

ELABORACION DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE  
BIOFERTIRRIGACIÓN PARTIENDO DE UN FOTOBIORREACTOR TIPO *AIR-LIFT* Y  
UN CULTIVO DE *CHLORELLA SPP.* CON BASE EN EL MÉTODO DE REVISIÓN  
SISTEMÁTICA (*SYSTEMATIC REVIEW*).

PAULA FERNANDA PAEZ BRAVO  
PAULA ANDREA PEREZ GOMEZ

Proyecto integral de grado para optar el título de:  
Ingeniero Químico

Director  
JUAN DANIEL VALDERRAMA RINCON  
Ph.D. Ingeniería Química y Biomolecular

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA  
BOGOTÁ D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. Febrero de 2021

## DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada Garcia Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada Gracia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Maria Claudia Aponte Gonzalez

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Penaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejia Guzman

Decano de la Facultad de Ingeniería

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Programa de Ingeniería de Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

## DEDICATORIA

Este logro va dirigido a mis padres por darme la oportunidad de vivir, por su amor, por su apoyo incondicional, por ayudarme siempre y por todo el esfuerzo diario, sin ustedes nada sería posible. A mis hermanos por sacarme sonrisas, por ser mis confidentes, gracias por escucharme y aconsejarme. Ustedes son el motor de mi vida y todo lo que he logrado es gracias a ustedes, que la vida nos permita continuar juntos muchos años más.

Paula Páez Bravo.

Este gran logro se lo dedico especialmente a mi madre, gracias por haberme brindado la vida, por entregarme el amor más puro, porque cada gran esfuerzo que realizas y hacer de mí una mujer grande, fuerte, decidida y amada. A mi hermano por ser el mejor compañero de vida, por que independientemente de la situación sé que siempre contare con su apoyo incondicional, gracias por ser como un padre para mí. Los amo con todo mi corazón.

Finalmente dedico este trabajo a mi abuela Inés y a mi tío Jesús, quienes fueron personas muy importantes para mí, de ustedes aprendí a ser una persona honesta y agradecida, gracias por enseñarme lo importante que es la familia.

Paula Andrea Pérez Gómez

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero agradecerle a la vida por darme una Familia tan maravillosa, gracias porque en ellos conoci el amor y lo que es un equipo, gracias vida por permitirnos continuar juntos.

Gracias a Sebas por ser mi paz en medio del caos, gracias por tu paciencia, por ayudarme en momentos difíciles y por enseñarme tantas cosas, tu cariño completo mi vida. A mis amigos gracias, no solo por todos los momentos de felicidad que compartimos, sino también por todas las lágrimas, por las charlas infinitas, gracias por abrirme sus corazones, agradezco que en esta etapa conocí personas increíbles que hicieron todo aún mejor.

A mi PP porque a pesar de todos los altibajos que tuvimos para sacar este proyecto la buena actitud siempre prevaleció, juntas disfrutamos cada momento y todo lo que aprendimos, gracias porque logramos crecer como personas y profesionales.

Finalmente, gracias infinitas al ingeniero Juan Valderrama por brindarnos su conocimiento de la manera más paciente y amable, gracias por el apoyo incondicional y por guiarnos en este proceso, su orientación fue esencial para este logro.

Paula Páez Bravo.

Infinitas gracias a mi madre, has sido mi amiga más fiel, la más paciente y sincera. Gracias por tus consejos, por cada palabra de aliento y por consentirme en los días más duros. También le agradezco a mi familia por darme esperanza, ánimo y encomendarme a dios, sé que siempre contare con su compañía.

Por la ayuda que me brindo hasta donde sus alcances lo permitieron, le agradezco a Juangui. Gracias por el apoyo incondicional y los consejos más sensatos para lograr el equilibrio en los momentos difíciles. Por su amor y paciencia en cada etapa de este proyecto.

Mediante estos agradecimientos quiero resaltar a mi compañera Paula Páez, fueron momentos difíciles, estresantes y desafiantes, pero juntas logramos sacar este proyecto adelante. Gracias por cada vino, cada lagrima, cada risa y cada traspaso, lo logramos amiga mía.

Aprovecho este espacio para agradecer a aquellos compañeros, amigos y docentes, que me acompañaron en este proceso y de una u otra manera aportaron de sí mismos para que yo lograra culminar mi carrera como profesional.

Finalmente, mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Juan Valderrama por su colaboración, por habernos dado las pautas y el acompañamiento necesario para lograr culminar este trabajo, gracias por tan excelente orientación.

Paula Andrea Pérez Gómez

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

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
OBJETIVOS	15
1.GENERALIDADES	16
1.1. Microalga <i>Chlorella spp.</i>	16
1.2. Biofertilizantes	17
1.2.1. Microalga como biofertilizante	18
1.3. Fotobiorreactor	18
1.3.1. Fotobiorreactor air-lift	19
1.4. Fertiirrigación	21
1.4.1. Sistema de Riego Localizado	21
1.4.2. Subirrigación	22
1.5. Hidroponía	23
1.5.1. Sustrato inerte	23
1.6. Planta modelo: lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> ).	24
1.7. Biofertiirrigación	24
1.8. Metodología	25
2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL FOTOBIORREACTOR	27
2.1. Fotobiorreactor revisión sistemática	27
2.1.1. Análisis bibliométrico de la literatura publicada en Scopus sobre biorreactores tipo air-lift	30
2.2. Análisis parámetros	36
2.2.1. Temperatura	36
2.2.2. Suministro de luz	37
2.2.3. pH	39
2.2.4. Suministro de gas	41
2.2.5. Medio de Cultivo	43
2.2.6. Variables geométricas	45
2.3. Producción de Biomasa Microalgal	47
2.4. Resumen de resultados parámetros del fotobiorreactor <i>air-lift</i>	48



3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LOS SISTEMAS DE FERTIRRIGACIÓN	49
3.1.Sistemas de fertirrigación revisión sistemática	49
3.2.Análisis y establecimiento del sistema	53
3.2.1.Cultivo de Lactuca sativa (lechuga)	54
3.2.2.Sustrato	55
3.2.3.Tipos de sustratos	58
3.2.4.Suspensión nutritiva (SN)	63
3.2.5.Sistema estructural	72
3.2.6.Sistema de riego	75
3.2.7.Propuesta sistema de riego	79
4.ALTERNATIVA DE UN SISTEMA DE BIOFERTIRRIGACIÓN	80
5.CONCLUSIONES	87
BIBLIOGRAFIA	89

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama fotobiorreactor air-lift	20
Figura 2. Conceptualización de la biofertilización	25
Figura 3. Resumen metodología	26
Figura 4. Esquema Revisión sistemática Fotobiorreactor	28
Figura 5. Gráfico de documentos más citados a nivel global ecuación 1	32
Figura 6. Gráfico de documentos más citados a nivel global ecuación 2	33
Figura 7. Gráfico autores con mayor h-index ecuación 1	35
Figura 8. Gráfico autores con mayor h-index ecuación 2	36
Figura 9. Gráfico de tendencias de temperaturas del medio de cultivo	37
Figura 10. Gráfico circular de los medios de cultivo	44
Figura 11. Esquema del reactor air-lift de recirculación interna	46
Figura 12. Influencia de la ubicación del difusor	47
Figura 13. Esquema Revisión sistemática sistema de fertilización	50
Figura 14. Nube de palabras clave	51
Figura 15. Gráfico circular de Tipos de Sustratos	59
Figura 16. Estructura de cultivo planteado por Djidonou y Leskovar	67
Figura 17. Disponibilidad de nutrientes en relación con el pH	70
Figura 18. Canasta Esquema Revisión sistemática sistema de fertilización netpot	73
Figura 19. Propuesta sistema estructural	74
Figura 20. Gráfico selección de bomba	77
Figura 21. Distribución interna el sistema de riego	78
Figura 22. Propuesta sistema de fertilización	79
Figura 23. Sistema FBR continuo	82
Figura 24. Diagrama de flujo en bloque	83
Figura 25. Propuesta sistema de biofertilización	83

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resumen de resultados FBR	48
Tabla 2. Características sustrato solido	57
Tabla 3. Mezclas de sustratos con una base de cascarilla de arroz.	60
Tabla 4. Mezclas de sustratos	61
Tabla 5. Mezclas de los sustratos cascarilla de arroz y fibra de coco	62
Tabla 6. Resultados de los mejores sustratos	63
Tabla 7. Composición elemental de la microalga chlorella.	65
Tabla 8. Proceso de decisión jerárquica	84
Tabla 9. Criterios utilizados para la toma decisiones	85
Tabla 10. Resultados del proceso de decisión jerárquica	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

CCS: cultivo sin suelo

CE: Conductividad eléctrica

cm: centímetros

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono

ET: evapotranspiración

FBR: fotobiorreactor

ft: pies

g: gramos

h: hora

L: litros

LPM: litros por minuto

m: metros

min: minutos

mm: milímetros

m<sup>2</sup> : metros cuadrados

NFT: Nutrient Film Technique

ppm: Partes por millón

s: segundos

SN: suspensión nutritiva

vvm: volumen de gas por volumen de reactor de minutos.

## RESUMEN

En el presente documento mediante la metodología de revisión sistemática, se plantea el diseño conceptual de un sistema de biofertilización. La propuesta presenta un sistema de producción escalonada (estructura "A") junto con un sistema de subirrigación para el cultivo de lechuga con sustrato sólido, el cual emplea como biofertilizante la biomasa de *Chlorella spp.* producida en un fotobiorreactor tipo *air-lift* de flujo continuo de 20 L.

Con el fin de obtener documentos relevantes para el cumplimiento de los objetivos, la metodología consistió en identificar las bases de datos y plataformas disponibles para definir los espacios búsqueda. Para precisar las ecuaciones de búsqueda se realizaron pruebas piloto usando operadores booleanos, además, se utilizaron los gráficos arrojados por la herramienta *Bibliometrix*; esto con el fin de obtener documentos relevantes para los objetivos.

Para realizar el diseño conceptual del sistema, se dividió el proyecto en tres fases, en primer lugar, se realizó una revisión sistemática con respecto al fotobiorreactor tipo *air-lift*, estableciendo parámetros de operación como temperatura, suministro de luz, pH, suministro de gas, medio de cultivo, variables geométricas y la producción de biomasa microalgal. Posteriormente se lleva a cabo la revisión sistemática para determinar el sistema de fertilización, mediante la bibliografía obtenida se decide optar por un cultivo sin suelo, basado en un sistema de subirrigación con el uso de sustrato sólido. Por último, teniendo en cuenta las revisiones realizadas junto con los análisis y las alternativas seleccionadas, se unifica el sistema de biofertilización presentado.

**Palabras clave:** Fotobiorreactor, *air-lift*, *Chlorella spp.*, microalga, biofertilización, subirrigación, sustrato sólido.

## INTRODUCCION

Las microalgas son una alternativa atractiva para reemplazar los fertilizantes inorgánicos convencionales, en vista de que representa un aporte de nutrientes como un abono agrícola muy completo [1], que aumenta la disponibilidad de nutrientes en el suelo para el desarrollo de cultivos y actúa como promotor de crecimiento de las plantas [2], así como también, contribuyen al biocontrol de plagas agrícolas [3]. Dentro de las diferentes maneras de distribuir los fertilizantes a las plantas, se encuentra el fertirriego; esta técnica consiste en aplicar fertilizantes inorgánicos a los cultivos por vía del agua de riego [4]. Esta práctica provee una oportunidad de maximizar los rendimientos y reducir la contaminación ambiental [5], al incrementar la eficiencia de uso de los fertilizantes y minimizar la aplicación de estos [6] .

A partir de esto la Universidad Antonio Nariño con su Grupo de Investigación en Recursos, Ecología, Desarrollo Sostenible e Ingeniería Ambiental (GRESIA), han desarrollado investigaciones usando biomasa microalgal como fertilizante, para favorecer el crecimiento vegetal y la recuperación de suelos, dicha biomasa ha sido producida en un fotobiorreactor tipo air-lift. A través de estos estudios se logró un avance en la estandarización de una metodología de cultivo continuo de consorcios microalga-bacteria que posteriormente ajustaron los procedimientos para evaluar su eficiencia como fertilizante en plantas obteniendo un aumento del crecimiento

Es por ello que el presente proyecto espera contribuir de forma conceptual a las investigaciones del grupo GRESIA. Basado en la elaboración del diseño conceptual de un sistema de biofertirrigación, mediante la recopilación y síntesis de documentos científicos, se presenta una propuesta de un sistema innovador en el cual se incorporen técnicas de irrigación para la aplicación de la biomasa microalgal como biofertilizante para el beneficio del cultivo propuesto.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Elaborar el diseño conceptual de un sistema de biofertilización partiendo de un fotobiorreactor tipo *air-lift* y un cultivo de *Chlorella spp.*

### OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Establecer los parámetros de operación para el fotobiorreactor con base en el método de revisión sistemática (*Systematic Review*).
2. Realizar el diseño conceptual de los sistemas de fertilización con base en el método de revisión sistemática (*Systematic Review*).
3. Proponer alternativas de un sistema de biofertilización con base en los diseños conceptuales del fotobiorreactor y los sistemas de fertilización.

## 1. GENERALIDADES

Con el fin de realizar una contextualización para el desarrollo de este proyecto, se presentan los siguientes conceptos y términos empleados a lo largo de este documento.

