text{CO}_2$ , y calculando el volumen que ocupa cada uno en la mezcla (9%  $\text{CO}_2$  y 91% Aire) la cual contiene un volumen total de  $6 \text{ m}^3$ , se presentan los siguientes valores en la Tabla 14:

**Tabla 15.** Valores de los volúmenes en la mezcla y densidades

	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Volumen que ocupa en la mezcla (m <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub> (9%)	1,842	0,54
Aire (91%)	1,19	5,46

Con los valores anteriores se calcula la masa que ocupa el  $\text{CO}_2$  y el aire en la mezcla. Estos valores se muestran a continuación en la Tabla 15:

**Tabla 16.** Masa de la mezcla

Masa	Valor (kg)
$m_{\text{CO}_2}$	0,995
$m_{\text{Aire}}$	6,50
$m_{\text{mezcla}}$	7,5

Bajo los datos obtenidos anteriormente se procede a calcular la densidad de la mezcla:

$$\rho_{\text{mezcla}} = \frac{m_{\text{mezcla}}}{V_{\text{total de la mezcla}}} = 1,25 \text{ kg/m}^3 \quad (28)$$

Con la densidad calculada anteriormente y los valores que se presentan en la Tabla 16 se halla la presión a la entrada del difusor debido a la mezcla mediante la ecuación de Bernoulli, todas las variables de esta ecuación se mantienen constantes con respecto a la parte pre-experimental exceptuando la densidad

**Tabla 17.** Valores ecuación de Bernoulli

Variable	Magnitud
$Z_1$	0,99 m
$Z_2$	0 m
$P_1$	2500 Pa
$\rho$	1,25 kg/m <sup>3</sup>
$g$	9,8 m/s

Con la tabla anterior se obtiene que la presión 2 ( $P_2$ ) corresponde a un valor de:

$$P_2 = 2534,19 Pa$$

Debido al anterior resultado, se observa que el valor de  $P_2$  de la parte pre-experimental presenta una diferencia en porcentaje de 0,00892% con respecto al valor de  $P_2$  de la parte experimental. Por lo anterior, este valor no presenta diferencia significativa.

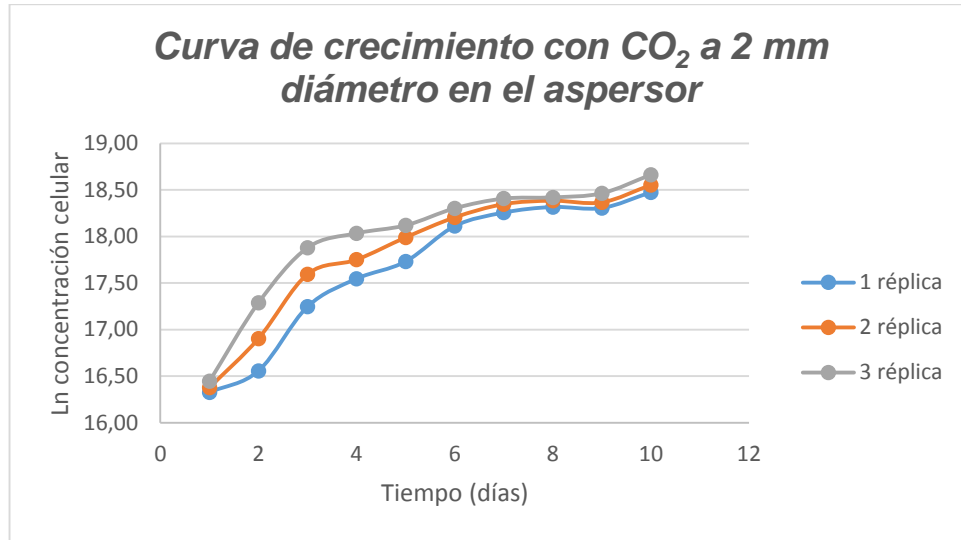
### 3.2.1 Curvas de crecimiento con CO<sub>2</sub>.

**3.2.1.1 Método de conteo mediante cámara Neubauer.** Con las condiciones que se presentan en la parte experimental, manteniendo la presión a la entrada del difusor que se calculó anteriormente, utilizando los diámetros de aspersion seleccionados en la parte pre-experimental (1 y 2 mm), se procede a desarrollar la curva de crecimiento de la microalga por cada día de cultivo en el fotobiorreactor.

Teniendo en cuenta el factor de dilución en la ecuación 11, se obtienen las siguientes curvas de crecimiento con CO<sub>2</sub> en cada aspersion; estas se representan con el promedio de cada una de las réplicas por día y a las cuales se les aplica el logaritmo natural para cada concentración.

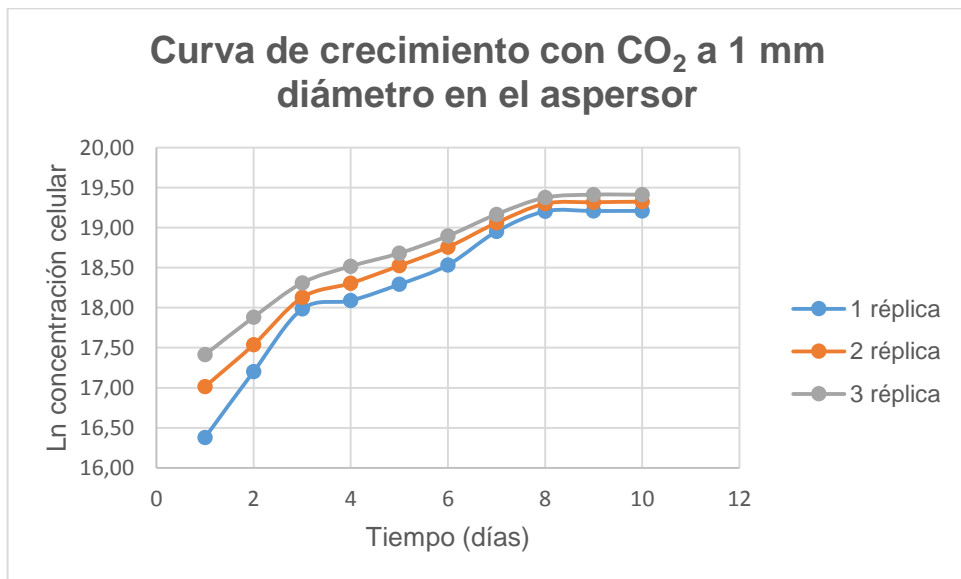
La parte experimental se inicia con el diámetro de aspersion de 2 mm. En la gráfica 2 se observa que la curva de crecimiento a este diámetro presenta una fase exponencial hasta el día 4, seguido por un crecimiento lento que se mantiene hasta el día 9 y vuelve aumentar en el día 10. Por otro lado, los investigadores (Chicagui & Suarez, 2014) al utilizar el mismo porcentaje de mezcla e igual diámetro, presentan un valor promedio de tasa de crecimiento de 0,18 días<sup>-1</sup> (5 días de cultivo), valor menor a lo obtenido en esta investigación de 0,35 días<sup>-1</sup> (10 días de cultivo), lo anterior se debe a la manera como se llevó a cabo la mezcla.

**Gráfica 2.** Curva de crecimiento con CO<sub>2</sub> a 2 mm diámetro en el aspersor.



La gráfica 3 muestra que el cultivo bajo un diámetro de aspersor de 1 mm se adapta rápidamente presentando una fase exponencial que llega hasta el día 7 seguido por una fase estacionaria como consecuencia a la disminución de la mezcla en el cilindro. La tasa de crecimiento obtenida a este diámetro es 0,37 días<sup>-1</sup>, mayores al diámetro de 2 mm. El incremento celular se debe a que las burbujas formadas con este diámetro de aspersor suben a una baja velocidad, haciendo que permanezcan más tiempo en el cultivo y de esta forma el CO<sub>2</sub> que se encuentra en la burbuja tenga más tiempo para disolverse.

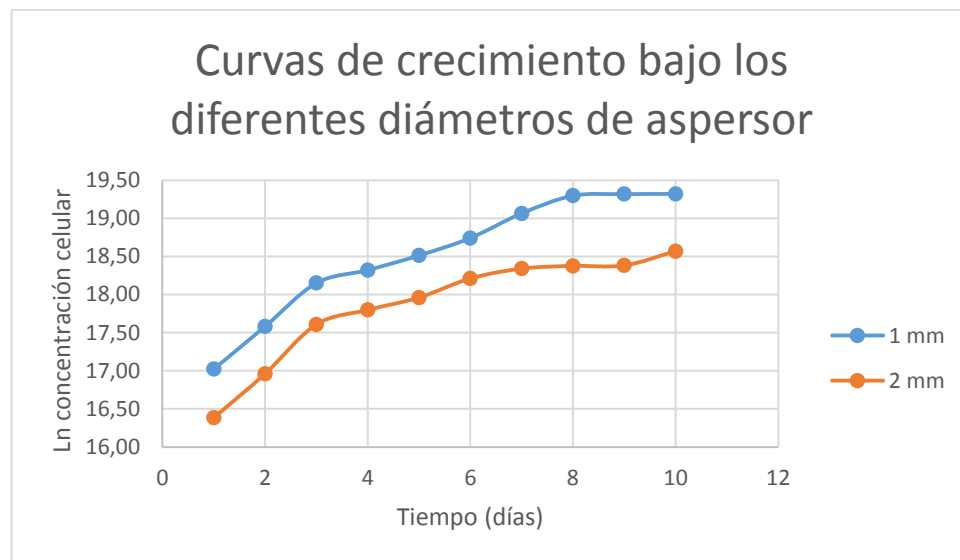
**Gráfica 3.** Curva de crecimiento con CO<sub>2</sub> a 1 mm diámetro en el aspersor.





La gráfica 4 muestra las curvas de crecimiento con 1 y 2 mm como diámetro de aspersor en el difusor usando la mezcla de CO<sub>2</sub>. Estas se representan gráficamente teniendo en cuenta el promedio de cada una de las réplicas por día y a las cuales se le aplica el logaritmo natural para cada concentración.

**Gráfica 4.** Curvas de crecimiento con CO<sub>2</sub> a los diferentes diámetros de aspersor.



Según los investigadores (Doucha, Straka, Lívanský, 2005), el rango de presión mínimo de CO<sub>2</sub> que debe ingresar al cultivo es de 0.1-0.2 KPa<sup>82</sup>, lo cual, evita limitar el crecimiento de la microalga por escasas de CO<sub>2</sub> y a su vez minimiza las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera<sup>83</sup>; en este sentido, la presión parcial de CO<sub>2</sub> utilizada en esta investigación es de 0.225 KPa la cual se relaciona con el caudal empleado y explicado en la parte pre-experimental.

Los resultados presentados en la Tabla 17, permiten apreciar que a menor diámetro de aspersor aumenta la tasa de crecimiento, debido a que las burbujas con diámetros pequeños se comportan como esferas rígidas con una superficie inmóvil<sup>84</sup> que disminuye la probabilidad de coalescencia de las burbujas (evitando que aumente su tamaño y de igual manera que haya un aumento en la velocidad con la que asciende)<sup>85</sup> y por lo cual se mantienen intactas desde su salida en el difusor hasta la superficie del líquido, lo que ayuda a homogeneizar las diferentes

<sup>82</sup> DOUCHA, Jiri et. al. Utilization of Flue Gas for Cultivation of Microalgae (Chlorella Sp.) in an Outdoor Open Thin-Layer Photobioreactor. *En: Journal of Applied Phycology*. June, 2005. vol. 17, p.406.

<sup>83</sup> DOUCHA, Jiri y LÍVANSJÝ, Karel. Influence of Solar Irradiance, Culture Temperature and CO<sub>2</sub> Supply on Daily Course of O<sub>2</sub> Evolution by Chlorella Mass Cultures in Outdoor Open Thin-Layer Culture Units. 1998. p. 143.

<sup>84</sup> KADIC, Enes and HEINDEL, Theodore J., Op. cit., p. 15.

<sup>85</sup> CALVACHE, Jaime Arturo. Simulación de Biorreactores Airlift, 2002. p. 24.

zonas dentro del cultivo. Cabe resaltar que una burbuja que asciende con menor velocidad tendrá un mayor tiempo de residencia en el fotobiorreactor<sup>86</sup>.

Por otro lado, los investigadores (Mohsenpour & Willoughby, 2015) registran tasas de crecimiento menores en comparación a esta investigación, como se aprecia en la Tabla 17, esto se debe al bajo caudal utilizado, el cual evitó que la concentración de CO<sub>2</sub> empleada (9% de CO<sub>2</sub>) ocasionara una reducción considerable en el pH, que en su efecto disminuye la actividad fotosintética e inhibe el crecimiento<sup>87</sup>.

**Tabla 18.** Tasas de crecimiento con CO<sub>2</sub>

<b>Diámetros (mm)</b>	<b>Tasa de crecimiento con 9% CO<sub>2</sub>, días<sup>-1</sup> (propia).</b>	<b>Tasa de crecimiento con 5% CO<sub>2</sub>, días<sup>-1</sup> (Mohsenpour &amp; Willoughby, 2015)</b>	<b>Tasa de crecimiento con 15% CO<sub>2</sub>, días<sup>-1</sup> (Mohsenpour &amp; Willoughby, 2015)</b>
1	0,37	0,18	0,33
2	0,35		

Estos valores confirman el hecho de que bajo las condiciones del difusor de 1 mm en el aspersor se obtienen burbujas con una mayor área interfacial lo cual conduce a una mayor transferencia de CO<sub>2</sub> en las fases gas-liquido<sup>88</sup>.

<sup>86</sup> KADIC, Enes and HEINDEL, Theodore J. Op. cit., p. 40.

<sup>87</sup> MOHSENPOUR, Seyedeh Fatemeh, et al. Effect of CO<sub>2</sub> Aeration on Cultivation of Microalgae in Luminescent Photobioreactors. *En: Biomass and Bioenergy*. 2015. vol.85.

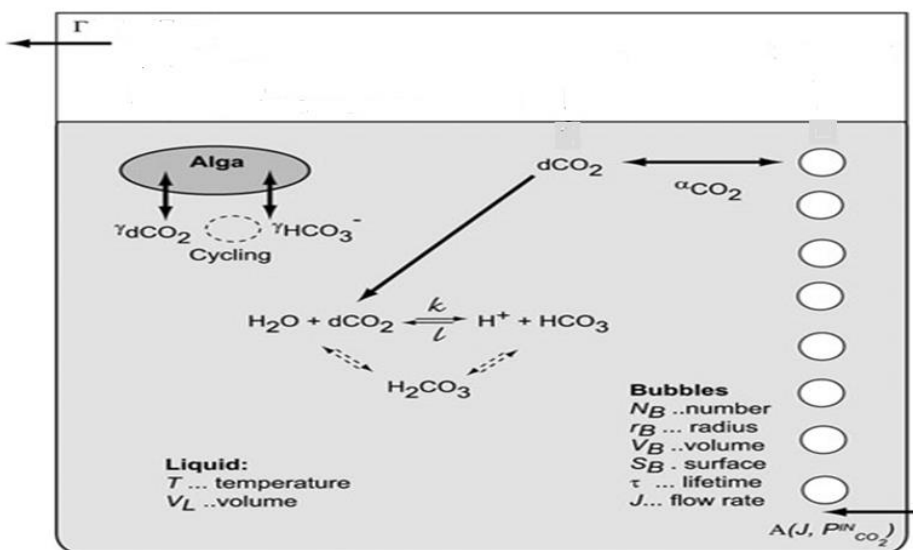
<sup>88</sup> Ibid., p. 20.

#### 4. ECUACIONES DE LA TRANSFERENCIA DE MASA EN UN FBR PANEL PLANO

Inicialmente se debe aclarar que las ecuaciones de transferencia de masa que se presentan en este proyecto se encuentran planteadas únicamente de manera teórica, debido a la falta de presupuesto para los equipos necesarios en la medición de las variables que afectan cada parámetro y la consideración del alcance propuesto para este objetivo (Anteproyecto-delimitación).

Bajo los anteriores resultados y como revisión bibliográfica a lo que ocurre en el FBR panel plano, se presenta una descripción sencilla de la transferencia de masa considerando los fenómenos que pueden ocurrir tanto dentro del cultivo como en el espacio de cabeza. La figura 28 busca ilustrar los parámetros que se explican en esta sección (dentro y fuera del cultivo en el FBR) <sup>89</sup>.

**Figura 28.** Esquema de la transferencia de masa



Fuente: NEDBAL, Ladislav, et al. Experimental Validation of a Nonequilibrium model of CO<sub>2</sub> fluxes between Gas, Liquid Medium, and algae in a Flat- panel photobioreactor, 2012.

Inicialmente, se debe tener en cuenta los supuestos que se encuentran planteados en la sección 1.13.1, como el balance de masa presentado en la sección 1.13.2.

<sup>89</sup> NEDBAL, Ladislav, et al. Op. cit., 1321.

Adicional a esto se formularon cuatro supuestos teóricos para el planteamiento de las ecuaciones tales como<sup>90</sup>:

- La fase líquida y gaseosa están a igual temperatura.
- Todo se encuentra perfectamente mezclado.
- Las burbujas tienen un tamaño uniforme y constante; donde cada una tiene un mismo tiempo de duración dentro del FBR.
- La presión parcial de CO<sub>2</sub> dentro de la burbuja alcanza su valor de saturación.

#### 4.1 INTERFACE GAS-LÍQUIDO

**4.1.1 La masa de CO<sub>2</sub> que ingresa al cultivo.** Con lo anterior y como primera medida, se plantean las ecuaciones bases (ecuación 29 y 30) que relacionan la interfaz gas-líquido en términos de flujo por unidad de volumen<sup>91</sup>. Debido a que el CO<sub>2</sub> es poco soluble en el líquido, la resistencia a la transferencia se encuentra en la película de la fase líquida y no en la película de la fase gaseosa; por esta razón el coeficiente de transferencia está planteado en términos de  $k_L$ <sup>92</sup>.

$$\dot{N}_a \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ s}} \right] = k_L ([CO_2^*] - [dCO_2]) \quad (29)$$

Expresando el ( $[CO_2^*]$ ) en el equilibrio con la ley de Henry, la ecuación 29 queda expresada de la siguiente manera:

$$\dot{N}_a \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ s}} \right] = k_L \left( \frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{H} - [dCO_2] \right) \quad (30)$$

Como el parámetro  $\frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{dt}$  ingresa al cultivo e interactúa con este en una interfaz gas-líquido se utilizarán las dos ecuaciones anteriormente mencionadas para expresarlo.