### 1.1. Microalga *Chlorella spp.*

Esta microalga unicelular, esférica y de color verde, hace parte del grupo de algas verdes *Chlorophyta* y a la clase de las *Chlorophyceae*. Vive en ríos, arroyos de agua dulce y suelos inundados. Uno de los usos más habituales de esta microalga se ha aplicado al tratamiento biológico de aguas residuales, demostrando su eficacia en la eliminación de nitrógeno, fósforo, demanda química de oxígeno y metales pesados. *Chlorella* proporciona grandes cantidades de macro y micronutrientes, constituyentes o metabolitos, tales como carbohidratos y proteínas. [8]

Hasta ahora, este tipo de microalgas ha sido la más utilizada como fertilizante biológico, además, es la primera microalga que ha sido cultivada. “El mucílago de clorofitas y cianofitas, presente en la pared celular de esta especie, permite la concentración y movilización de macro y micronutrientes e iones, que luego pueden ponerse a disposición de las plantas y el suelo por exudación, autólisis y descomposición microbiana” [9].

Esta microalga es un microorganismo fotoautótrofo, es decir, depende de su sistema fotosintético para sus necesidades metabólicas. Usan la fuente de luz solar como fuente de energía y el CO<sub>2</sub> como fuente de carbono inorgánica, con el fin de producir componentes importantes celulares de la microalga como: carbohidratos, lípidos, proteínas y almidón. El almidón en este caso, es un compuesto importante debido a que su función principal es almacenar el carbono y la energía [93].

**1.2.3.a. Luminosidad.** Las microalgas son microorganismos autótrofos fotosintéticos, responsables de convertir la energía luminosa en energía metabólica a través de la fotosíntesis. “Los periodos de exposición a la luz pueden ser continuos (mediante luz artificial), discontinuos (periodos de luz alternados con periodos de oscuridad) o el ciclo de luz que se da por el día y la noche” [10].

Debido a la alta intensidad de luz, los cultivos de microalgas al aire libre pueden sufrir fotoinhibición. Un sistema de mezcla eficaz en el reactor permitirá que a todas las células



entre la luz con regularidad, evitando un aumento de la turbidez y una disminución de la intensidad de la luz [11].

**1.2.3.c. pH.** Al igual que la temperatura, el pH debe permanecer en un rango que permita un buen crecimiento del microorganismo. El pH que permite un crecimiento óptimo es de 8, el más indicado para especies dulceacuícolas. Por encima o debajo de éste, se presenta una disminución en la productividad que afecta el crecimiento algal. “El pH puede controlarse con un sistema automatizado de inyección de CO<sub>2</sub>, o incluso, con adición de ácido o base permitiendo, además, suministrar el CO<sub>2</sub> necesario para cultivos de alta productividad” [11]. Un aumento o disminución excesiva del pH reducirá el crecimiento de microalgas debido a la ruptura de muchos procesos celulares. Si el cultivo se mantiene en condiciones ambientales o controlando el ciclo luz-oscuridad, se observará un pH alto durante el período de luz y durante el período de oscuridad se observa un pH bajo, tendiendo a balancear este factor [10].

**1.2.3.b. Temperatura.** Cada especie de microalgas tiene una temperatura óptima para la reproducción de los cultivos, esta se debe mantener para acelerar la tasa de crecimiento. Para el mantenimiento de las cepas es recomendable mantener temperaturas de 18 °C - 22 °C [8]. Las bajas temperaturas en referencia con el intervalo anterior no matan a la microalga sin embargo puede provocar una disminución del crecimiento, de lo contrario cuando las temperaturas son superiores a 35 °C provocarían que la mayoría de las microalgas colapsen [10].

**1.2.3.d. Aireación.** Cuando aumenta la concentración celular del cultivo la aireación aporta CO<sub>2</sub> ayudando a estabilizar el pH [8], “asegurando una distribución homogénea de las células y los nutrientes dentro del cultivo, dejándolos disponibles para su mejor aprovechamiento mejora la distribución de la luz a las células, evitando que se sedimenten y previene una estratificación térmica” [10].

## **1.2. Biofertilizantes**

Los biofertilizantes son productos a base de células vivas o cepas eficientes de microorganismos que aceleran los procesos microbianos [12], pueden ser provenientes de vegetales, bacterias, hongos y microorganismos, los cuales proveen o mejoran la disponibilidad de nutrientes cuando se aplican a los cultivos. Existen distintos tipos de

biofertilizantes como los abonos y el compost, así como aquellos que incluyen inoculantes microbianos y otros derivados de subproductos agrícolas y animales.

La particularidad de los biofertilizantes “radica en contener formulaciones de agentes microbianos (bacterias, hongos, actinomicetos y algas)” [12]. Estos inoculantes tienen una relación funcional y forman un sistema completo con las plantas. Cabe agregar que estos inoculantes biológicos juegan un papel en la promoción del crecimiento, la nutrición y la resistencia a plagas y enfermedades [12].

### **1.2.1. Microalga como biofertilizante**

Las microalgas también se pueden utilizar como fertilizantes biológicos y adaptadores del suelo en la agricultura. En este papel, tienen la capacidad de fijar nitrógeno y controlar la erosión en zonas climáticas [93].

Su uso en aplicaciones de biorremediación ha sido bastante amplio, en forma suspendida o inmovilizada, como cepa pura o en asociación con otros microorganismos no fotosintéticos, “el biofertilizante con base en microalgas se puede considerar una fuente inagotable como insumo en la fertilización de los cultivos siempre y cuando se mantengan las condiciones adecuadas de luminosidad, pH, temperatura, aireación y nutrición” [8].

Los microorganismos conservan el suelo desde el punto de vista de la fertilidad y la biodiversidad, asimismo mantienen el agua libre de materiales contaminantes y metales pesados que están directamente relacionados con fuentes específicas como fertilizantes inorgánicos [8].

Se ha demostrado que el uso de microalgas como aditivo del suelo puede mejorar significativamente la germinación, el potencial de reducción de nitratos, el volumen de las raíces, la formación de clorofila, la acumulación de carotenoides, el alto rendimiento, el peso de las ramas secas y la altura de la planta [93].

### **1.3. Fotobiorreactor**

Inicialmente un biorreactor es el centro de cualquier proceso bioquímico, donde se utiliza un sistema de enzimas, nutrientes y microorganismos para obtener diversos

productos biológicos útiles. Las decisiones tomadas al diseñar cualquier biorreactor pueden tener un impacto significativo en el rendimiento general del proceso [6].

Cuando los biorreactores tienen microorganismos fotosintéticos como cuerpos de trabajo, es decir, toman fuentes de luz natural o artificial para su desarrollo metabólico, como lo realizan las microalgas. Recibiendo el nombre de fotobiorreactores[6].

Por lo tanto, la realización del fotobiorreactor se basa en una variedad de factores, algunos de los cuales se han mencionado anteriormente, pues este dispositivo encierra el proceso de crecimiento de las microalgas, incluida la concentración de biomasa, el suministro de nutrientes, las condiciones nutricionales y esterilidad, la agitación eficaz de todo el sistema, La posible inhibición en condiciones inadecuadas del producto de destino, calor, correcta gestión de la aireación, etc., todo ello con el propósito de crear un entorno propicio para el metabolismo y la actividad de las microalgas [6].

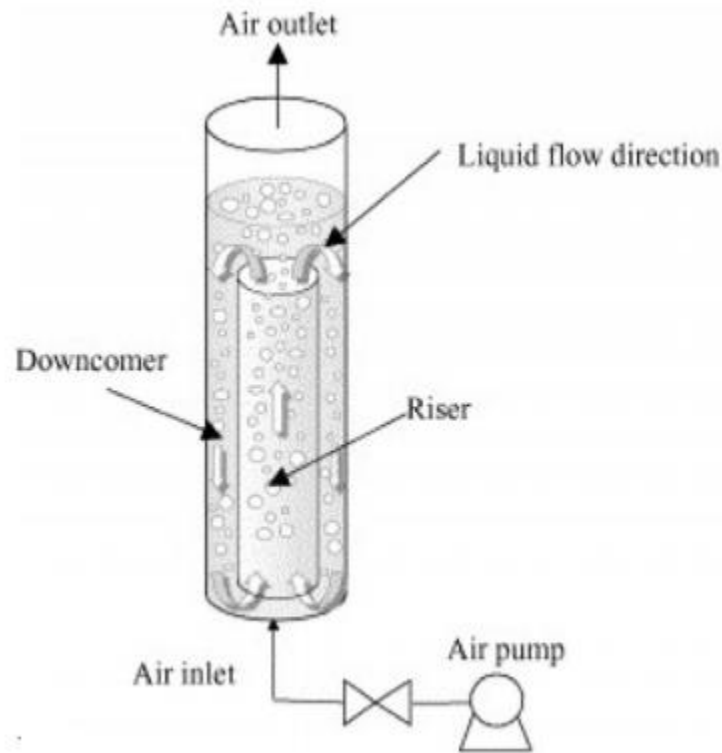
Dicho lo anterior, los fotobiorreactores están diseñados para convertir la energía solar en productos deseables mediante las reacciones biológicas producidas durante el proceso de fotosíntesis. La temperatura es uno de los principales factores en la reacción fotocatalítica y tiene un impacto en el equilibrio químico de la especie. La reacción bioquímica comienza una vez que la microalga captura el fotón y esta pasa al estado activado [91].

### **1.3.1. Fotobiorreactor air-lift**

En esta clase de fotobiorreactores se lleva a cabo la mezcla del medio aprovechando el sistema de aireación. “Mediante la inyección de aire por la parte inferior del dispositivo se logra de forma indirecta la mezcla continua del medio; el componente gaseoso sube a través de un conducto denominado tubo ascendente, provocando una disminución momentánea de la densidad del líquido, lo que conlleva a que el dicho fluido suba junto con el gas” como se visualiza en la figura 1. Por la parte superior del reactor escapa la mayor parte del gas; mientras el líquido vuelve a su densidad promedio habitual y desciende, lo que crea un flujo permanente del medio de cultivo.[6]

**Figura 1.**

*Diagrama fotobiorreactor air-lift*



**Nota.** La figura esquemática permite visualizar el funcionamiento y sus respectivas regiones (*air-riser*, *down-comer*, and *disengagement zone*). Tomado de: Y. Duan y F. Shi, "*Bioreactor design for algal growth as a sustainable energy source*". Elsevier, 2014, pp. 1-34.

Este tipo de fotobiorreactor «mantiene la esterilidad del medio más fácilmente, además de mejorar el transporte de nutrientes a las células y una radiación promedio homogénea en todo el cultivo. Permite un sistema de control fácil, una recolección de luz media, una transferencia de gas alta, un mezclado uniforme junto con una alta relación de superficie-volumen y una mayor concentración de la biomasa, provocando una mayor productividad en el proceso»[7].

## **1.4. Fertiirrigación**

La práctica de aplicar fertilizantes a los cultivos por vía del agua de riego se llama fertiirrigación o fertirriego [6]. Esta técnica consiste en la aplicación de una solución nutritiva a partir de fertilizantes inorgánicos solubles, aplicada a través del agua por los sistemas de riego. “La técnica de fertiirrigación racionaliza la utilización del agua, permitiendo colocar los fertilizantes en solución cerca del sistema radicular de la planta, dando un contacto más rápido y directo de los elementos nutritivos con las raíces y, por ende, se da una mejor absorción y aprovechamiento de los fertilizantes” [13].

Existen dos modelos de la fertiirrigación, el primero es fertiirrigación cuantitativa basada en calcular las necesidades nutritivas en función de distintos parámetros que, una vez calculados los requerimientos, se introducen en el sistema de riego. El segundo es la fertiirrigación proporcional más utilizada en cultivos sin suelo e hidropónicos. Consiste en inyectar una cantidad determinada de fertilizantes por un volumen de agua determinado [14].

### **1.4.1. Sistema de Riego Localizado**

El sistema implica la aplicación de agua en la superficie del suelo o bajo tierra. Por lo tanto, se utilizan tuberías de presión y varios tipos de desagües para mojar solo una parte del suelo cerca del área de la raíz de la planta. Sus principales características son [15]:

- Utilización de pequeños caudales a baja presión.
- Localización del agua en la proximidad de las plantas a través de un número variable de puntos de emisión.
- Al reducir el volumen de suelo mojado, y por tanto su capacidad de almacenamiento, se debe operar con una alta frecuencia de aplicación, a dosis pequeñas.

En función del tipo de emisor utilizado y su locación se distinguen tres tipos de riego localizado:

- Goteo
- Tuberías emisoras
- Microaspersión

**1.4.1.a. Sistema riego por goteo.** En este sistema el agua es aplicada a la superficie del suelo lentamente por medio de emisores llamados goteros [16], en una zona más o menos restringida del volumen radicular. Sus principales características son: usar pequeños caudales de 2 a 8 L/h, a baja presión, por lo que los costos de inversión, mantenimiento y operación son bajos [17]. El riego por goteo se debe operar con alta frecuencia aplicando dosis pequeñas [18], debido a que la localización de los emisores reduce el volumen de suelo mojado y por lo tanto su capacidad de almacenamiento. En este sistema el fertilizante puede ser añadido directamente en la tubería o en el sistema de bombeo [17].

**1.4.1.b. Sistema riego por tuberías emisoras.** El sistema consiste en aplicar agua proveniente de transmisores integrados en ramas, ubicados por debajo de la superficie del suelo [16], o mediante tubos porosos sobre la superficie del suelo creando una banda de suelo humedecido [15]. La tubería forma una cinta humedecida y es utilizada en cultivos con distancias cortas entre plantas. Los emisores comúnmente utilizados son de tuberías gateadoras y tuberías oxidantes [19].

**1.4.1.c. Sistema riego por micro-aspersión.** Es un sistema de riego presurizado en el que el agua se pulveriza sobre la superficie del suelo en forma de lluvia muy fina. Este sistema riega áreas más amplias de 1 a 5 m de diámetro y más uniformes en una zona determinada [18]. Los emisores denominados microaspersores en general permiten caudales de 50 a 200 L/h [16] y trabajan con presiones entre 1 y 2 kg/cm<sup>2</sup> [19].

#### **1.4.2. Subirrigación**

El principio de este método de riego es utilizar el principio de acción capilar y el soporte de cultivo para agregar agua o suspensión nutritiva al fondo de la maceta de cultivo para aumentar la humedad. El líquido permanece en el sustrato durante cierto periodo de tiempo y luego es evacuado por gravedad [20].

**1.4.2.a. Sistema de mesas en flujo y refluo.** Es un sistema de riego muy utilizado que incluye un banco hermético donde se cultivan las plantas, un depósito y una bomba. Vienen en dos diseños: sistemas de banco inundado y sistemas de canal. Para el banco inundado, se bombea una solución nutritiva al banco una o dos veces por semana [21].

**1.4.2.b. Sistema de esteras capilares.** Se usan ampliamente para cultivar plantas de vivero en contenedores. Los tapetes capilares son materiales absorbentes, sobre los cuales se colocan los contenedores. Los tapetes se humedecen continuamente mediante un sistema de descarga de bajo volumen como una cinta de goteo. El agua sube desde el tapete saturado hasta la maceta a través de los orificios de drenaje debido al efecto del ascenso capilar, aunque generalmente se recomienda agregar inicialmente agua a la superficie superior para ayudar a iniciar la acción capilar [21].

**1.4.2.c. Sistema de mechas capilares.** Es un sistema de riego alternativo que suministra agua y nutrientes directamente desde un contenedor al sustrato a través de una mecha absorbente. Además, la mecha mantiene un nivel de humedad constante en el medio de cultivo y la velocidad del movimiento del agua está relacionada con la pérdida de evapotranspiración (ET) [21].

## **1.5. Hidroponía**

La palabra hidroponía deriva del griego *Hydro* (Agua) y *Ponos* (labora, trabajo), por lo que se refiere a “trabajo en el agua” [22]. Las plantas reciben una solución nutritiva que contiene los elementos esenciales para su desarrollo. Esta solución es suministrada por medio del riego y la planta toma los nutrientes directamente del agua. La técnica hidropónica en ninguna de las etapas de crecimiento requiere del suelo como soporte o fuente de nutrimentos del cultivo[22].

En este tipo de cultivo el sustrato es el material que reemplaza el suelo en sus funciones de sostén de la raíz y retención de humedad, se practican 3 tipos de cultivo hidropónico: en medio líquido, sustrato inerte y aeroponía.

### **1.5.1. Sustrato inerte**

El cultivo en sustrato difiere de los sistemas de producción en agua o en solución nutritiva, en que las raíces se desarrollan sobre un medio sólido denominado “sustrato” [23] (fibra de coco, corteza de pino, mezcla de fertilizantes, turba, entre otros), que sirve como soporte para las raíces [24]. Este tipo de sistema no requiere de suelo para cosechar productos agrícolas [25].

### **1.6. Planta modelo: lechuga (*Lactuca sativa*).**

La lechuga es una planta anual y autógama, perteneciente a la familia *Compositae* y cuyo nombre botánico es *Lactuca sativa* L. [26]. La lechuga es considerada la hortaliza de hoja por excelencia, dada su alta calidad culinaria. Se cultiva en todo el mundo bajo diferentes sistemas de cultivo, al aire libre y bajo invernadero, en suelo y también en hidroponía [27].

En cuanto a la rentabilidad, la lechuga en el mercado presenta una gran demanda; además, es una de las hortalizas que ofrece amplias posibilidades para la exportación debido a que la producción nacional de lechugas ha ido incrementándose, lo que podría ahora no solo cubrir el mercado nacional si no también el mercado internacional, Por otra parte su período vegetativo permite obtener varias cosechas al año con producciones promedias de 29 lechugas por m<sup>2</sup> siendo un cultivo que genera ingresos permanentes al agricultor [28].

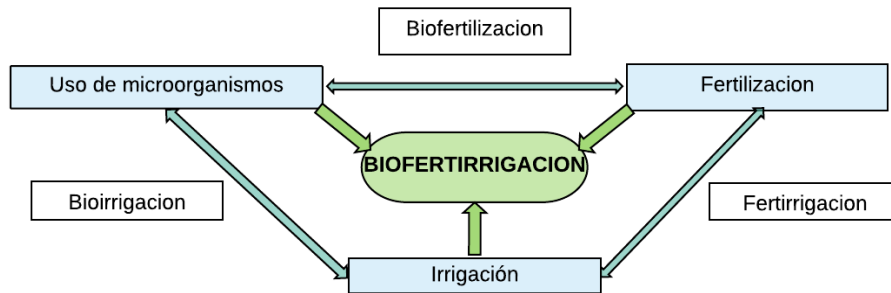
### **1.7. Biofertilización**

La conexión entre el riego, la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas, conceptualiza el fertilizante como la aplicación de nutrientes a través de un sistema de riego. [29]. “El uso de microorganismos promotores del crecimiento aplicados en suspensión a través del sistema de riego, a la semilla al momento de la siembra o al trasplante, pero sin fertilización, se define como bioirrigación; y con la aplicación de los fertilizantes, en forma alterna a los microorganismos a través del riego, se logra la biofertilización” [30], en la figura 2 se presenta la representación del concepto.



**Figura 2.**

*Conceptualización de la biofertilización*



**Nota.** La biofertilización se generó con tres áreas del conocimiento agrícola que están involucradas entre sí: la fertilización, el uso de microorganismos y la irrigación. Tomado de: J. M. Covarrubias Ramírez et al., Biofertilización Con Biolíquidos En Manzano.

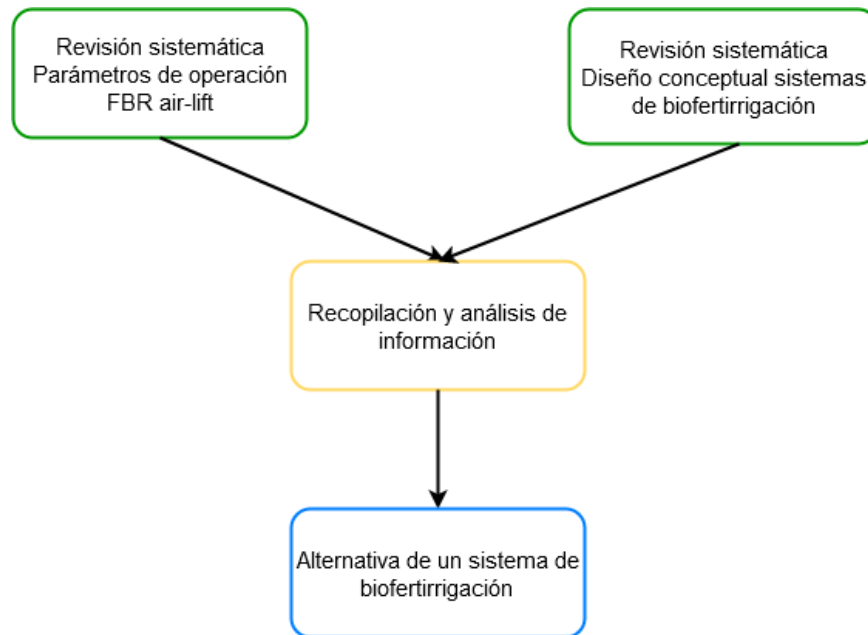
Con respecto a lo anterior, es necesario implementar tecnologías para prevenir la degradación ambiental, como fertilización, biofertilización y agricultura natural, las cuales deben ser evaluadas para comprender su potencial en el cultivo y su capacidad para mejorar la calidad del suelo. La producción de bioirrigación involucra tres aspectos del conocimiento agrícola, la fertilidad del suelo, la microbiología e irrigación del suelo [29].

### 1.8. Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del presente estudio se visualiza en la figura 3. Inicialmente se realizan dos revisiones bibliográficas independientes por medio de la metodología de revisión sistemática, de esta forma se recopila y analiza la información encontrada en las diferentes fuentes de información para de esta manera elaborar el diseño conceptual de un sistema de biofertilización partiendo de un fotobiorreactor tipo *air-lift* y un cultivo de *Chlorella spp.*

### Figura 3.

#### Resumen metodología



**Nota.** En el diagrama de bloques se presenta el resumen de la metodología empleada para el desarrollo del estudio.

## 2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL FOTOBIORREACTOR

Para el presente capítulo, la metodología que se desarrolla es teórica y está basada en la recopilación de literatura científica en la que se presenta información relacionada con el tema de investigación para su posterior análisis; tiene como objetivo establecer los parámetros de operación de un fotobiorreactor *air-lift*.

### 2.1. Fotobiorreactor revisión sistemática

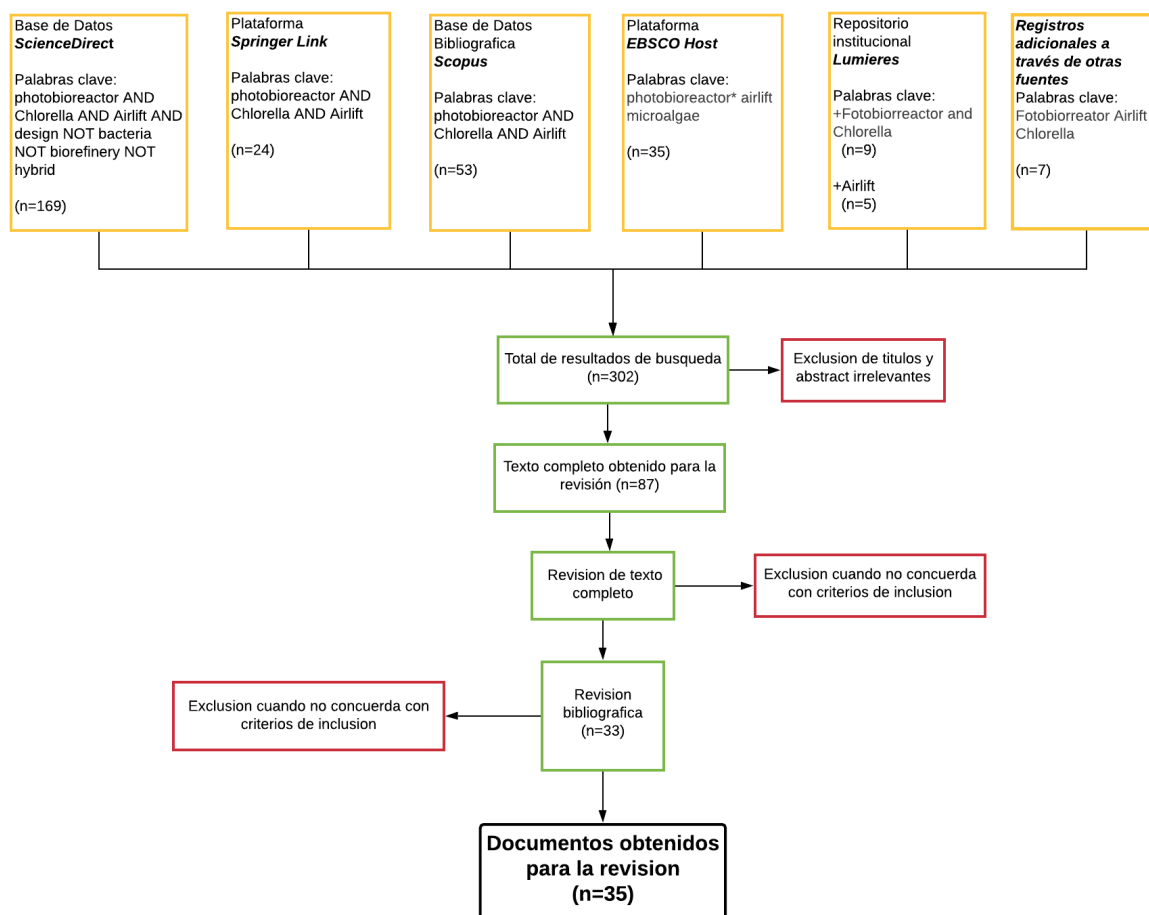
Las revisiones bibliográficas presentan, por lo general, exceso de información lo cual dificulta la clasificación y acotamiento de los diferentes documentos encontrados [31]. Por lo tanto, para garantizar la precisión de la investigación y minimizar el riesgo de fallas, este estudio se desarrolla usando el método de revisión sistemática (*Systematic review*). La revisión sistemática tiene como objetivo comparar los tipos de parámetros usados para el desarrollo de un fotobiorreactor *air-lift*, a través de los diferentes archivos que se encuentran en las bases de datos seleccionadas y preestablecidas.

La revisión se inició en septiembre del 2020 partiendo de la identificación de las bases de datos y plataformas disponibles para definir el espacio de búsqueda, dentro de las cuales se incluyen: *EBSCO*, *Lumieres*, *ScienceDirect*, *Scopus*, *Springer Link* y algunos registros adicionales provenientes de otras fuentes. En el proceso de evaluación de las fuentes se analizaron otros tipos de literatura incluyendo tesis de maestría, proyectos de pregrado, literatura científica y artículos de revistas.