La transferencia de masa entre la interfaz gas-líquido DENTRO DEL CULTIVO se expresa como:

$$N_A^* \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m} \text{ s}} \right] = k_L S_B \left( \frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{H} - [dCO_2] \right) \quad (31)$$

Donde  $S_B$  hace referencia a la superficie de la burbuja.

El cambio de la presión parcial de la burbuja se puede expresar con la ley de los gases ideales mediante la siguiente ecuación:

<sup>90</sup> Ibid., p. 1320.

<sup>91</sup> CLEMENT-LAROSIÈRE, Barbara. Op. cit., p. 7-10.

<sup>92</sup> DORAN, Pauline M. Op. cit., p. 472.

$$\frac{\Delta \text{Número de moles de CO}_2 \text{ perdidos por la burbuja}}{\Delta \text{ tiempo}} = -\frac{V_B}{RT} \frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{dt} \quad (32)$$

Igualando la ecuación 31 y 32 es posible expresar  $\frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{dt}$ :

$$\frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{dt} = -k_L \frac{S_B}{V_B} RT \left( \frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{H} - [dCO_2] \right) \quad (33)$$

Donde  $\frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{dt}$  se define como la presión parcial instantánea de CO<sub>2</sub> en una burbuja en el tiempo (t).

Al denominar como área interfacial (*a*) la relación  $\frac{S_B}{V_B}$  se obtiene la ecuación (34), la cual permite apreciar que la velocidad de transferencia de masa aumenta al incrementar el área interfacial<sup>93</sup>:

$$\frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{dt} = -k_L a RT \left( \frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{H} - [dCO_2] \right) \quad (34)$$

Como se aprecia, se tiene dos parámetros experimentales (coeficiente de transferencia de masa y área interfacial) que son difíciles de medir por si solos, por lo que estos parámetros se combinan en uno dando lo que se conoce como el coeficiente volumétrico de transferencia de masa ( $k_L a$ )<sup>94</sup>.

Se debe aclarar que el área interfacial (que hace parte del producto  $k_L a$ ) se relaciona con el atrapamiento del gas ( $\epsilon$ ) y el diámetro de la burbuja ( $d_B$ ), como se puede apreciar en la ecuación (35). Este parámetro permite explicar los resultados obtenidos en este proyecto, utilizando como variable los diámetros de aspersor en el difusor<sup>95</sup>.

$$a [m^{-1}] = \frac{6\epsilon}{d_B} \quad (35)$$

Ahora, es posible hallar  $P_{CO_2}$  de forma analítica, al suponerse que el volumen del cultivo es mucho mayor que el volumen de la burbuja y al utilizar como condición inicial  $P_{CO_2(t)}^{burbuja} = P_{CO_2}^{IN}$ , lo que permite expresar  $P_{CO_2}$  como:

$$P_{CO_2}^{burbuja} = P_{CO_2}^{IN} \left[ \exp \left( - \left( \frac{k_L a RT}{H} \right) t \right) + H [dCO_2] \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{k_L a RT}{H} \right) t \right) \right] \right] \quad (36)$$

<sup>93</sup> NEDBAL, Ladislav, et al. Op. cit., p. 1321.

<sup>94</sup> DUTTA, Rajiv. Op. cit., p. 13.

<sup>95</sup> KADIC, Enes y HEINDEL, Theodore J. Op. cit., p. 20.

## 4.2 INTERFACE LÍQUIDO-SÓLIDO

Como segunda medida, se plantea la ecuación que relaciona la interfaz liquido-sólido en el cultivo. Debido a que la interface líquida queda expresada nuevamente en términos de  $[dCO_2]$ , y en tanto que esta depende de los parámetros  $\alpha_{CO_2}$  y  $k[dCO_2]$  los cuales afectan la concentración de  $CO_2$  que dispone la microalga; a continuación, se explica cada uno:

**4.2.1 La masa de  $CO_2$  acumulada en el cultivo.** El parámetro  $\alpha_{CO_2}$  se explica como la velocidad de transferencia de masa de  $CO_2$  de las burbujas al medio líquido dentro del cultivo, así que es necesario expresarlo en términos del número de burbujas ( $N_B$ ) que ingresan al FBR como se presenta a continuación <sup>96</sup>:

$$\alpha_{CO_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] = N_B \frac{\Delta n CO_2 \text{ que se transfieren al medio líquido}}{\tau} \quad (37)$$

Siendo  $\tau$  la duración de la burbuja dentro del cultivo.

Utilizando la ley de los gases ideales para dejarlo en términos de presión se obtiene que:

$$\alpha_{CO_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] = N_B \frac{V_B}{RT} \frac{P_{CO_2}^{IN} - P_{CO_2}^X}{\tau} \quad (38)$$

Siendo  $P_{CO_2}^X = P_{CO_2}^{burbuja}$   $t=$  dentro del cultivo

Simplificando se obtiene:

$$\alpha_{CO_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] = \frac{J}{RT} (P_{CO_2}^{IN} - P_{CO_2}^X) \quad (39)$$

Donde  $J$  es flujo de gas a través del FBR. Debido a que este parámetro modifica la concentración de dióxido de carbono disuelto en la fase líquida es necesario dividir este término sobre  $V_L$ , obteniendo finalmente:

$$\alpha_{CO_2} \left[ \frac{mol}{m^3 s} \right] = \frac{J}{RTV_L} (P_{CO_2}^{IN} - P_{CO_2}^X) \quad (40)$$

El parámetro  $k[dCO_2]$  se define como la velocidad con que el  $CO_2$  reacciona dentro del cultivo, este dependerá de la cinética de las reacciones en el cultivo.

Debido a que la absorción de  $CO_2$  por parte de la microalga requiere el transporte del  $CO_2$  disuelto hasta los límites de esta, la resistencia entre la interfase líquido-sólido se expresa de la siguiente manera<sup>97</sup>:

<sup>96</sup> NEDBAL, Ladislav, et al. Op. cit., p. 1322.

<sup>97</sup> DORAN, Pauline M. Op. cit., p. 194.

$$\dot{N}_A \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ s}} \right] = k_L a ([dCO_2] - C_{CO_2i}) \quad (41)$$

Donde  $C_{CO_2i}$  se refiere a la concentración de  $CO_2$  en el límite de fase,  $[dCO_2]$  se refiere a la concentración de  $CO_2$  disuelto en fase líquida,  $a$  se refiere al área interfacial líquido-sólido por unidad de volumen, la cual se puede determinar a partir de la forma y tamaño del sólido (microalga), y  $k_L$  se refiere al coeficiente de transferencia de masa en fase líquida.

Cabe resaltar que  $C_{CO_2i}$  se puede calcular solamente si se dispone de la velocidad de reacción en la superficie sólida, pero esto resulta casi imposible debido a que su determinación experimental no es sencilla. Por esta razón, si se desea conocer este parámetro es más fácil relacionarlo con parámetros de consumo de  $CO_2$  por la microalga<sup>98</sup>.

Por otro lado,  $[dCO_2]$  es función de los dos parámetros desarrollados anteriormente como:  $\alpha_{CO_2}$  y  $k[dCO_2]$ .

### 4.3 MASA DE $CO_2$ CONSUMIDA EN EL CULTIVO

Para explicar el consumo de  $CO_2$  en el FBR, se utiliza el parámetro  $\mu$  que se define como la velocidad específica de crecimiento, esta puede expresarse mediante la ecuación de Monod de la siguiente manera<sup>99</sup>:

$$\mu [s^{-1}] = \frac{\mu_{max} [dCO_2]}{K_s + [dCO_2]} \quad (42)$$

### 4.4 MASA DE $CO_2$ QUE SALE DEL CULTIVO

Aunque lo que sale del FBR no hace parte de la transferencia de masa que afecta el consumo de  $CO_2$  en el cultivo, se menciona el siguiente parámetro  $\Gamma$  (indicado en el balance de masa), este hace referencia a lo que sale del ducto desgasificador, por lo que se expresa en términos de  $P_{CO_2}^{out}$  y queda de la siguiente manera<sup>100</sup>:

$$\Gamma \left[ \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] = -\frac{J}{RT} P_{CO_2}^{out} \quad (43)$$

<sup>98</sup> Ibid., p. 204.

<sup>99</sup> FOGLER, H. Scott. Op. cit., p. 396.

<sup>100</sup> NEDBAL, Ladislav. Op. cit., p. 1322.