La figura 4 proporciona información sobre las palabras clave utilizadas y el desarrollo esquemático del proceso de selección posterior, todos los documentos incluidos y excluidos fueron analizados por parte de las autoras.

**Figura 4.**

*Esquema Revisión sistemática Fotobiorreactor*



**Nota.** En la figura se visualiza la metodología utilizada para el desarrollo de la revisión sistemática en la selección de los parámetros del fotobiorreactor

Para el desarrollo de la búsqueda y manejo de información, en las bases de datos, se establecieron herramientas que ayudaron a mantener el orden de los archivos y así evitar pérdidas del material de análisis; dentro de las herramientas empleadas se encuentran: el gestor de referencias bibliográficas Zotero y Google Drive para el manejo de hojas de cálculo y documentos de Google. Asimismo, para obtener una búsqueda detallada, concisa y centrada al tema de investigación evitando posibles resultados irrelevantes; se emplearon ecuaciones de búsqueda, que consisten en una combinación de palabras claves junto con el uso correcto de operadores booleanos.

Se realizaron búsquedas piloto para refinar las ecuaciones de búsqueda mediante prueba y error. De acuerdo a la cantidad de artículos que arrojaba la plataforma o base de datos se implementaron diferentes tipos de ecuaciones haciendo uso de los operadores booleanos AND, NOT y \*.

Para Scopus y Springer Link se usó **“photobioreactor AND Airlift AND Chlorella”**; para Ebsco **“photobioreactor\* Airlift microalgae”**, para Science Direct **“photobioreactor AND Airlift AND Chlorella AND desing NOT bacteria NOT biorefinery NOT hybrid”** y para otras fuentes adicionales, y *lumières* se usaron las palabras clave “Fotobiorreactor”, “Airlift” y “Chlorella”. Las búsquedas arrojaron un total de 302 documentos publicados hasta septiembre del 2020. La cantidad específica arrojada por parte de cada motor de búsqueda se puede visualizar en las secciones de color amarillo de la figura 4.

En la revisión se establecieron criterios de selección para garantizar que solo se incluyan publicaciones de calidad y que brinden información pertinente, por lo tanto, los archivos obtenidos de las fuentes de información en la primera búsqueda cuentan con títulos congruentes al tema desarrollado. En los casos en que los documentos no cumplieran esta condición, éstos fueron excluidos. Con el objeto de filtrar la búsqueda se continuó verificando los *abstracts* o resúmenes, los cuales debe brindar información relevante sobre el FBR para ser incluidos. Finalmente, si un documento no cumple con los dos criterios anteriores se procede a realizar una búsqueda dentro del texto para comprobar la relevancia de las palabras de la ecuación de búsqueda dentro del documento, con el fin de encontrar archivos que cumplan con las condiciones y necesidades de búsqueda. Los archivos fueron preseleccionados aplicando criterios de inclusión, como resultado de este primer filtro de clasificación se obtuvieron 87 artículos candidatos.

Con los documentos preseleccionados se procedió a realizar la siguiente revisión; se analizó el contenido completo del texto de cada archivo; con el fin de verificar que los documentos brindaran información relevante respecto al diseño y parámetros de funcionamiento del fotobiorreactor *air-lift*, en caso contrario no se incluyeron para la siguiente revisión. El objetivo del FBR debía estar centrado en la producción de microalgas, específicamente la especie *Chlorella spp.*, por lo tanto, en caso que el

documento cite una fuente de información con respecto al fotobiorreactor *air-lift* es conservado para posteriormente revisar el documento referenciado, el cual puede brindar información adicional para la definición de los parámetros de funcionamiento del FBR. Dentro de los criterios de selección, para este filtro, se estableció que aquellos textos que profundizaran sobre otro tipo de fotobiorreactor *air-lift* o la combinación de varios tipos de fotobiorreactores no serían incluidos en la siguiente verificación, al igual que en caso de estar enfocado en la producción de otra microalga, bacteria o en la inclusión de varias especies, se descartó el documento.

En la revisión de texto completo se seleccionaron 33 documentos para proceder a realizar el filtro final, el cual consistió en la verificación de la bibliografía con el objetivo de encontrar posibles documentos adicionales que brinden información destacada con respecto al tema establecido. En esta etapa se implementaron los mismos criterios de inclusión y exclusión mencionados anteriormente para ser adjuntados dentro del grupo de archivos seleccionados para el posterior análisis y definición de los parámetros del fotobiorreactor.

### **2.1.1. Análisis bibliométrico de la literatura publicada en Scopus sobre biorreactores tipo *air-lift***

El análisis bibliométrico es una subdisciplina de la cienciometría [32] que a través del análisis estadístico de los documentos permite evidenciar el impacto en la actualidad de un tema específico y la relevancia en la comunidad científica [33].

La bibliometría permite realizar una revisión sistemática y reproducible que proporciona análisis tanto objetivos como fiables [33], por lo tanto, se analizaron los resultados previamente obtenidos en la base de datos *Scopus* mediante la herramienta de código abierto *bibliometrix*, la cual proporciona un análisis estructurado de la información brindada para identificar los investigadores e instituciones prolíficos dentro de las investigaciones existentes[33] sobre fotobiorreactores tipo *air-lift* para el cultivo de *Chlorella spp.*

Para el análisis de la literatura publicada en dicha base de datos, se utilizaron las siguientes ecuaciones de búsqueda: “**Photobioreactor AND Chlorella AND Airlift**” (ecuación 1) con un total de 54 resultados y “**Chlorella AND Airlift**” (ecuación 2) con

69 resultados, ambas sin ningún filtro adicional para visualizar el comportamiento general de las búsquedas.

*Bibliometrix* proporciona un conjunto de herramientas para la investigación cuantitativa en bibliometría, que tiene como finalidad ayudar a los investigadores para el procesamiento y organización de datos bibliográficos recuperados de las principales bases de datos bibliográficas como lo es *Scopus*, brindando índices de impacto científico como *h-index*, *g-index*, y *L-index* [33]. Esta herramienta recopila automáticamente metadatos de los resultados, por lo cual, para el análisis se emplean gráficos extraídos mediante *Bibliometrix*. Estos gráficos arrojados por la herramienta permiten atribuir un soporte adicional y corroborar archivos previamente seleccionados en la búsqueda de la base de datos *Scopus* mencionada en la sección 2.1.

En la figura 5 se presentan los 20 documentos más citados con respecto a los resultados de la ecuación 1, este gráfico atribuye información sobre los títulos destacados dentro del campo de búsqueda; por ese motivo se inició verificando si las publicaciones que presenta *Bibliometrix* han sido seleccionadas en la revisión previa, en caso de estar presentes son adjuntados dentro del grupo de archivos para la determinación de los parámetros del FBR y sobresalen dentro del grupo. El artículo con más citas [34] se encontraba dentro de los documentos seleccionados anteriormente por criterio de las autoras, este corresponde a “*A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect*” publicado en la revista “*Biochemical Engineering Journal*” con un total de 183 citas; de modo que se logró verificar que los criterios previamente definidos han logrado la correcta recopilación de archivos relevantes para la revisión.

**Figura 5.**

Gráfico de documentos más citados a nivel global ecuación 1



**Nota.** el grafico elaborado por la herramienta bibliometrix presenta los documentos de la ecuación de búsqueda “Photobioreactor AND Chlorella AND Airlift” en Scopus.

Asimismo, para la ecuación 2 se extrae el grafico con los documentos más citados presentado en la figura 6, que al realizar la comparación con la figura 5 se evidencia que 8 de los artículos difieren entre ambas búsquedas, de la ecuación 1 corresponden a Morita M. 2001, Sadeghizadeh A. 2017, Huang Y. 2017 y Huang J. 2014 (4 últimos artículos de la figura 5) y de la ecuación 2 varían: Matthijs HCP. 1996, Cruz I. 2013, Münkel R. 2013 y Higinns BT. 2014.

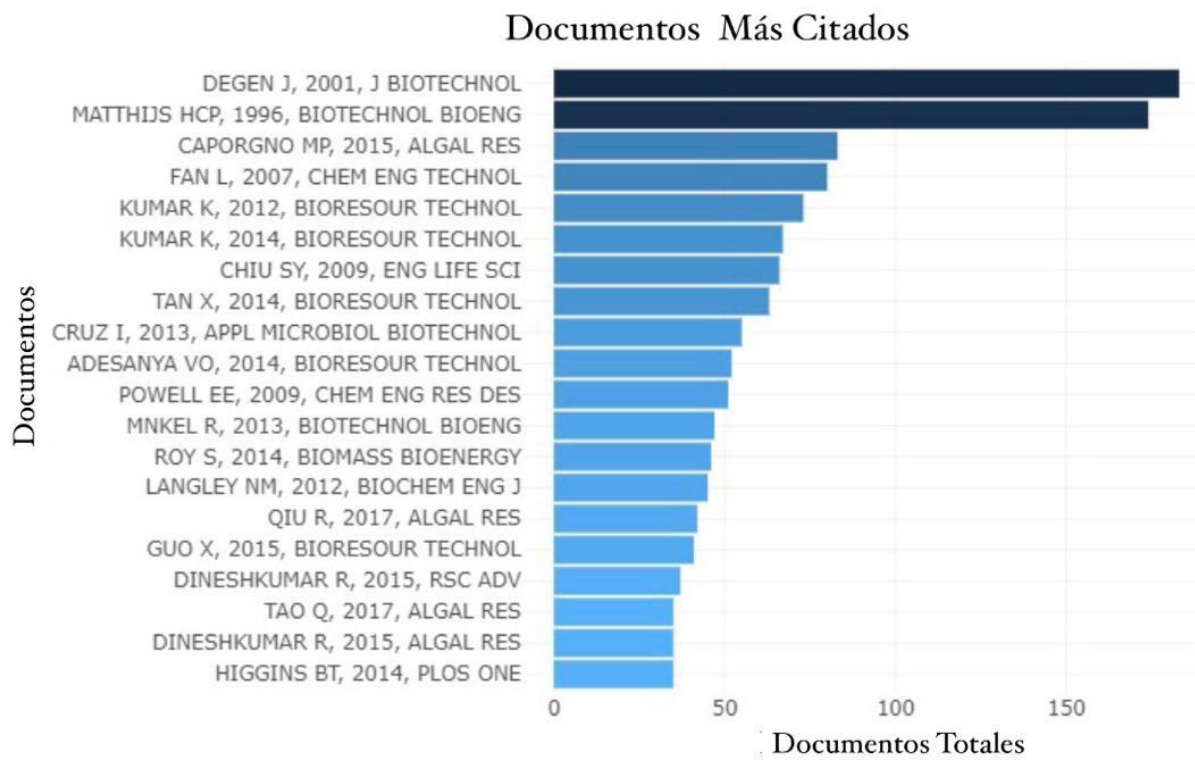
Para continuar con la revisión se abordan los 4 primeros artículos de la ecuación 1, de los cuales, por criterio de las autoras, se descartó a Morita M. 2001 para la revisión; a pesar de que el estudio usa un tipo de fotobiorreactor *air-lift* (CHTP) no presenta información relevante sobre los parámetros de diseño; por otro lado, los otros 3



documentos mencionados coinciden con el grupo preseleccionado por lo que se conservan. Continuando con la revisión de los artículos de la ecuación 2 se determinó que los 4 artículos mencionados, pese a que se encuentran dentro de los artículos más citados, no presentan información substancial dentro de la temática definida.

**Figura 6.**

*Gráfico de documentos más citados a nivel global ecuación 2*



**Nota.** El gráfico elaborado por la herramienta *bibliometrix* presenta los documentos de la ecuación de búsqueda “*Chlorella* AND *airlift*” en *Scopus*.

De acuerdo con la revisión de la información obtenida en los resultados de las ecuaciones de búsqueda realizadas en *Scopus*, 16 de los documentos más citados concuerdan en ambas búsquedas, de los cuales 12 son seleccionados para la revisión, 11 coinciden con los archivos preseleccionados y 1 a pesar de no estar presente en los artículos previos, contribuye con información adicional que corresponde a Qiu R. 2017 con el artículo “*Effects of pH on cell growth, lipid production and CO<sub>2</sub> addition of microalgae Chlorella sorokiniana*” [35].

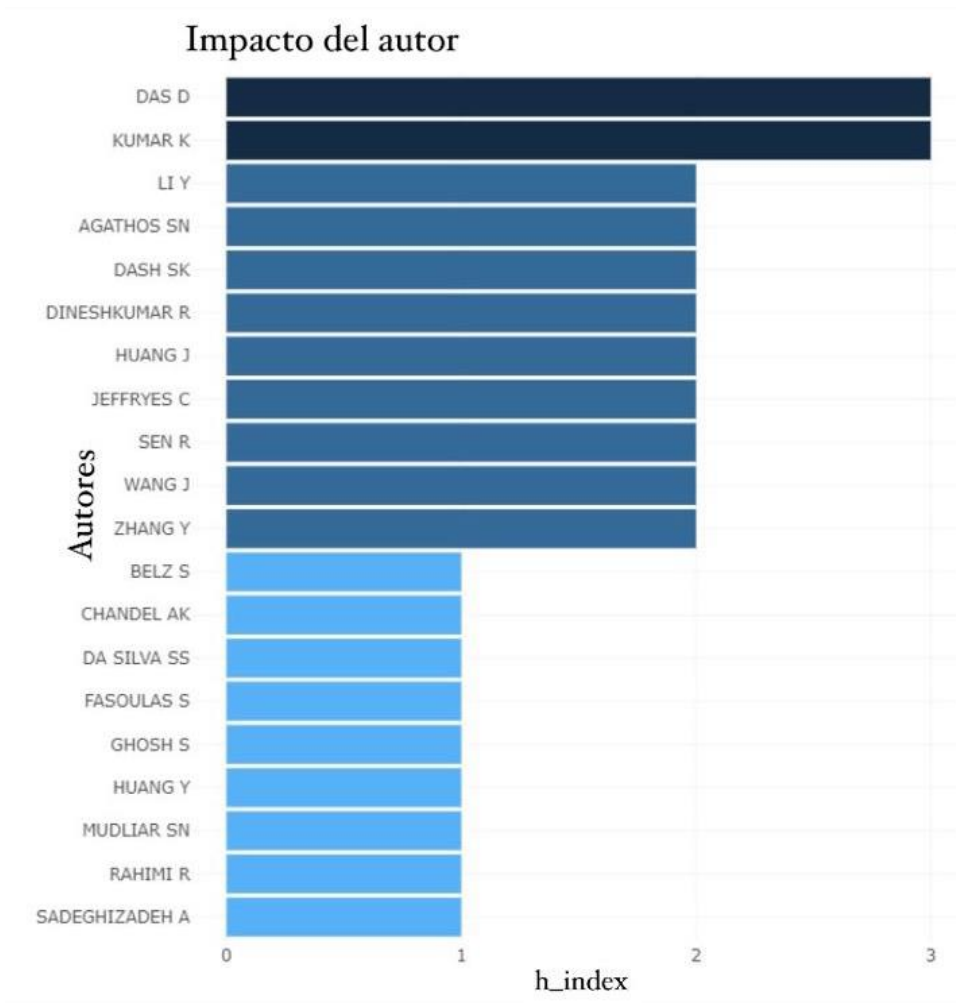
Los documentos descartados a pesar de presentar la mayor cantidad de citas a nivel global no contienen información relevante para el objetivo de la revisión descrita. Este factor permitió corroborar que los criterios de exclusión e inclusión han sido correctamente determinados. Un ejemplo de esta afirmación es el caso del artículo de Fan L. 2007, aun cuando cuenta con 80 citas y menciona un fotobiorreactor *air-lift*, la investigación está centrada en un reactor de membrana, por lo tanto, se eliminó.

Se realizó una verificación adicional representada en las figuras 7 y 8, con el impacto del autor mediante *h-index*, que es un sistema para la medición de la calidad científica de los autores, este atributo permite evidenciar el impacto de las publicaciones realizadas por cada autor en la base de datos. Los resultados de estas búsquedas se presentan en las figuras 7 y 8, ambas ecuaciones arrojan que Das D. es el autor con mayor impacto. Dentro de las búsquedas realizadas con un h-Index de 3-4, en el caso de la revisión que se está llevando a cabo dos de los artículos de dicho autor han sido elegidos para la verificación de texto completo. Otros autores de impacto como Kumar K, Huang J, Sadeghizadeh A, Huang, entre otros, han estado presentes tanto en las búsquedas como en el grupo de archivos para la revisión.

Este indicador refleja el impacto global de los trabajos de un investigador [36] y permite en el caso particular de esta revisión, ratificar que los artículos seleccionados tienen la suficiente calidad científica para ser analizados y evaluados dentro de la investigación.

**Figura 7.**

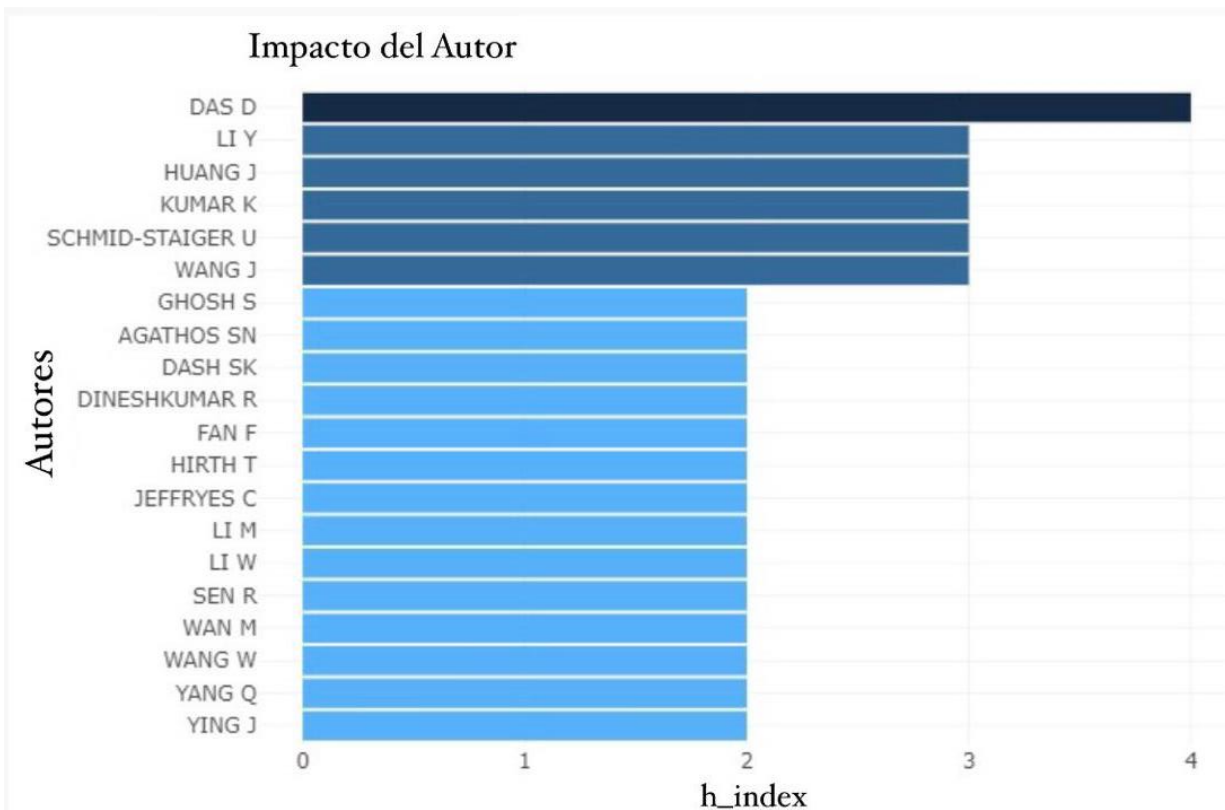
*Gráfico autores con mayor h-index ecuación 1*



**Nota.** el gráfico elaborado por la herramienta *bibliometrix* presenta los 20 autores con mayor impacto de acuerdo al *h-index* en la ecuación de búsqueda “*Photobioreactor AND Chlorella AND airlift*” en *Scopus*.

**Figura 8.**

Gráfico autores con mayor *h-index* ecuación 2



**Nota.** El gráfico elaborado por la herramienta *bibliometrix* presenta los 20 autores con mayor impacto de acuerdo al *h-index* en la ecuación de búsqueda “*Chlorella* AND *airlift*” en *Scopus*.

## 2.2. Análisis parámetros

### 2.2.1. Temperatura

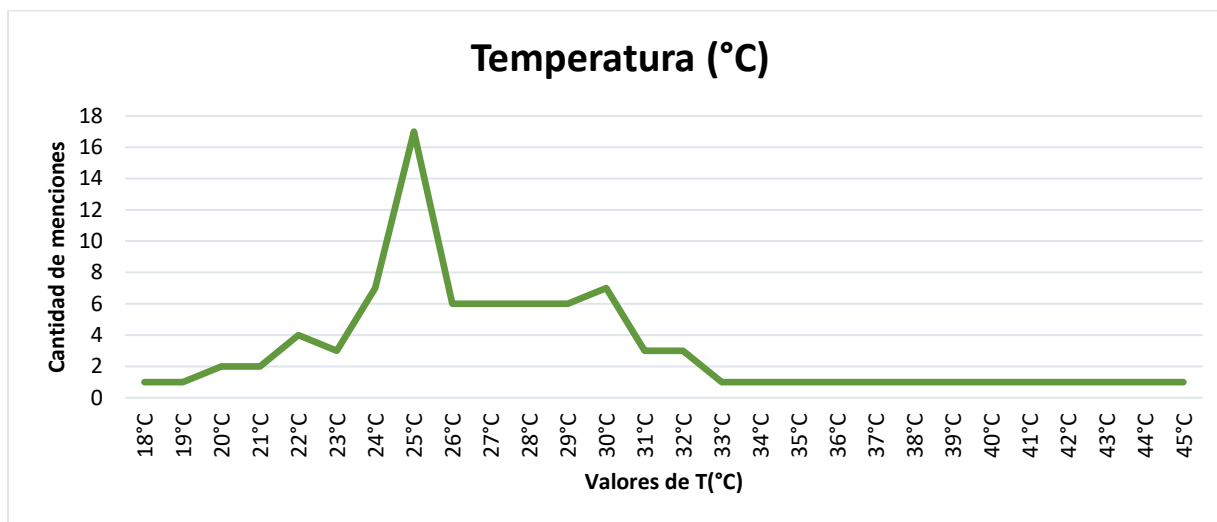
La temperatura es un parámetro fundamental para la reproducción de los cultivos microalgales; los rangos para el crecimiento dependen de la especie involucrada y del producto de interés. Este factor presenta un efecto en la actividad biológica que se refleja en un aumento de la tasa de crecimiento; asimismo, repercute en el proceso de respiración celular en la fase oscura, que al presentarse altas temperaturas la pérdida de biomasa puede ser considerable [7].

De acuerdo a la revisión realizada, las temperaturas varían desde los 20°C hasta los 45°C. Un estudio realizado por Tan [37], presenta que el crecimiento celular de *Chlorella*

spp. disminuyó rápidamente en el rango de temperatura de 42 °C a 45 °C. Por otro lado, Ospitia en su tesis desarrollada en la Universidad Antonio Nariño reporta una temperatura de 27 °C [38]. Este valor se destaca debido a que la revisión tiene un enfoque en las condiciones de los laboratorios del grupo GRESIA.

### Figura 9.

Gráfico de tendencias de temperaturas del medio de cultivo



**Nota.** El grafico presenta el número de veces que mencionan cada una de las temperaturas en los documentos seleccionados para la revisión sistemática.

Considerando los diversos autores (Figura 8), se estableció que el rango óptimo de temperatura es de 25 °C a 30 °C. Romo Piñera afirma que temperaturas por debajo de este intervalo no matan a la microalga pero puede provocar una disminución del crecimiento, y que temperaturas superiores provocarían que las microalgas colapsen [9].

#### 2.2.2. Suministro de luz

La luz es uno de los principales factores para el cultivo de microalgas debido a que son microorganismos fotoautótrofos. Éstos presentan una gran dependencia de la cantidad de luz suministrada [10] debido a que representa una fuente de energía para el desarrollo de su proceso de fotosíntesis [7].

Este parámetro es esencial tanto por su aporte de forma individual como por su interacción con otros parámetros como la intensidad de luz, temperatura, y fotoperiodo [7]. La intensidad lumínica es un factor fundamental dentro del crecimiento microalgal, muchas de las reacciones involucradas en el metabolismo del microorganismo son fotoquímicas, por lo que involucran cierta cantidad de luz [7].

En cuanto al tipo de luz, la mayoría de los estudios fueron realizados mediante el suministro de luz artificial. Se estableció el tipo de luz blanca mediante la revisión bibliográfica, fundamentada con el estudio de Yee-Keung [39], en el cual compara la producción de biomasa en un FBR bajo diferentes condiciones de color de luz, llegando a la conclusión que la luz blanca presenta la mejor producción; asimismo, Sánchez [40] y Ospitia [38] en sus trabajos de grado realizados en la Universidad Antonio Nariño, realizaron su experimentación en condiciones de 24 horas de iluminación mediante una cinta de bombillos LED de luz blanca, la cual también provee el calor suficiente en el sistema.

Los fotoperiodos presentados en los artículos son variantes y se establecen generalmente al criterio de los autores. Para la mayoría de los biorreactores diseñados con material transparente, la superficie exterior es el único lugar expuesto a la luz solar (zona fótica); el resto no está expuesto o cuenta con poca penetración solar (zona oscura) [39]. En el estudio realizado por Langley [41] se expone la disminución en la intensidad de la luz a medida que aumenta la densidad del cultivo, partiendo de un rango de intensidad lumínica de  $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a  $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , para 3 posiciones diferentes en el interior del FBR. Con base en esto, se estable suministrar luz constantemente en vista de que favorece el crecimiento microalgal, puesto que la duración bajo la zona clara/oscura a la cual están expuestas las microalgas afecta la producción de biomasa del FBR. La elección de suministrar luz constantemente permite una buena alternancia del ciclo luz/oscuridad en tiempos de residencia cortos, hecho que mejora el crecimiento de las microalgas evitando la fotoinhibición del cultivo [42].