## 5. CONCLUSIONES

- Los fotobiorreactores panel plano contruidos en láminas de PMMA de 0,008 m presentaron buena resistencia térmica y mecánica, de igual manera, el área de las placas como el volumen del equipo aseguro una relación superficie/volumen que cumple con rangos establecidos por otros investigadores para garantizar el proceso fotosintético; a su vez, la selección de PVC como material para la elaboración de los difusores, aseguró una fácil manipulación y bajo costo al momento de su implementación al FBR.
- Los diámetros utilizados en la parte pre-experimental corresponden a 1,2 y 4 mm. Mediante el análisis ANOVA y la prueba t se comprueba que, aunque no existe diferencia significativa en las tasas de crecimiento celular entre estos ( $0.217 \text{ días}^{-1}$ ;  $0.198 \text{ días}^{-1}$ ;  $0.174 \text{ días}^{-1}$  respectivamente) a causa del caudal empleado de 0.17 vvm, la pareja conformada por los diámetros 1 y 2 mm presenta cambios significativos, por con siguiente se realiza la parte experimental con estos dos diámetros.
- Durante la parte experimental, empleando una mezcla de 9%  $\text{CO}_2$  v/v y utilizando los diámetros de 1 y 2 mm se obtienen como tasas de crecimiento  $0.37 \text{ días}^{-1}$  y  $0.35 \text{ días}^{-1}$  respectivamente, lo que evidencia que a menor diámetro de aspersor aumenta la tasa de crecimiento y que a pesar de utilizar un bajo caudal (0.17 vvm) y una alta presión parcial de  $\text{CO}_2$  (0.225 KPa) con respecto a investigaciones anteriores, se logra evitar reducir el pH y de esta manera disminuir la actividad fotosintética e inhibir el crecimiento.
- El modelo de la película en adición a los supuestos expresados para el sistema, confirman el hecho de que el tamaño de la burbuja generado por el aspersor afecta directamente el crecimiento del cultivo; en tanto que una burbuja pequeña, con mayor área interfacial (asciende con menor velocidad por el medio de cultivo y por lo tanto tiene un mayor tiempo de residencia en el FBR), conduce a una mayor transferencia de masa entre las fases gas-liquido.



## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear un caudal de aire de 4.44 vvm para un fotobiorreactor panel plano con el mismo volumen efectivo utilizado en esta investigación para asegurar una buena fluidización y un crecimiento microalgal.
- Se debe tener en cuenta para una mezcla de CO<sub>2</sub> que el caudal no afecte el rango de presión parcial mínimo de 0,1-0,2 KPa para el crecimiento de la microalga.
- Evaluar el diámetro de aspersion en un FBR panel plano a escala piloto, utilizando emisiones industriales.
- Evaluar la hidrodinámica de la microalga *Chlorella Vulgaris* en el FBR panel plano en consecuencia a los diferentes diámetros de aspersion empleados en esta investigación.
- Modelar el proceso de CO<sub>2</sub> y hallar el k<sub>La</sub> en el FBR con las ecuaciones ya planteadas.

## BIBLIOGRAFÍA

ALKHALIDI, Ammar A.T y AMANO, R.S. Factors Affecting Fine Bubble Creation and Bubble Size for Activated Sludge. En: Water and Environment Journal. March, 2015. vol. 29, no. 2, p. 110.

ÁLVAREZ COBELAS, Miguel y GALLARDO, Tomás. Una Revisión Sobre La Biotecnología de Las Algas. Madrid: Universidad Complutense. Facultad de Biología. Departamento de Biología Vegetal, 1989, p. 22–30.

Anales Academia Nacional de Ciencias. En: Anales. p. 149.

ÁNGEL CRUZ, María Camila y PIMIENTA BLANCO, Wendy Yulissa. Evaluación de La Incidencia Del Nitrógeno En El Medio de Cultivo BOLD BASAL Para La Producción de Biomasa de La Microalga *Chorella Vulgaris* En Un Fotobiorreactor, Para La Obtención de Ácidos Grasos. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías, 2012. 63 p.

ARREDONDO, Bertha Olivia y DOMENICO, Voltolina. Métodos Y Herramientas Analíticas En La Evaluación de La Biomasa Microalgal, 2007, p. 25-27.

ASTROS, Iván Rodrigo, et al. Evaluación Del Cambio En La Concentración de Dióxido de Carbono En Una Corriente de Gas Mediante El Uso de *Chlorella Vulgaris*, 2014, p. 117.

BASTIDAS, Oscar. Conteo Celular Con Hematocitómetro. En: Celeromics. 2011. p. 4.

BHATTACHARJEE, Meenakshi. Pharmaceutically Valuable Bioactive Compounds of Algae. En: Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research. 2016, vol. 9, no. 6.

BOROWITZKA, Michael A y MOHEIMANI, Navid Reza. Algal for biofuels and energy. En: Developments in Applied Phycology. 2013. vol. 5, p. 136.

CALVACHE, Jaime Arturo. Simulación de Biorreactores Airlift, 2002. p. 24.

CLEMENT-LAROSIÈRE, Barbara. Etude de La Croissance de *Chlorella Vulgaris* En Photobioréacteur Batch et Continu , En Présence de Concentrations Élevées de CO<sub>2</sub>, (Ecole Centrale Paris, 2012), p. 9.

CZERMAK, Peter, et al. Cell and tissue reaction engineering. Principle and practice. 120 p. ISBN: 978-3-540-68175-5.

DENG, Zhonghuo, et al. Gas Holdup, Bubble Behavior and Mass Transfer in a 5 M High Internal-Loop Airlift Reactor with Non-Newtonian FLui. En: Chemical engineering journal. Beijing Key Laboratory of Green Reaction Engineering and Technology. June, 2010. vol. 160, no. 2, p. 734.

DOBLE, Mukesh, et al. Biotransformations and Bioprocess. New York: MARCEL DEK, 2004. 262 p. ISBN: 0-8247-4775-5.

DORAN, Pauline M., Bioprocess Engineering Principles. En: Elsevier Science & Technology Books. 2 ed. vol. 9, no. 1, 1996. 192 p. ISBN: 0122208552.

DOUCHA, Jiri et. al. Utilization of Flue Gas for Cultivation of Microalgae (Chlorella Sp.) in an Outdoor Open Thin-Layer Photobioreactor. En: Journal of Applied Phycology. June, 2005. vol. 17, p.406.

DOUCHA, Jirí y LÍVANSJÝ, Karel. Influence of Solar Irradiance, Culture Temperature and CO<sub>2</sub> Supply on Daily Course of O<sub>2</sub> Evolution by Chlorella Mass Cultures in Outdoor Open Thin-Layer Culture Units. 1998. p. 143.

DUTTA, Rajiv. Fundamentals of Biochemical Engineering. vol. 2, no. 1, 2008. 224 p.

EIBL, Regine; EIBL, Dieter; PÖTNER, Ralf; CATAPANO, Gerardo; CZERMAK, Peter. CELL AND TISSUE REACTION ENGINEERING.

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.  
educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22\_ecuaci  
n\_de\_continuidad.html <[http://e-  
educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22\\_ecuacin  
\\_de\\_continuidad.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22_ecuacin_de_continuidad.html)>

FARMER, R y ARNDT, R.E.A. Development of an Efficient Aeration System for Aquaculture. St. Paul, Minnesota: University of minnesota. Minnesota department of agriculture, 1995. 13-17 p.

FOGLER, H. Scott. Elementos de Ingeniería de Las Reacciones Químicas. 3 ed. 2001, 396 p.

GARCÍA GAMIZ, Mari luz y MOLINERO LEYVA, Ma Jesús. Formulación Magistral. 1st ed. 2014, 126 p. ISBN 9788497324533.

GOMEZ FUENTES, Ana Milena y JAIMES VILLARREAL, Nestor Andres. Estudio de La Incidencia Del Suministro de CO<sub>2</sub> En El Crecimiento de Las Microalgas En Un Fotobiorreactor a Escala Laboratorio. Bucaramanga: Universidad industrial de santander. Facultad de Ingenierías fisico-químicas. Escuela de ingeniería química, 2010. 10 p.

GÓMEZ LUNA, Liliana Maria. Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. En: Laboratorio de Ecotoxicología Marina, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente. Marzo, 2015, p. 6.

GRUPO COORPORATIVO CAJAMAR, ¿Qué Son Las Microalgas? Interés Y Uso, Cajamar, 2015, p. 1–11.

HERNANDEZ HERNANDEZ, Gregorio Alejandro, Evaluación de Las Incidencias de Salinidad Y pH Sobre La Biomasa, Productividad Y Acumulación de Lípidos En Cultivos de *Chlorella Vulgaris* En Un Fotobiorreactor de Placa Plana. Trabajo de grado en Ingeniería Química. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. 2014. 45 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Documentación. Presentación de tesis trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, Bogotá: en instituto. 2008.

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma, y estructura. NTC 5613. Bogotá: el Instituto. 2008.

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

J, Silvia y LOPEZ, Adrian. La Colección de Microalgas Dulceacuicolas Y Marinas de La Península de Yucatan Merida, Yucatan, Mexico: 2005, p. 13.

JACOB-LOPEZ, Eduardo y TEIXEIRA FRANCO, Telma. Microalgae-Based Systems for Carbon Dioxide Sequestration and Industrial Biorefineries. September 2010, p. 139.