Otro aspecto considerado es la intensidad lumínica. Para este análisis, inicialmente se consideraron los documentos que presentan volúmenes cercanos al propuesto (20 L). López [43] realizó el cultivo de *Chlorella spp.* en un FBR de vidrio con un volumen de

17 L bajo condiciones controladas, estableciendo una intensidad de  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , de igual forma, Kumar plantea el suministro luz mediante tubos fluorescentes blancos con una intensidad de  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Por otra parte, Huang [44] presenta intensidad de luz de aproximadamente  $270 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en cada superficie iluminada del FBR de 14 L. Es importante contemplar este parámetro debido a que cuando se supera un nivel crítico puede producirse fotoinhibición; además, determina la velocidad con la que se efectúa la fotosíntesis y establece la velocidad de crecimiento de las microalgas [40]. Para reactores de menor volumen como el presentado por Tagliaferro [39], de 3.8 L, se proporcionó un suministro de luz continuo mediante lámparas fluorescentes con una intensidad de  $125 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a  $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Lal y Das [46] proporcionaron iluminación constante con una intensidad similar de  $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

De acuerdo a la revisión realizada, se encontró que la intensidad lumínica favorable para el crecimiento de la especie objeto de estudio son valores entre  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a  $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; también, se determinó que el diseño geométrico del reactor influye en este parámetro. Variables como la cantidad, potencia, ubicación y tipo de fuentes de luz suministradas repercuten en el suministro lumínico para los microorganismos. El paso de luz puede limitarse por la densidad celular que genera un sombreado mutuo entre las células, así como por el tipo de material del FBR; para resolver el problema de distribución lumínica, los autores proponen estrategias tales como la mejora de la mezcla y limitar la longitud de la trayectoria de luz junto con el uso de materiales delgados para los FBR [39].

### **2.2.3. pH**

Como se mencionó en el primer capítulo de este proyecto, el pH es una variable que se ve afectada por el contenido de  $\text{CO}_2$  suministrado al medio microalgal, el cual, puede aumentar, disminuir o mantener constante este parámetro. El suministro de  $\text{CO}_2$  se da en estado gaseoso y éste luego es transferido de la fase gaseosa a la fase líquida del FBR, para así, suministrar carbono inorgánico para el crecimiento algal y mantener el equilibrio del pH en el cultivo [40].

Cuando el *pH* del cultivo se mantiene estable, se obtiene un contenido máximo de clorofila, lo que beneficiaría la tasa de crecimiento de microalgas y la promoción de la

producción de biomasa [47]. Por el contrario, la disminución por debajo del punto de tolerancia puede ser fatal, llegando al punto que inhibe el crecimiento microalgal., mientras que si hay un aumento del rango de tolerancia, las microalgas suelen ser más resistentes [7].

Cada especie de microalgas tiene un rango de pH óptimo para la producción de biomasa. En el caso de *Chlorella spp.* este valor suele encontrarse entre 7 y 8. La comparación en un FBR con valores de pH de 6.5 a 8.3, realizada por Tovar y Ruiz [7], reportan mejor crecimiento de biomasa con valores de 7.0 y 7.5, lo cual concuerda con la explicación previa.

Respecto a lo anterior, se determinó que el pH es uno de los factores más importantes con respecto al cultivo de la microalga *Chlorella spp.* En el fotobiorreactor *air-lift* se refleja la solubilidad de algunos componentes como el CO<sub>2</sub> al igual que su disponibilidad en el medio, debido a que determina el consumo de nutrientes en la producción de biomasa microalgal [7].

Para determinar el rango del pH óptimo para el funcionamiento del fotobiorreactor *air-lift*, se analizaron algunos de los documentos obtenidos a partir de la revisión sistemática. Primero se decide verificar si este factor es controlado o monitoreado, donde el resultado define que este factor normalmente es monitoreado en los documentos. Debido a que el suministro de gas era aire con un porcentaje de CO<sub>2</sub> entre 0.002% a 0.5%. Por estas razones se recomienda que el pH sea monitoreado para el adecuado crecimiento microalgal.

Para una buena obtención de biomasa microalgal en el fotobiorreactor se establece un rango óptimo de pH de 7 a 8,7. En el análisis se consideraron artículos como el de Huang [47], en el que plantea que en un pH menor o igual a 6.9 se considera que se acidifica el medio, así definiendo el valor mínimo de pH de 7. Ospitia [38], afirma que su pH óptimo es de 8.2 a 8.7 y que un pH de 5 a 6 disminuye la producción de biomasa microalgal, estableciendo el valor máximo en el rango determinado. Finalmente Tovar y Ruiz [7], reportan su mejor crecimiento en el rango de 7 y 7.5, corroborando los valores propuesto de pH para el funcionamiento del fotobiorreactor.



#### **2.2.4. Suministro de gas**

**2.2.4.a. Aireación.** Este parámetro es importante debido a que define la fuente de gas, si es aire o CO<sub>2</sub> preparado. Adicionalmente se relaciona con el pH, debido a que si el flujo de CO<sub>2</sub> aumenta el pH disminuye, lo que puede provocar la acidificación e inhibición de la biomasa microalgal [47].

Como afirma Huang [47], una tasa de flujo de CO<sub>2</sub> adecuada puede mejorar la transferencia de masa gas-líquido y reponer suficiente CO<sub>2</sub> para el crecimiento de microalgas. Una mezcla adecuada del cultivo evitaría que las células de microalgas precipiten hasta el fondo del biorreactor y asegura que todas las células de microalgas puedan entrar en contacto completo con los nutrientes, el CO<sub>2</sub> y la luz. Con respecto al pH, se indica que con aumentos del caudal de gas CO<sub>2</sub>, el pH de los cultivos disminuyó, generando una acidificación en el medio [47].

Como sustenta Madhubalaji [48] que usando CO<sub>2</sub> en una concentración al 0.04% v/v, obtuvo una tasa de crecimiento favorable y una buena productividad de biomasa, contribuyendo a determinar que generalmente se emplea aire con un contenido de CO<sub>2</sub> que varía entre 0.02% y 5%.

Finalmente se plantea que el flujo de aire sea continuo, usando aire como fuente de gas. La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire varía entre 350 y 400 PPM.

**2.2.4.b. Flujo de Aire.** Este factor está relacionado no solo con la aeración sino también con la regulación del pH, ya que el aire es el suministro de CO<sub>2</sub> al fotobiorreactor *air-lift*, como se explicó anteriormente en la aireación.

Para determinar los valores de la velocidad de flujo de gas óptima en el diseño del fotobiorreactor, se decide realizar el análisis de los datos que arrojaban los respectivos documentos. Se consideran aquellos artículos y trabajos que planteen un volumen de trabajo cercano al valor propuesto en el proyecto (20 L) o se enfoquen en estudiar los cambios que genera la variación de la velocidad de flujo.

Dentro de los documentos analizados fue Huang [47], afirma que una velocidad de flujo de gas de 0,125 VVM, no podría suministrar suficiente CO<sub>2</sub> para el crecimiento de microalgas, descartando valores cercanos al 0,1 de VVM (Volumen de gas por volumen de reactor por minuto) . También afirma que el crecimiento de las microalgas comenzó

a disminuir a las 22h, pero mejoro a las 34, con el incremento de aireación de 0,6 a 1 VVM, esto se explica porque la frecuencia del ciclo luz-oscuridad y la velocidad de cultivo del microorganismo aumenta cuando aumenta la tasa de aireación. La tendencia aquí es entonces hacia 1VVM.

En un fotobiorreactor *air-lift* de 3.4L, Ammar centra su estudio en el cambio de la tasa de flujo de aire, en el cual, concluye que al emplear una tasa con un valor de 1.17 VVM, facilitó la mezcla y por lo tanto, una mejor disponibilidad de luz, lo que permitió mayor tasa de crecimiento y productividad de la biomasa [48]. Para un fotobiorreactor de 17 L, con la variación de 0.3 a 1.20 VVM, los mejores resultados para la producción de biomasa al igual que la producción de lípidos, se mantuvieron entre  $1\pm 0.2$  VVM según López [43].

Ammar [49] afirma que cuando se aumenta el caudal de aire, junto con la tasa de transferencia de masa, por lo tanto, se mejora la tasa de crecimiento de las microalgas. Pero cuando aumenta aún más el caudal de aire por encima de 1 VVM, este aumento de la retención de gas y el tamaño de la burbuja disminuyen, la columna se vuelve turbia y no penetra la luz en la profundidad de la columna, por lo tanto, disminuye la tasa de crecimiento. Los resultados óptimos son, respecto a un fotobiorreactor de 6,6 L [49].

Finalmente se toma a Sobhi [50] como contraparte, en su trabajo usando como fuente de gas aire afirma que, a mayor VVM el porcentaje de carbono en la biomasa disminuye, donde a 1 VVM tuvo más porcentaje de carbono que a 3 VVM. Pero, con respecto a la producción de biomasa se obtuvo mejor producción a 3 VVM. Eso no quiere decir que a 1 VVM haya una mala producción, pero usar el mayor valor de VVM puede generar un alto consumo de energía, lo que perjudicaría la factibilidad económica del proyecto.

Respecto a las fuentes analizadas anteriormente se plantea que el flujo de aire sea continuo a  $1\pm 0.2$  VVM. Esto se determinó haciendo la revisión de documentos que analizan la inyección del flujo de aire con relación del volumen trabajo. concluyendo que entre más aproximado sea el valor de VVM a 1, el fotobiorreactor *air-lift* tendrá mejores tasas de crecimiento.

### **2.2.5. Medio de Cultivo**

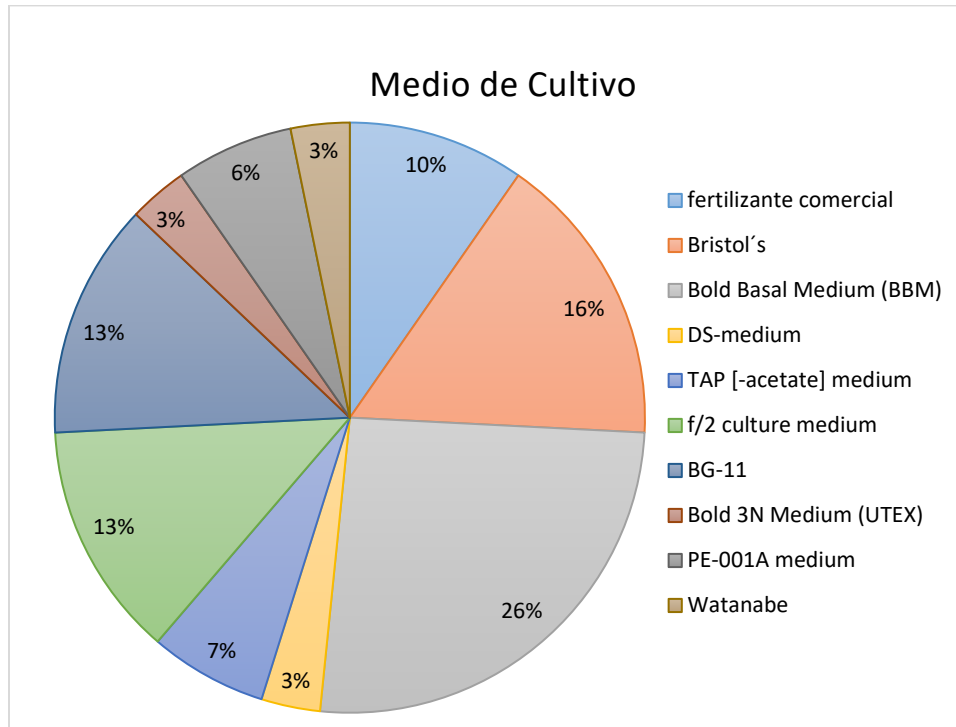
Este parámetro se considera base para la producción de biomasa en el fotobiorreactor *air-lift*. Éste constituye uno de los mayores costos de producción microalgal, debido a que aquí se encuentran los nutrientes que requiere el microorganismo para su crecimiento [2].

La variedad en este parámetro es múltiple, debido a que se busca una mejor rentabilidad en el proceso y en algunos casos atributo ambiental o disminución del impacto ambiental [2]. Pueden ser medios definidos (BG11, BBM - bold basal médium) o medios indefinidos (aguas residuales naturales o sintéticas).

Con respecto al análisis realizado en los documentos extraídos por la revisión sistemática (Figura 9), la mayoría usaban BBM (bold basal medium), pero, como el proyecto está enfocado en contribuir al grupo GRESIA, se decide que el medio de cultivo para el fotobiorreactor *air-lift* sea indefinido, el cual se toma como agua residual. Como lo determinan Sánchez [40] y Ospitia [38], proyectos realizados en la Universidad Antonio Nariño, la orina es un buen medio de cultivo debido a que es una buena fuente de nutrientes.

**Figura 10.**

*Gráfico circular de los medios de cultivo*



**Nota.** El gráfico elaborado por la herramienta *Excel* presenta los diferentes medios de cultivos usados para la microalga *Chlorella*, así mismo, cual es el comúnmente usado para este microorganismo. El análisis se obtuvo de los diferentes documentos de la revisión sistemática.

La orina es seleccionada como el medio de cultivo para el estudio, ya que es el principal compuesto rico en nutrientes de las aguas residuales domésticas y uno de los principales productos de las prácticas de saneamiento ecológico. La orina humana contiene una proporción importante de nutrientes, debido a que está enriquecida con nitrógeno y fósforo, Adamsson [92] en su estudio afirma que la orina puede ser utilizado para el crecimiento de algas. Además, como se observó en la tesis de maestría de Soroosh [51], el rendimiento de la orina en el cultivo de algas ha sido comparado con otros medios y soluciones de cultivo, concluyendo que, en los experimentos realizados, la orina se comportó mejor que otras fuentes de nutrientes.

### **2.2.6. Variables geométricas**

Estas variables están relacionadas con las dimensiones, capacidades y forma de los equipos [52]. Los autores indican diferentes dependencias en este parámetro por lo que es imposible establecer relación alguna, sin embargo, proponen estrategias de diseño favorables para el cultivo.

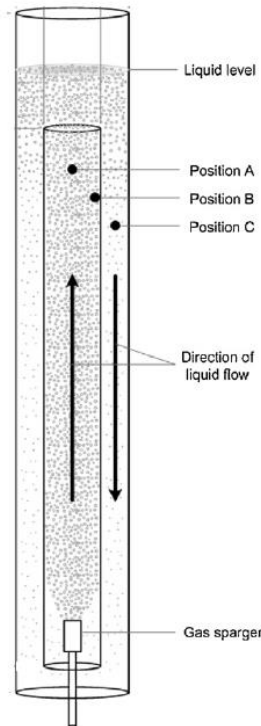
Para la fabricación de fotobiorreactores se emplean materiales transparentes que permitan el paso efectivo de luz, este factor está sujeto a la elección de los autores y disponibilidad en el mercado. Pese a que los recursos para el desarrollo del estudio restringen en ocasiones las dimensiones de los reactores, estos pueden ser elaborados de acuerdo a las especificaciones establecidas, como López que desarrolla su experimentación en un fotobiorreactor *air-lift* de vidrio ajustado con cintas de teflón [37]. Generalmente los reactores presentados son diseñados con materiales como polímeros acrílicos, tereftalato de polietileno, entre otros.[46]

Lal y Das presentan un reactor elaborado con polimetilmetacrilato (PMMA) de 5 mm de espesor [46] En el caso de López [43] el reactor contaba con espesores de 10 mm para el tubo externo y 11 mm para el tubo interno. Por otro lado Rengel [53] trabajó con espesores de 6 mm para el cilindro externo y 10 mm para el interno. De acuerdo a las dimensiones presentadas por los autores, al realizar la suma de ambos espesores se observa que la longitud total que debe atravesar la luz desde la superficie hasta la parte interna del FBR, se encuentra en un rango de 20 mm a 40 mm.

La penetración de la luz juega un papel esencial para el crecimiento celular puesto que la luz es uno de los factores limitantes en el cultivo. El aumento de diámetro del *air-lift* junto con el aumento de la densidad celular disminuyen el paso lumínico en el reactor, como lo demuestra Langley al determinar la intensidad lumínica en tres posiciones diferentes (figura 10), donde la posición A exhibe una disminución de intensidad mayor a medida que aumenta la densidad del cultivo [41], por lo tanto, es recomendable limitar la longitud de la trayectoria de luz con reactores con diámetros menores a 50 mm.

**Figura 11.**

*Esquema del reactor air-lift de recirculación interna*



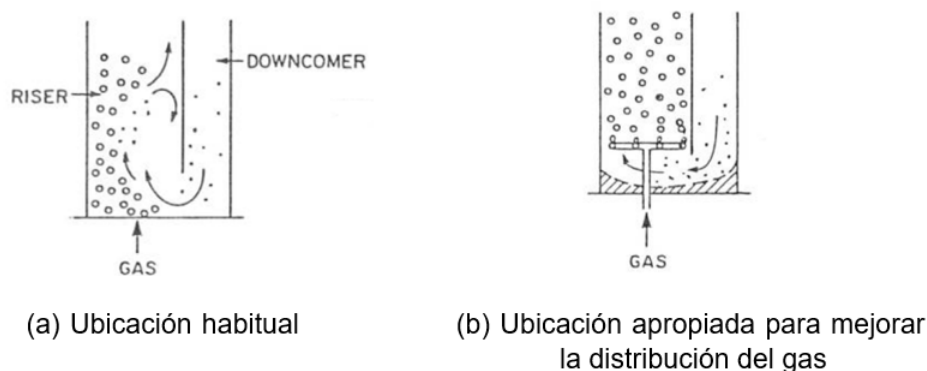
**Nota.** El esquema presenta la posición de mediciones de luz en el estudio realizado por Langley. Tomado de: N. M. Langley, S. T. L. Harrison, y R. P. van Hille, A critical evaluation of CO<sub>2</sub> supplementation to algal systems by direct injection.

*“Diferentes geometrías y diseños de FBR dan como resultado una circulación hidrodinámica y una disponibilidad de luz variables, lo que puede afectar la distribución de la luz y la mezcla dentro del reactor” [39]. El diámetro del tubo interno y la altura del reactor afectan el rendimiento de la mezcla, por lo tanto Chisti plantea que la distribución*

rápida y homogénea del medio junto con el gas proporcionado son parámetros esenciales para el rendimiento de los reactores [54]. El difusor usualmente es ubicado en la base del tubo de ascenso (*riser*) (Figura 12 (a)), pero Chisti asegura que no es la mejor ubicación, debido a que el fluido recirculado genera mala distribución del gas en el interior como se puede visualizar en la figura 12 (a), por lo que se recomienda posicionar el difusor dentro del tubo de ascenso (Figura 12 (b)) [54].

**Figura 12.**

*Influencia de la ubicación del difusor.*



**Nota.** Representación gráfica del flujo de aire con respecto a la posición del difusor. Tomado de: M.Y. Chisti *Airlift Biorreactors* pp.3

La geometría del reactor influye en las propiedades del fluido, la resistencia a la ruta de circulación total del flujo es controlada principalmente por la relación entre el área de la sección transversal del tubo descendente y el tubo ascendente [54]. Por otro lado, Chisti manifiesta que no se tiene un acuerdo general sobre el término geométrico de relación área tubo descendente / Área tubo ascendente ( $A_d / A_r$ ) en la circulación. Otros autores expresan diferentes dependencias en este parámetro [54].

### 2.3. Producción de Biomasa Microalgal

La producción de biomasa microalgal en sistemas cerrados como los FBR dependen de diferentes factores: concentración de sustrato, pH, temperatura, aireación y agitación del medio de cultivo; este último es uno de los elementos más importantes porque tiene una influencia directa sobre la transferencia de masa. Se entiende por productividad como la máxima cantidad de biomasa obtenida por día (o por año) por unidad de área

[55]. Una biomasa de calidad se puede lograr asegurando que las principales variables estén en un nivel óptimo [40].

La producción de biomasa permite la obtención de lípidos, polisacáridos y enzimas que son tratados a través una serie de procesos físicos-químicos que permiten su purificación y finalmente su uso comercial [7].

Puesto que es una variable de respuesta depende de las condiciones a las que esté sometido el cultivo y para ser determinada se requiere de un proceso experimental bajo los parámetros mencionados en la sección 2.2. Durante la revisión no se encontró ningún artículo con parámetros similares a los planteados anteriormente, únicamente se presentan los valores reportados por López [43] donde expone para un reactor de 17 L, una producción de biomasa máxima entre 0.5 g/L día y 0,57 g/L día.

#### **2.4. Resumen de resultados parámetros del fotobiorreactor *air-lift***

Para el buen funcionamiento de un fotobiorreactor *air-lift* con un volumen de 20L, con el fin de producir biomasa microalgal de *Chlorella spp.* se presentan los resultados obtenidos para los parámetros considerados (Tabla 1).

**Tabla 1.**

*Resumen de resultados FBR*

Parámetro	Propuesta
Temperatura (°C)	25-30
Intensidad Lumínica ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	100 -250
pH	7 -8,7
Aireación	Suministro Aire
Flujo de Aire (VVM)	1 $\pm$ 0.2
Medio de cultivo	Indefinido, agua residual

**Nota.** Mediante la revisión de los documentos obtenidos se establecen los valores presentados para cada parámetro.



### 3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LOS SISTEMAS DE FERTIRRIGACIÓN

#### 3.1. Sistemas de fertirrigación revisión sistemática

Al igual que en el capítulo anterior, el estudio presentado en esta sección se realizó usando el método de revisión sistemática (*Systematic review*). La presente tiene como objetivo analizar los diferentes sistemas de fertirrigación para establecer el sistema adecuado para la aplicación de la microalga *Chlorella spp.* propuesta como biofertilizante.

La revisión se inició en noviembre del 2020. El espacio de búsqueda se definió a partir de las bases de datos y plataformas disponibles que presentaran archivos pertinentes al tema, dentro de las cuales se incluyen: *Scopus*, *Dialnet*, *EBSCO Host*, repositorios de la universidad Autónoma de México, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Universidad de Guayaquil y Universidad Central del Ecuador, y algunos registros adicionales provenientes de otras fuentes.

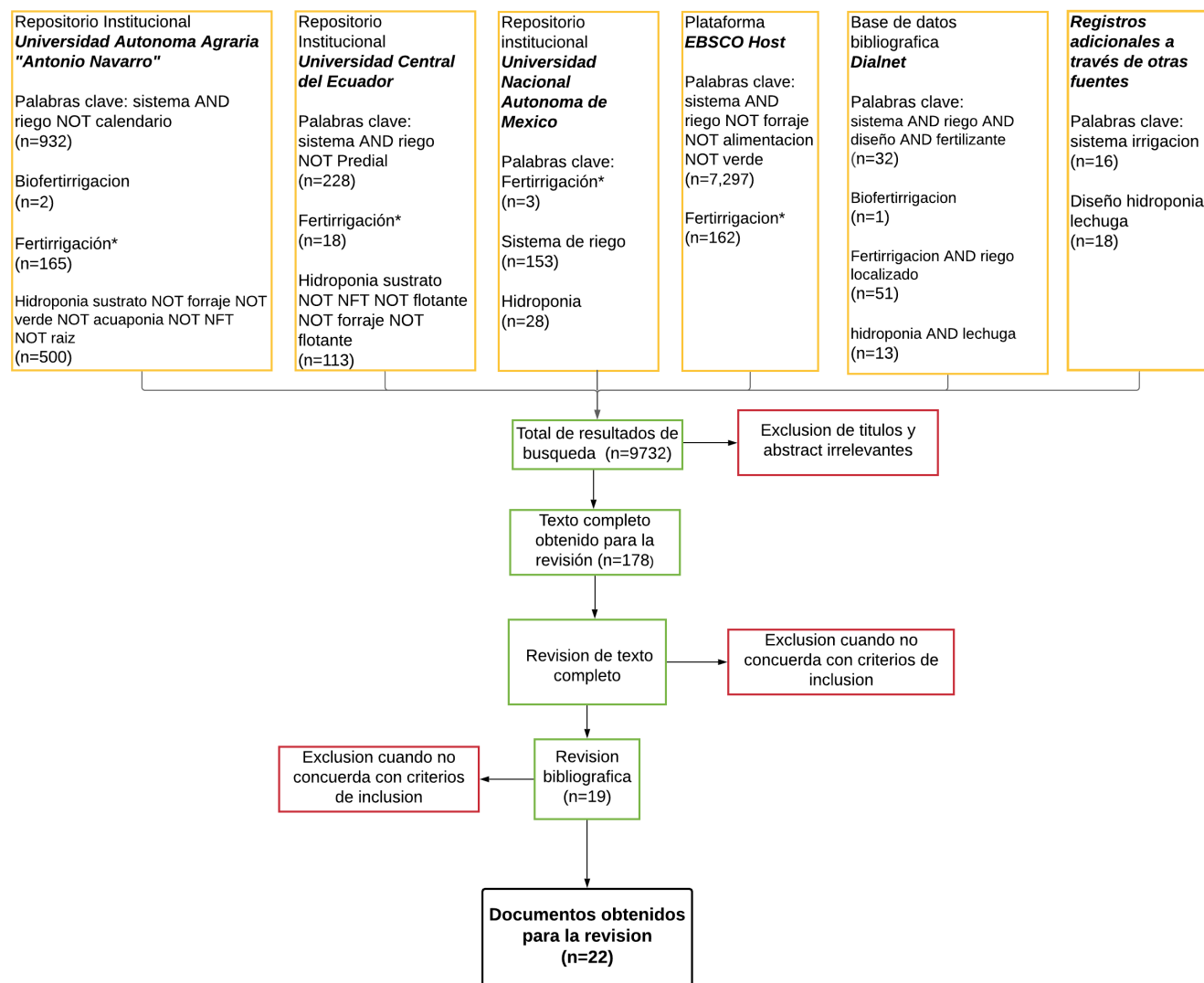
Al igual que el capítulo anterior, para el desarrollo de la búsqueda y manejo de la información, se decide continuar con el uso de las herramientas para mantener el orden de los archivos, dentro de las cuales se encuentran: el gestor de referencias bibliográficas *Zotero* y *Google Drive*. Asimismo, para obtener resultados de búsqueda centrados en el tema de investigación se emplearon ecuaciones de búsqueda.

La búsqueda de información para el desarrollo de esta revisión está conformada por los tipos de sistemas de riego, al ser un tema extenso se plantea el desarrollo del objetivo basado en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*). Esta decisión se toma a partir de que es una hortaliza de fácil acceso y su tiempo de cultivo es bajo, además, conforme hacemos la revisión este vegetal es el más usado para los diferentes estudios y documentos.

Se realizaron búsquedas piloto para refinar las ecuaciones de búsqueda mediante prueba y error, con el fin de encontrar información focalizada en los diferentes tipos de riego, obteniendo las ecuaciones presentadas en la sección amarilla de la figura 13.

**Figura 13.**

*Esquema Revisión sistemática sistema de fertirrigación*



**Nota.** En la figura se visualiza la metodología utilizada para el desarrollo de la revisión sistemática para el diseño conceptual de los sistemas de fertirrigación.