KADIC, Enes y HEINDEL, Theodore J. En: An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer. Hoboken, New Jersey: Jhon Willey, 2014. p. 12. ISBN: 978-1-118-10401-9

KLINTHONG, Worasaung, et al. En: A Review: Microalgae and Their Applications in CO2 Capture and Renewable. London: ISTE and Hoboken: Jhon Willey, 2015. p. 712–742.

KOMMAREDDY, Anil R., et al. The Impact of Air Flow Rate on Photobioreactor Sparger/diffuser Bubble Size(s) and Distribution. En: ASABE. July , 2013, p .2.

LIMA NETO, Iran Eduardo. Tamanho de Bolhas de Ar Formadas Por Difusores Não Porosos Na Água. En: Eng Sanit Ambient. Abr-Jun, 2015. vol 20, no. 2, p. 175–80.

LYCÉE, J. Jaurés. Dynamique Des Fluides Équations de Continuité et Équations de Bernoulli, p. 1–4.

MOHSENPOUR, Seyedeh Fatemeh y WILLOUGHBY, Nik. Luminescent Photobioreactor Design for Improved Algal Growth and Photosynthetic Pigment Production through Spectral Conversion of Light. En: Bioresource technology. 2013. vol. 142. p. 150.

MOHSENPOUR, Seyedeh Fatemeh, et al. Effect of CO<sub>2</sub> Aeration on Cultivation of Microalgae in Luminescent Photobioreactors. En: Biomass and Bioenergy. 2015. vol.85.

MOHSENPOUR, Seyedeh Fatemeh, et al. Effect of CO<sub>2</sub> Aeration on Cultivation of Microalgae in Luminescent Photobioreactors. En: Biomass and Bioenergy. 2015. vol.85. p. 172

MOOER Product. Bubble Diffuser Differences. <<http://www.mooersproductsinc.com/bubble-diffuser-aeration-differences/>>.

MORTUZA, S.M, et al. Computational and Experimental Investigation of Bubble Circulation Patterns within a Column Photobioreactor. En: ASME. January, 2011. p. 6.

NAVISA, J, et al. Effect of Bubble Size on Aeration Process. En: Asian Journal of Scientific. March, 2014. vol. 7, no. 4. p. 485.

NEDBAL, Ladislav, et al. Experimental Validation of a Nonequilibrium Model of CO<sub>2</sub> Fluxes between Gas, Liquid Medium, and Algae in a Flat-Panel Photobioreactor. En: Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. September, 2012, vol. 37, no. 12,. p. 1321.

NEDBAL, Ladislav; CERVENÝ, Jan; KEREN, Nir; KAPLAN, Aaron. Experimental Validation of a Nonequilibrium Model of CO<sub>2</sub> Fluxes between Gas, Liquid Medium, and Algae in a Flat-Panel Photobioreactor. En: Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. vol. 37, no. 12, p. 1319-1326.

OLIVO, Erell. Conception et Etude D'un Photobioreacteur Pour La Production En Continu de Microalgues En Ecloseries Aquacoles. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2007. 34 p.

ORTIZ MORENO, Martha L. et al. Evaluación Del Crecimiento de La Microalga Chlorella Sorokiniana En Diferentes Medios de Cultivo En Condiciones Autotróficas Y Mixotróficas. September, 2010, p. 14.

Product, Mooer. Bubble Diffuser Differences.

RAMIREZ MÉRIDA, Luis Guillermo, et al. Fotobiorreactor: Herramienta Para Cultivo de Cianobacterias. En: Ciencia y Tecnología. Julio-diciembre, 2013, p. 16.

RUBIO FERNANDEZ, Diego y HERNÁNDEZ, Gregorio Alejandro. Evaluación de Las Incidencias de Salinidad Y pH Sobre La Biomasa, Productividad Y Acumulación de Lípidos En Cultivos de Chlorella Vulgaris En Un Fotobiorreactor de Placa Plana. 2016, p. 45.

SANTOS, Ana María, et al. Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. En: Anales de Mecánica Y Electricidad, 2014, p. 21.

SEVILLA FERNANDEZ, Jose Maria. Ingenieria de Procesos Aplicada a La Biotecnologia de Microalgas, 2014.

SIERRA, E, et al. Characterization of a Flat Plate Photobioreactor for the Production of Microalgae. En: Chemical Engineering Journal. 2008. vol. 138, no. 1-3, p. 138.

SOO, Suh and CHOULD-GYUN, Lee. Photobioreactor Engineering: Design and Performance, (2003), vol.8. p. 1.

ST-ONGE, Pierre. Optimisation En Temps Réel de La Production de Microalgues En Photobioréacteur Par La Commande Extrémale. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI, 2013. 45 p.

TEBBANI, Sihem, et al. CO2 Biofixation by Microalgae, 2014, p. Intro (IX).

TRAMPER, Johannes y VAN'T RIET, Klaas. Basic biorreactor design. New York: Marcel Dekker, Inc, 1991. 112 p. ISBN 0-8247-8446-4.

ZHANG, Xing. Microalgae Removal of CO2 from Flue Gas Flue Gas. London: IEA Clean Coal Centre, 2015. 36 p.

## **ANEXOS**

**ANEXO A.**  
**ESPECIFICACIÓN DEL FERTILIZANTE FOLIAGRO**

**Tabla 19.** Composiciones del fertilizante Foliagro.

<b>FERTILIZANTE COMPLEJO FOLIAGRO</b>	
<b>COMPOSICIÓN</b>	<b>CANTIDAD (g / L)</b>
Nitrógeno total (N)	100
Nitrógeno Amoniacal (N)	72
Nitrógeno Nítrico (N)	3,20
Nitrógeno Ureico (N)	24,80
Fósforo Asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	300
Potasio Soluble en Agua (K <sub>2</sub> O)	100
Calcio (CaO)*	0,20
Magnesio (MgO)*	0,20
Azufre Total (S)	0,80
Boro (B)	0,20
Cobre (Cu)*	0,20
Hierro (Fe)*	0,40
Manganeso (Mn)*	0,40
Molibdeno (Mo)*	0,03
Zinc (Zn)*	0,50
PH en solución al 10%	6,5
Densidad a 20°C	1,3 (g / mL)
<b>(*) Quelatados con EDTA y ácido acrílico</b>	



**ANEXO B.**  
**CARACTERÍSTICAS DE LOS MANÓMETROS**



<b>Marca</b>	Ritherm® 2 ½"
<b>Características de los sensores</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Rango</b>	0-400 mbar (0-160 in H <sub>2</sub> O)
<b>Alcance</b>	400 mbar (160 in H <sub>2</sub> O)
<b>Exactitud</b>	±1
<b>Conexiones</b>	Conexión vertical de ¼"
<b>Otras</b>	Caja en acero conexión en bronce

ANEXO C.

CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE LA MEZCLA 9% CO<sub>2</sub> Y 91% AIRE



Nº. 21265

CERTIFICADO DE ANALISIS  
GASES ESPECIALES

CLIENTE: HEDY LILIANA MORENO SABOYA PRODUCTO: MEZCLA ESPECIAL  
FECHA: MARZO 8 DE 2017 DISTRITO: BOGOTA

ESPECIFICACION

DIOXIDO DE CARBONO	9%
AIRE	BALANCE
PRESION	1500 PSI
VALVULA	CSA 590
TIPO DE GAS	NO INFLAMABLE/OXIDANTE
TIPO DE MEZCLA	ESTANDAR CERTIFICADO

SE CERTIFICA QUE EL CILINDRO No. 8057 PRESENTA EL SIGUIENTE ANALISIS

DIOXIDO DE CARBONO	9,18%
AIRE	BALANCE

TRAZABLE AL CILINDRO PATRON No. 52162817  
METODO ANALITICO: CROMATOGRAFIA DE GASES  
TEMPERATURA RECOMENDADA DE ALMACENAMIENTO Y USO: 0°C A +45°C  
METODO DE PREPARACION: GRAVIMETRICO  
INCERTIDUMBRE ANALITICA RELATIVA: +/- 2%  
PRESION MINIMA DE USO: 3 BAR / 43.5 PSI  
FECHA DE LLENADO: 28-02-2017  
FECHA DE ANALISIS: 28-02-2017  
FECHA DE EXPIRACION: 27-02-2020

SI DESEA MAS INFORMACION SOBRE ESTE PRODUCTO, POR FAVOR LLAMENOS GRATIS A CRYLINEA AL 01 8000-514-500 O AL FAX 01800-514-003

LUGAR DE PRODUCCION: SIBATE, DISTRITO DE BOGOTA, C.R. - PLANTA GASES ESPECIALES DE SIBATE


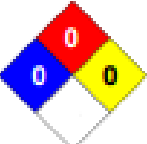
J. J. V.  
CONTROLES DE CALIDAD  
GASES ESPECIALES

04/01/18 14:00:00

**ANEXO D.**  
**FICHA TÉCNICA DE LA MEZCLA**



**Ficha Técnica**

Sustancia :	Clase:
<b>MEZCLA</b> <b>2-10% DIOXIDO</b> <b>DE CARBONO</b> <b>AIRE BALANCE</b>	 
<b>U.N 1956</b>	

**CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO**

PUREZA DE LOS COMPONENTES	MIN. 99.9%
TOLERANCIA DE PREPARACION DE MEZCLA	+/-10% RELATIVO
PRECISION ANALITICA:	+/- 2 % RELATIVO
METODO DE CERTIFICACION:	CROMATOGRAFIA DE GASES
ESTADO	GAS COMPRIMIDO
TIPO DE EMPAQUE	CILINDRO ACERO CARBON
CAPACIDAD DEL CILINDRO	44 L DE AGUA
VALVULA	NORMA CGA 580
CONTENIDO ESTANDAR:	8 M3

**PROPIEDADES TERMOFÍSICAS**

PESO MOLECULAR:	29.08
VOLUMEN ESPECÍFICO:	13.4367 CF/LB
CAPACIDAD CALORIFICA	7.83 BTU/LB.MOL*F

**PROPIEDADES PELIGROSIDAD**

LIMITES DE INFLAMABILIDAD:	NO INFLAMABLE – GAS INERTE
PROPIEDAD TOXICOLOGICA	ASFIXIANTE SIMPLE
COMPATIBILIDAD	NO CORROSIVO
TEMPERATURA DE IGNICIÓN	N/A

## ANEXO E.

# HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN OXÍGENO Y NITRÓGENO



### HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

**NOMBRE DEL PRODUCTO: DIOXIDO DE CARBONO EN OXIGENO Y NITROGENO**

#### 1. Producto Químico e Identificación de la Compañía

Cryogas S.A,  
Carrera 58 # 52 – 58 Piso 18  
Edificio Club Unión

NÚMERO DE TELÉFONO: (4) 5 14 50 00  
NÚMERO DE TELÉFONO LAS 24 HORAS, PARA EMERGENCIAS:  
Medellín: 3736950, Resto del País: 01 8000 514 300

NOMBRE DEL PRODUCTO: DIOXIDO DE CARBONO EN OXIGENO Y NITROGENO  
NOMBRE QUÍMICO: Dióxido de Carbono en Oxígeno y Nitrógeno  
NOMBRES COMUNES/SINÓNIMOS: No Disponible  
CLASIFICACIÓN IMO: 2.2  
CLASIFICACIÓN WHMIS: A, C, D2B

PREPARADO POR: Departamento SHEQ  
FECHA DE PREPARACIÓN: 06/01/95  
FECHA DE REVISIÓN: 04/2009

#### 2. Composición, Información sobre los Ingredientes

INGREDIENTE	% VOLUMEN	PEL-OSHA <sup>1</sup>	TLV-ACGIH <sup>2</sup>	LD <sub>50</sub> o LC <sub>50</sub> Ruta/Especie
Dióxido de Carbono FORMULA: CO <sub>2</sub> CAS: 124-38-9 RTECS #: FFS400000	0.0001 a 30.0	5000 ppm TWA	5000 ppm TWA 30,000 ppm STEL	No Disponible
Oxígeno FORMULA: O <sub>2</sub> CAS: 7782-44-7 RTECS #: R52060000	2.5 a 66.0	No Disponible	No Disponible	No Disponible
Nitrógeno FORMULA: N <sub>2</sub> CAS: 7727-37-0 RTECS #: O169700000	6.0 to 87.5	Astribando simple	Astribando simple	No Disponible

<sup>1</sup> Como se indica en 29 CFR 1910, Subparte Z (revisado Julio 1, 1993)

<sup>2</sup> Como se indica en ACGIH 1994-95 Valores límite de umbral para Sustancias Químicas y Agentes Físicos

#### 3. Identificación de Peligros

**RESUMEN DE EMERGENCIAS**

Niveles de Oxígeno bajo 19.5% pueden causar asfixia. Exposición al Dióxido de Carbono puede causar náusea y problemas respiratorios. Altas concentraciones pueden causar vasodilatación que lleva a colapso circulatorio. No inflamable. Altas concentraciones de Oxígeno pueden promover la combustión de materiales inflamables.

MSDS: Dióxido de Carbono en Oxígeno y Nitrógeno  
Revisado: 04/2009

Página 1 de 7

**NOMBRE DEL PRODUCTO: DIOXIDO DE CARBONO EN OXIGENO Y NITROGENO****RUTA DE ENTRADA:**

Contacto con la Piel No	Absorción por la Piel No	Contacto con los Ojos No	Inhalación Si	Ingestión No
----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	------------------	-----------------

**EFFECTOS SOBRE LA SALUD:**

Limites de Exposición Si	Irritante No	Sensibilización No
Teratogeno No	Peligro Reproductivo No	Mutágeno No
Efectos Sinérgicos Ninguno reportado		

Carcinogenicidad: – NTP: No IARC: No OSHA: No

**EFFECTOS EN LOS OJOS:**

Ninguno reportado.

**EFFECTOS SOBRE LA PIEL:**

Ninguno reportado.

**EFFECTOS DE INGESTION:**

Ninguno reportado.

**EFFECTOS DE INHALACION:**

El Nitrógeno es un asfixiante simple. Los efectos de deficiencia de oxígeno resultante de asfixiantes simples pueden incluir: respiración rápida, agudeza mental disminuida, coordinación muscular afectada, fallas de juicio, depresión de todas las sensaciones, inestabilidad emocional y fatiga. A medida que la asfixia progresa, pueden resultar náusea, vómitos, postración, y pérdida de la conciencia, llevando eventualmente a convulsiones, coma, y muerte.

La deficiencia de oxígeno durante el embarazo ha producido anomalías del desarrollo en humanos y animales experimentales.

El dióxido de carbono es el vasodilatador cerebral más poderoso conocido. La inhalación de grandes concentraciones causa insuficiencia circulatoria rápida que conduce a coma y muerte. Como el dióxido de carbono está presente en bajas concentraciones en este producto, tales efectos son improbables. Es probable que ocurra asfixia antes de los efectos de sobreexposición al dióxido de carbono. No se conocen efectos crónicos, dudosos de inhalación repetida a bajas concentraciones (3 a 5 molar %).

**CODIGOS DE PELIGRO NFPA****CODIGOS DE PELIGRO HMIS****SISTEMA DE EVALUACION**

Salud: 1  
Inflamabilidad: 0  
Reactividad: 0

Salud: 1  
Inflamabilidad: 0  
Reactividad: 0

0 = Sin Peligro  
1 = Peligro Leve  
2 = Peligro Moderado  
3 = Peligro Serio  
4 = Peligro Severo

**4. Medidas de Primeros Auxilios****OJOS:**

Ninguno requerido.

MSDS: Dióxido de Carbono en Oxígeno y Nitrógeno  
Revisado: 04/2009

Página 2 de 7

**NOMBRE DEL PRODUCTO: DIOXIDO DE CARBONO EN OXIGENO Y NITROGENO****PIEL:**

Ninguno requerido.

**INGESTION:**

Ninguno requerido.

**INHALACION:**

ATENCIÓN MÉDICA INMEDIATA ES OBLIGATORIA EN TODOS LOS CASOS DE SOBREEXPOSICIÓN. EL PERSONAL DE RESCATE DEBE ESTAR EQUIPADO CON APARATO DE RESPIRACIÓN INDEPENDIENTE. Las personas conscientes deberían ser removidas a un área no contaminada e inhalar aire fresco. La rápida remoción del área contaminada es de la mayor importancia. Las personas inconscientes deberían ser removidas a un área no contaminada, y debe dárseles resucitación boca a boca y oxígeno suplementario. Tratamiento adicional debería ser automático y de apoyo.

**5. Medidas Contra Incendios**

Condiciones de inflamabilidad: No Inflamable		
Punto de inflamación:	Método:	Auto-ignición
Ninguno	No Aplicable	Temperatura: Ninguna
LEL(%):Ninguno	UEL(%):Ninguno	
Productos de combustión peligrosos: Ninguno		
Sensibilidad a shock mecánico: Ninguna		
Sensibilidad a descarga estática: Ninguna		

**PELIGROS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN:**

Producto no inflamable. Altas concentraciones de oxígeno pueden acelerar la combustión de otros materiales.

**6. Medidas por Liberación Accidental**

Evacue todo el personal del área afectada. Use equipo protector apropiado. Si el escape es en el equipo del usuario, asegurarse de purgar la cañería con gas inerte antes de intentar las reparaciones. Si el escape es en el contenedor o en la válvula del contenedor, contactar el número de teléfono de emergencia adecuado listado en la Sección 1 o llamar su locación Cryogas más cercana.

**7. Manejo y Almacenamiento****Clasificación Eléctrica:**

No Peligroso.

Estas mezclas no son corrosivas y se pueden usar con todos los materiales de construcción.

Use sólo en áreas bien ventiladas. Las tapas de protección de válvulas deben permanecer en su lugar a menos que el envase esté asegurado con salida de la válvula con cañería al punto de uso. No arrastrar, deslizar o rodar los cilindros. Usar una carretilla manual para mover los cilindros. Use un regulador de reducción de presión al conectar un cilindro a cañerías o sistemas de baja presión (<3000 psig). No calentar el cilindro de ningún modo para aumentar la descarga del producto del cilindro. Usar una válvula de chequeo o de trampa en la línea de descarga para prevenir retroflujo peligroso hacia el sistema.

MSDS: Dioxido de Carbono en Oxígeno y Nitrógeno  
Revisado: 04/2009

Página 3 de 7

**NOMBRE DEL PRODUCTO: DIOXIDO DE CARBONO EN OXIGENO Y NITROGENO**

Proteja los cilindros del daño físico. Almacénelos en un área fría, seca, bien ventilada, lejos de las áreas con gran tráfico y de las salidas de emergencia. No permita que la temperatura donde se encuentren almacenados los cilindros exceda los 130°F (54°C). Los cilindros deberían almacenarse hacia arriba y asegurados firmemente, para impedir que caigan o sean golpeados. Los cilindros llenos y vacíos deberían ser segregados. Use el sistema de inventario de "primero que entra - primero que sale" para impedir que los cilindros completos sean almacenados por extensos períodos de tiempo.

Para recomendaciones de almacenamiento adicionales, consulte el Pamfeto (CGA) P-1 de la Asociación de Gas Comprimido.

Nunca lleve un cilindro de gas comprimido o un contenedor de un gas en forma de líquido criogénico en un espacio encerrado, como un portamaletas de automóvil, remolque o station wagon. Una filtración puede resultar en un incendio, explosión o en una exposición tóxica.

**8. Controles de Exposición, Protección Personal****LIMITES DE EXPOSICIÓN<sup>1</sup>**

INGREDIENTE	% VOLUMEN	PEL-OSHA <sup>2</sup>	TCU-ACGIH <sup>3</sup>	LD <sub>50</sub> o LC <sub>50</sub> EPA/USDOH
Dióxido de Carbono FORMULA: CO <sub>2</sub> CAS: 124-38-9 RTECS #: FF9400000	0.0001 a 30.0	5000 ppm TWA	5000 ppm TWA 30,000 ppm STEL	No Disponible
Oxígeno FORMULA: O <sub>2</sub> CAS: 7782-44-7 RTECS #: R52000000	2.5 a 66.0	No Disponible	No Disponible	No Disponible
Nitrógeno FORMULA: N <sub>2</sub> CAS: 7727-37-0 RTECS #: CV95700000	0.0 a 87.5	Auficiente simple	Auficiente simple	No Disponible

<sup>1</sup> En forma a regulaciones del estado o provincia individuales, como sea aplicable, con respecto a límites que puedan ser más severos que los aquí indicados.

<sup>2</sup> Como se indica en 29 CFR 1910, Subparte Z (revisado Julio 1, 1993)

<sup>3</sup> Como se indica en ACGIH 1994-1995. Valores límite de umbral para Substancias Químicas y Agentes Físicos.

IDLH (Dióxido de Carbono): 50,000 ppm

**CONTROLES DE INGENIERIA:**

Use expulsión local para mantener el nivel de oxígeno a o sobre 19.5% y el nivel de Dióxido de Carbono bajo el límite de exposición.

**PROTECCION A LOS OJOS/FACIAL:**

Gafas o anteojos de seguridad, como sea apropiado para el trabajo.

**PROTECCION DE LA PIEL:**

Gautes protectores de cualquier material apropiado para el trabajo.

**PROTECCION RESPIRATORIA:**

Linea de aire de presión positiva con máscara facial completa y botella de escape o aparato respiratorio independiente, deberían estar disponibles para uso de emergencia.

**PROTECCION GENERAL / OTRA:**

Zapatos de seguridad.

MSDS: Dióxido de Carbono en Oxígeno y Nitrógeno

Revisado: 04/2009

Página 4 de 7

**NOMBRE DEL PRODUCTO: DIOXIDO DE CARBONO EN OXIGENO Y NITROGENO****9. Propiedades Físicas y Químicas**

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADES</b>
Estado físico (gas, líquido, sólido)	: Gas	
Presión de vapor	: No disponible	
Densidad del vapor a (Aire = 1)	: 1	
Punto de evaporación	: No disponible	
Punto de ebullición	: No disponible	
Punto de congelamiento	: No disponible	
pH	: No disponible	
Peso específico	: No disponible	
Coefficiente de partición de aceite/agua	: No disponible	
Solubilidad (H <sub>2</sub> O)	: Levemente soluble	
Umbral de olor	: No Aplicable	
Olor y apariencia	: Gas incoloro, inodoro.	

**10. Estabilidad y Reactividad****ESTABILIDAD:**

Estable.

**MATERIALES INCOMPATIBLES:**

Ninguno conocido.

**PRODUCTOS PELIGROSOS DE DESCOMPOSICION:**

El Acido Carbónico en presencia de agua o humedad.

**POLIMERIZACION PELIGROSA:**

No ocurre.

**11. Información Toxicológica****REPRODUCTIVA:**

La deficiencia de oxígeno durante el embarazo ha producido anomalías del desarrollo en humanos y animales experimentales.

La exposición de ratas hembras a 60,000 ppm de dióxido de carbono por 24 horas ha producido efectos tóxicos en el embrión y feto de ratas embarazadas. Efectos tóxicos al sistema reproductivo se han observado en otras especies mamíferas en concentraciones similares.

**MUTAGENICO:**

Concentraciones entre 20 a 95% han producido cambios genéticos en sistemas de ensayos de células de mamíferos.

**12. Información Ecológica**

No hay datos.



**NOMBRE DEL PRODUCTO: DIOXIDO DE CARBONO EN OXIGENO Y NITROGENO****13. Consideraciones de Disposición**

No intente disponer de desperdicios residuales o cantidades no usadas. Devuelva en el contenedor de envío, PROPIAMENTE ETIQUETADO, CON CUALQUIER TAPON O TAPA DE SALIDA DE VALVULA ASEGURADOS Y CON LA TAPA DE PROTECCION DE LA VALVULA EN SU LUGAR a Cryogas Grupo Indura para su disposición apropiada.

**14. Información de Transporte \***

PARAMETRO	DOT	TDG
NOMBRE DE EMBARQUE:	Gases comprimidos, n.o.s. (Oxígeno, Nitrógeno) Gases comprimidos, oxidante, n.o.s. (Oxígeno, Dióxido de carbono, Nitrógeno)	Gases comprimidos, n.o.s. (Oxígeno, Nitrógeno) Gases comprimidos, oxidante, n.o.s. (Oxígeno, Dióxido de carbono, Nitrógeno)
CLASE DE PELIGRO:	2.2	2.2 (5.1)
NUMERO de IDENTIFICACION:	UN 1969/UN 3158	UN 1969/UN 3158
ETIQUETA DE EMBARQUE:	GAS NO INFLAMABLE / GAS NO INFLAMABLE, OXIDANTE	GAS NO INFLAMABLE / GAS NO INFLAMABLE, OXIDANTE

\* La información de transporte es dependiente concentración de Oxígeno. A concentraciones sobre 22.5% Oxígeno, este producto se clasifica como Gases comprimidos, oxidante, n.o.s. A concentraciones de Oxígeno menores o iguales a 22.5%, este producto se clasifica como Gases comprimidos, n.o.s.

**15. Información Reguladora**

SARA, TITULO III, NOTIFICACIONES E INFORMACION

SARA, TITULO III - CLASES DE PELIGROS:

Peligro de Salud Agudo  
Peligro de Liberación Súbita de Presión

**16. Otra Información**

Los cilindros de gas comprimido no deberían ser rellenos sin el permiso expreso, por escrito del dueño. El envío de un cilindro de gas comprimido que no haya sido llenado por su dueño o con su consentimiento (escrito) es una violación de las regulaciones de transporte.

**DESMENTIDO DE GARANTIAS EXPRESADAS E IMPLICITAS:**

Aunque se ha tomado un cuidado razonable en la preparación de este documento, no extendemos garantías y no hacemos representaciones con respecto a la exactitud o a la integridad de la información aquí contenida, y no asumimos responsabilidad con respecto a la adecuación de esta información para los propósitos intentados por el usuario, o por las consecuencias de su uso. Cada individuo debería hacer una determinación con respecto a la adecuación de la información para su propósito (s) particular.

## ANEXO F.

### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Y ENSAYO DEL SENSOR K-33 ICB

#### Quality & Calibration Report



131 Business Center Drive, A-3  
Ormond Beach, FL 32174  
TEL: 877.678.4259 | 386.310.4933 M-F 9-6pm EST  
FAX: 866.422.2356  
EMAIL: sales@co2meter.com | www.co2meter.com | www.metroco2.com

### Certificate of Calibration and Testing

Date: 6/22/2011 15:19  
Order Number: 91043  
Customer: IVAN RODRIGO ASTROS FONSECA

Item	Qty	Serial Number	Calibration Gas	Reading	Data-Logging Test
K-33 ICB	1	03-02-84-4D	Nitrogen 100% (± 0.015%)	0 ppm (± 10 ppm)	Pass
0-30% CO2 Dev. Kit			CO2 25% (± 2%)	25% CO2 (± 2%)	Pass

QA Inspector

We are committed to providing a quality product.

This instrument has undergone rigorous testing throughout its manufacture.

This instrument was assembled in USA, and has been factory inspected, Tested & Calibrated in accordance with the conditions and requirements of our registered Quality System, Operating Standards & Sales Agreements.

All calibration gases are traceable to industries standards.

NOTE: This certification is valid for 180 days from calibration date.

## ANEXO G.

### CONCENTRACIONES CELULARES EN EL PRE-EXPERIMENTO

**Tabla 20.** Concentraciones celulares y Ln promedio para 1 mm de diámetro de aspersor.

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Primera réplica</b>	<b>Segunda réplica</b>	<b>Tercera réplica</b>	<b>Ln Promedio</b>
1	1,04E+07	1,13E+07	1,39E+07	16,29
2	1,37E+07	1,56E+07	2,17E+07	16,65
3	1,41E+07	2,13E+07	2,75E+07	16,86
4	1,64E+07	2,21E+07	3,28E+07	16,98
5	1,96E+07	2,56E+07	3,39E+07	17,09
6	2,05E+07	3,13E+07	4,01E+07	17,24
7	2,35E+07	4,79E+07	6,25E+07	17,61
8	4,15E+07	6,57E+07	8,16E+07	17,96
9	5,80E+07	7,38E+07	8,59E+07	18,10
10	6,02E+07	7,71E+07	8,68E+07	18,13
11	6,11E+07	7,79E+07	9,75E+07	18,18
12	6,28E+07	8,25E+07	9,85E+07	18,21
13	7,10E+07	8,74E+07	9,94E+07	18,27
14	7,61E+07	8,97E+07	1,01E+08	18,30
15	8,46E+07	9,56E+07	1,13E+08	18,40

## ANEXO H.

### CONCENTRACIONES CELULARES EN EL PRE-EXPERIMENTO

**Tabla 21.** Concentraciones celulares y Ln promedio para 2 mm de diámetro de aspersor.

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Primera réplica</b>	<b>Segunda réplica</b>	<b>Tercera réplica</b>	<b>Ln promedio</b>
<b>1</b>	9,38E+06	1,02E+07	1,01E+07	16,11
<b>2</b>	9,79E+06	1,31E+07	1,56E+07	16,37
<b>3</b>	1,04E+07	1,38E+07	1,77E+07	16,45
<b>4</b>	1,37E+07	1,72E+07	2,03E+07	16,65
<b>5</b>	1,46E+07	1,98E+07	2,34E+07	16,77
<b>6</b>	1,81E+07	2,62E+07	3,06E+07	17,03
<b>7</b>	2,17E+07	3,26E+07	3,89E+07	17,25
<b>8</b>	3,00E+07	4,53E+07	5,21E+07	17,56
<b>9</b>	3,57E+07	4,92E+07	5,82E+07	17,68
<b>10</b>	4,06E+07	5,21E+07	6,08E+07	17,75
<b>11</b>	4,51E+07	5,25E+07	6,18E+07	17,79
<b>12</b>	5,11E+07	5,60E+07	6,25E+07	17,85
<b>13</b>	5,43E+07	6,20E+07	6,70E+07	17,93
<b>14</b>	5,77E+07	6,34E+07	7,53E+07	18,00
<b>15</b>	5,89E+07	6,75E+07	7,61E+07	18,03

## ANEXO I.

### CONCENTRACIONES CELULARES EN EL PRE-EXPERIMENTO

**Tabla 22.** Concentraciones celulares y Ln promedio para 4 mm de diámetro de aspersor.

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Primera réplica</b>	<b>Segunda réplica</b>	<b>Tercera réplica</b>	<b>Ln promedio</b>
<b>1</b>	7,13E+06	7,13E+06	7,13E+06	15,78
<b>2</b>	7,16E+06	8,93E+06	1,12E+07	16,02
<b>3</b>	9,62E+06	1,04E+07	1,30E+07	16,22
<b>4</b>	1,12E+07	1,20E+07	1,52E+07	16,36
<b>5</b>	1,28E+07	1,45E+07	1,80E+07	16,53
<b>6</b>	1,52E+07	2,02E+07	2,43E+07	16,81
<b>7</b>	1,82E+07	2,34E+07	2,90E+07	16,98
<b>8</b>	1,91E+07	2,50E+07	2,98E+07	17,02
<b>9</b>	2,18E+07	2,66E+07	3,37E+07	17,12
<b>10</b>	2,27E+07	3,02E+07	3,53E+07	17,20
<b>11</b>	2,38E+07	3,24E+07	3,91E+07	17,27
<b>12</b>	2,46E+07	3,62E+07	4,25E+07	17,35
<b>13</b>	2,53E+07	3,74E+07	4,43E+07	17,39
<b>14</b>	2,80E+07	3,86E+07	4,51E+07	17,43
<b>15</b>	2,88E+07	4,04E+07	4,69E+07	17,47

## ANEXO J.

### CONCENTRACIONES CELULARES EN EL EXPERIMENTO

**Tabla 23.** Concentraciones celulares y Ln promedio para 1 mm de diámetro de aspersion con CO<sub>2</sub>.

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Primera réplica</b>	<b>Segunda réplica</b>	<b>Tercera réplica</b>	<b>Ln promedio</b>
<b>1</b>	1,30E+07	2,45E+07	3,65E+07	17,02
<b>2</b>	2,96E+07	4,14E+07	5,84E+07	17,58
<b>3</b>	6,46E+07	7,46E+07	8,95E+07	18,15
<b>4</b>	7,18E+07	8,92E+07	1,10E+08	18,32
<b>5</b>	8,79E+07	1,11E+08	1,30E+08	18,51
<b>6</b>	1,12E+08	1,40E+08	1,61E+08	18,74
<b>7</b>	1,70E+08	1,90E+08	2,11E+08	19,06
<b>8</b>	2,19E+08	2,41E+08	2,60E+08	19,29
<b>9</b>	2,20E+08	2,45E+08	2,70E+08	19,32
<b>10</b>	2,20E+08	2,47E+08	2,69E+08	19,32

## ANEXO K.

### CONCENTRACIONES CELULARES EN EL EXPERIMENTO

**Tabla 24.** Concentraciones celulares y Ln promedio para 2 mm de diámetro de aspersor con CO<sub>2</sub>.

<b>Tiempo (días)</b>	<b>Primera réplica</b>	<b>Segunda réplica</b>	<b>Tercera réplica</b>	<b>Ln promedio</b>
<b>1</b>	1,23E+07	1,30E+07	1,39E+07	16,38
<b>2</b>	1,55E+07	2,19E+07	3,22E+07	16,96
<b>3</b>	3,09E+07	4,38E+07	5,82E+07	17,61
<b>4</b>	4,17E+07	5,12E+07	6,80E+07	17,80
<b>5</b>	5,02E+07	6,50E+07	7,40E+07	17,96
<b>6</b>	7,34E+07	8,06E+07	8,89E+07	18,21
<b>7</b>	8,49E+07	9,30E+07	9,87E+07	18,34
<b>8</b>	9,02E+07	9,65E+07	1,00E+08	18,38
<b>9</b>	8,92E+07	9,48E+07	1,05E+08	18,38
<b>10</b>	1,06E+08	1,14E+08	1,28E+08	18,57

## ANEXO L.

### PH REGISTRADOS CON LOS DIÁMETROS DE ASPERSOR EN EL DIFUSOR


**Tabla 25.** pH registrado en cada réplica, bajo 1 mm de diámetro de aspersor con CO<sub>2</sub>

Tiempo (días)	pH: primera réplica	pH: segunda réplica	pH: tercera réplica
1	6,90	6,90	6,90
2	6,90	6,90	6,90
3	6,80	6,80	6,90
4	6,90	6,60	6,60
5	6,80	6,60	6,80
6	6,90	7,00	6,90
7	6,90	6,90	6,90
8	6,90	6,90	6,80
9	6,80	6,80	6,80
10	6,90	6,60	6,90

**Tabla 26.** pH registrado en cada réplica, bajo 2 mm de diámetro de aspersor con CO<sub>2</sub>

Tiempo (días)	pH: primera réplica	pH: segunda réplica	pH: tercera réplica
1	7,30	6,50	6,50
2	6,80	6,60	6,70
3	6,80	6,60	6,50
4	6,90	6,80	6,60
5	6,40	6,90	6,70
6	6,80	6,80	6,70
7	6,80	6,70	6,60
8	6,40	6,50	6,40
9	6,20	6,80	6,80
10	6,90	6,80	6,70



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


### AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotras, Jennifer Liseth Doncel Nuñez y Heidy Liliana Moreno Saboyá, en calidad de titulares de la obra EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA AGITACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROALGAL EN UN FBR PANEL PLANO A ESCALA LABORATORIO, elaborada en el año 2016, autorizamos al Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

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

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

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

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	

Licencias completas: [http://cc.creativecommons.org/?page\\_id=13](http://cc.creativecommons.org/?page_id=13)

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

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


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

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

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C, a los 1 días del mes de agosto del año 2017.

**LOS AUTORES:**

**Autor 1**

Nombres	Apellidos
Jennifer Liseth	Doncel Nuñez
Documento de identificación No	Firma
CC. 1030605563 Bogotá D.C	

**Autor 2**

Nombres	Apellidos
Heidy Lilliana	Moreno Saboyá
Documento de identificación No	Firma
CC. 1019102644 Bogotá D.C	