Con la base de datos bibliográfica *Scopus* se realizó una de las pruebas para la identificación de las palabras clave, empleando la ecuación de búsqueda: "**irrigation AND system**" se obtuvieron 58054 resultados, ordenados por relevancia se exportaron únicamente 2000 documentos. La figura 14 generada por la herramienta *Bibliometrix*, presenta una nube de las palabras clave presentes en los textos extraídos, gracias a este grafico se logra visualizar las palabras que permitirán la obtención de documentos

sustanciales. Asimismo, la gráfica mencionada permite reconocer que palabras como “*chlorella*” o “*microalga*” no son determinantes dentro de esta búsqueda, esto se corrobora al realizar la búsqueda de la ecuación: “**irrigation AND system AND microalgae**”, revisando los 33 resultados arrojados se identifica que no brindan información pertinente al tema de investigación por lo cual no se emplearon para la revisión sistemática de este capítulo.

**Figura 14.**

*Nube de palabras clave*



**Nota.** El gráfico elaborado por la herramienta Bibliometrix presenta las palabras clave de los documentos obtenidos con la ecuación de búsqueda: “irrigation AND system” en *Scopus*

Pese a las restricciones implementadas con el operador booleano NOT, algunas ecuaciones de búsqueda presentaron resultados superiores o iguales a 500 (figura 12), por lo tanto, la revisión de los textos en este tipo de casos se ejecutó hasta que la información suministrada fuese irrelevante para el estudio.

De la misma forma como se describe en la revisión realizada en el segundo capítulo, se establecieron criterios de selección, por lo tanto, los archivos obtenidos de las fuentes de información en la primera etapa de la búsqueda cuentan con títulos congruentes al tema desarrollado. En caso de que los documentos no cumplieran esta condición,

fueron excluidos, con el objeto de filtrar la búsqueda. Se continuó verificando los *abstracts* o resúmenes y en algunos casos tablas de contenido, las cuales deben brindar información relevante sobre el diseño de los diferentes sistemas de riego, para ser incluidos. Finalmente, si un documento no cumplía con los dos criterios anteriores se procedió a realizar una búsqueda dentro del texto para comprobar la relevancia de las palabras de la ecuación de búsqueda dentro del documento, con el fin de encontrar archivos que cumplan con las condiciones y necesidades de búsqueda. Los archivos fueron preseleccionados aplicando criterios de inclusión, como resultado de este primer filtro de clasificación se obtuvieron 178 artículos.

Una vez obtenidos los documentos preseleccionados, se procedió a realizar la siguiente revisión en la cual se analizó el contenido completo de cada archivo; con el fin de verificar que los documentos brindaran información relevante respecto al diseño y parámetros de funcionamiento de los diferentes sistemas de riego, en caso contrario no se incluyeron para la siguiente revisión.

Durante la revisión de texto completo se observó que los sistemas de riego utilizados en hortalizas cultivadas en suelos naturales, presentaban múltiples variables enfocadas en diseños agronómicos (sección 3.2), estos temas corresponden a los conocimientos y habilidades de otras áreas de estudio; por lo cual, se decide enfocar la revisión bibliográfica en cultivos sin suelo (CSS) que permiten mayor control de las variables [56]. Por esta razón, se estableció que aquellos textos que incluyen información sobre sistemas con suelos naturales serían excluidos para la siguiente revisión.

Se descartaron los documentos relacionados con los sistemas hidropónicos de raíz flotante, debido a que esta técnica se utiliza como medio de cultivo, únicamente agua con los nutrientes requeridos para las plantas [23], y no es posible la implementación de un sistema de irrigación, por lo cual, se enfatizaron los resultados que presenten como medio de cultivo sustratos sólidos. Se conservaron los textos que presentaban sistemas hidropónicos NFT (Nutrient Film Technique), a pesar de que emplean como medio de cultivo agua, puesto que las estructuras propuestas en este tipo de sistemas, pueden ser modificadas para cultivos con sustratos sólidos. Los documentos enfocados en la producción de lechuga se destacaron entre los demás, puesto que establecen

parámetros para el cultivo de la hortaliza y brindan información determinante para los análisis posteriores.

Para la revisión de texto completo se seleccionaron 21 documentos para proceder a realizar el filtro final, el cual consistió en la verificación de la bibliografía del documento; con el objetivo de encontrar posibles documentos adicionales que brinden información con respecto al tema establecido. En esta etapa se implementaron los mismos criterios de inclusión y exclusión mencionados anteriormente para ser adjuntados dentro del grupo de archivos seleccionados para su posterior análisis.

### **3.2. Análisis y establecimiento del sistema**

*“Los sistemas de riego en suelo natural requieren del diseño agronómico, en el cual se aborda la adecuación del sistema a todos los parámetros que están relacionados con las condiciones del medio (suelo, cultivos, clima, etc.)”* [57]. Algunos de los parámetros considerados para este diseño son: los elementos climatológicos (temperatura, humedad y viento), la evapotranspiración, el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), la radiación ( $R_s$ ) y la precipitación efectiva, entre otros. Para este proyecto, determinar estos parámetros presenta dificultades de tipo conceptual y de cuantificación ya que el proyecto es meramente teórico.

Por otro lado, los cultivos sin suelo (CSS) implican conocimientos químicos para el monitoreo de los factores que afectan las soluciones nutritivas (pH, conductividad y composición, entre otros) [58]; dentro de las ventajas de la hidroponía se destaca que los rendimientos obtenidos superan significativamente a la producción tradicional en suelo [59], también, en este tipo de sistemas se tiene control completo sobre el desarrollo de las plantas y no existe la competencia por nutrientes [60], al contrario de lo que sucede en los cultivos tradicionales. Asimismo, se mantiene la humedad uniforme [22] y los cultivos están exentos de problemas fitopatológicos relacionados con enfermedades presentes en el suelo [61].

Los CSS más reconocidos son la hidroponía pura (cultivo netamente en agua con solución nutritiva) [58] y los sistemas que utilizan sustratos como medio de cultivo; el presente capítulo se desarrolla con base en el diseño conceptual de un sistema

cimentado en sustrato sólido, esto se establece por las ventajas mencionadas anteriormente y por las razones descritas en la sección 3.1.

### **3.2.1. Cultivo de *Lactuca sativa* (lechuga)**

Como se nombró anteriormente la lechuga se puede cultivar en diferentes sistemas de cultivo, pero el factor determinante para la elección de esta hortaliza, es que, gracias al trabajo desarrollado por Sánchez, se puede ratificar que un biofertilizante a partir de la microalga *Chlorella spp.*, usando como medio de cultivo orina (agua residual), da buenos resultados en la producción de lechuga. Así obteniendo una hortaliza que se puede cultivar con la biomasa que se obtiene en el FBR propuesto en el capítulo anterior.

Los parámetros a tener en cuenta para un buen crecimiento para la lechuga son; la temperatura, la humedad relativa, el pH y el espacio entre plantas. El valor de temperatura debe ser equilibrado y no puede perjudicar el crecimiento de las plantas, este no deberá exceder los 30 °C [62], así que, el rango óptimo sugerido para el crecimiento de la Lechuga con respecto a su temperatura es de 12°C a 20°C. Como lo afirma Guerrero y Revelo [62] junto con Arcos y Benavides [28] este rango es favorable para el desarrollo de la cabeza de la planta de lechuga, obteniendo así buen peso y por consiguiente una buena calidad del producto.

La lechuga es muy sensible a la falta de humedad y soporta mal un periodo de sequía, aunque éste sea muy breve. Así que, se sugiere que la humedad relativa se debe encontrar en un rango entre 60% a 80% [26]. Respaldando lo anterior [28], [63] y [64], en sus trabajos reportan humedades de 75%, 80% y 79%, respectivamente.

Jaques H. y Hernández M. [27] reportan que el valor de pH recomendado para el cultivo de lechuga es de 6.0 a 6.5 y González, Caballero y Aguilar [65] establecen que un pH óptimo para el crecimiento se encuentra entre los 6.2 y 6.5; por otro lado, Zarate Aquino [22] afirma que hasta 7.0 es un valor adecuado para la hortaliza. Por lo tanto, se plantea que el valor de pH adecuado para el cultivo de lechuga es de 6.0 - 7.0. Finalmente, la distancia entre plantas para la siembra puede oscilar entre 20 cm a 30 cm, los datos obtenidos en la revisión afirman que el valor de 30 cm lo reporta Arcos y Benavides [28],

el valor de 25 cm Muños [64] y 20 cm Guerrero y Revelo [62], respaldando el rango sugerido.

### **3.2.2. Sustrato**

El cultivo hidropónico utiliza sustratos solidos como soporte de las plantas en lugar de agua. No existe el sustrato ideal; cada uno presenta una serie de ventajas e inconvenientes y su elección dependerá de las características del cultivo a implantar, las variables ambientales y de instalación [28].

El medio solido carente de actividad biológica, deberá estar libre de plagas o enfermedades, debido a que es peligroso, por tanto, cualquier material que contenga tierra o compost no desinfectados no deben ser agregados, pues los daños por patógenos como nemátodos o fusarium podrían ser fatales en este caso. Este riesgo puede ser superado mediante una cuidadosa desinfección [63].

El sustrato se debe caracterizar por proporcionar un soporte a la raíz, protegiéndolas de la luz y permitiendo un flujo de aire para su respiración. Adicionalmente debe cumplir la función de retener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan [28]. Este elemento deberá ser químicamente inerte, o sea, no debe absorber ni suministrar ningún elemento nutritivo, puesto que esto representaría una alteración en la solución nutritiva [63].

Para poder proporcionar estas características, el sustrato debe cumplir con los siguientes parámetros:

**3.2.2.a. Aireación del sistema radicular.** Una importante condición para el éxito en los cultivos es la respiración suficiente de las raíces. Algunas plantas requieren altas presiones parciales de oxígeno en el ambiente radicular. En consecuencia, el tipo de sustrato y en especial su granulometría son de fundamental importancia. Las raíces respiran el oxígeno contenido en los poros del sustrato. Un adecuado drenaje garantiza la respiración de las raíces. El empleo de un sustrato con estructura estable muy poroso y la aireación complementaria de la solución, evitan el peligro de la falta de oxígeno en la zona radicular, siendo ésta aún mejor que la obtenida en los suelos naturales [63]. Un sustrato excesivamente fino se vuelve compacto, en especial cuando está húmedo e impide el paso del aire. En general la experiencia señala como mejores, aquellos sustratos que permiten la presencia del 15 al 35% de aire [28].

**3.2.2.b. Retención de Humedad.** Al igual que en la aireación sustrato excesivamente fino se vuelve compacto, en especial cuando está húmedo, aconsejando un rango del 20 al 60% de agua en relación con el volumen total [28].

**3.2.2.c. Espacio poroso.** El espacio poroso de un sustrato se subdivide de acuerdo con el tamaño de los poros en macroporos, ( $> 200 \mu\text{m}$ ), mesoporos ( $200 - 30 \mu\text{m}$ ) y microporos ( $< 30 \mu\text{m}$ ). El agua gravitacional circula ampliamente por los macroporos y aun por los mesoporos. El movimiento se va restringiendo paulatinamente a medida que disminuye el tamaño de los poros y finalmente el agua retenida en los poros menores de  $30 \mu\text{m}$  es de muy poca circulación. Estos son los poros que retienen el agua. Entre más pequeños retendrán el agua con mayor fortaleza [63].

**3.2.2.d. Estabilidad física.** La estabilidad será la que determine si se mantiene con el tiempo una porosidad correcta, dependiendo de la velocidad de disgregación y descomposición del material. Esta deberá ser lo más lenta posible. Los materiales más inadecuados son aquellos que se disgregan fácilmente con la acción del agua [63].

Para la elección del material del sustrato se debe tener en cuenta las características y propiedades que lo hagan apto para cultivar, por ello a veces se recurre a mezclar diversos materiales, buscando que unos aporten lo que le falta a otros; siendo un aspecto de mucha importancia la retención de humedad que debe ser en cantidades adecuadas y en forma homogénea determinando la posibilidad a la planta de utilizar el agua como vehículo para sus funciones metabólicas; se debe procurar en la zona de



las raíces, una proporción del 30% de materiales y un 70% de espacio vacío, el cual será ocupado por partes iguales de aire y agua, pudiéndose reducir la parte sólida del sustrato hasta en un 10% [28].

Como lo plantea Barrios [61] un material para ser considerado un buen sustrato debe cumplir con las siguientes características:

**Tabla 2.**

*Características sustrato solido*

CARACTERÍSTICAS DE UN BUEN SUSTRATO SOLIDO	
a	Que las partículas que lo componen tengan un tamaño no inferior a 0.2 mm y no superiores a 7 mm.
b	Que retengan una buena cantidad de humedad, pero que además faciliten la salida de los excesos de agua.
c	Que no retengan humedad en su superficie.
d	Que no se descompongan o degraden con facilidad.
e	Preferiblemente que tengan coloraciones oscuras.
f	Que no contengan elementos nutritivos.
g	Que no contengan microorganismos perjudiciales a la salud de los seres humanos o de las plantas.
h	Que no estén contaminados con residuos industriales o humanos.
i	Que sean abundantes y fáciles de conseguir, transportar y manejar.
j	Que sean de bajo costo.

**Nota.** La tabla evidencia las características que se deben considerar en un sustrato sólido para el cultivo de lechuga. Tomado de: N. E. Barrios Arreaga, Evaluación del cultivo de la lechuga, *lactuca sativa l.* bajo condiciones hidropónicas en pachalí.

El sistema de cultivo sólido se divide en cultivo en agregado, cultivo en grava y técnicas misceláneas. El cultivo en agregado comprende a todos aquellos métodos que utilizan como sustrato la arena o agregados que posean propiedades semejantes como perlita, vermiculita, aserrín y otros [61].

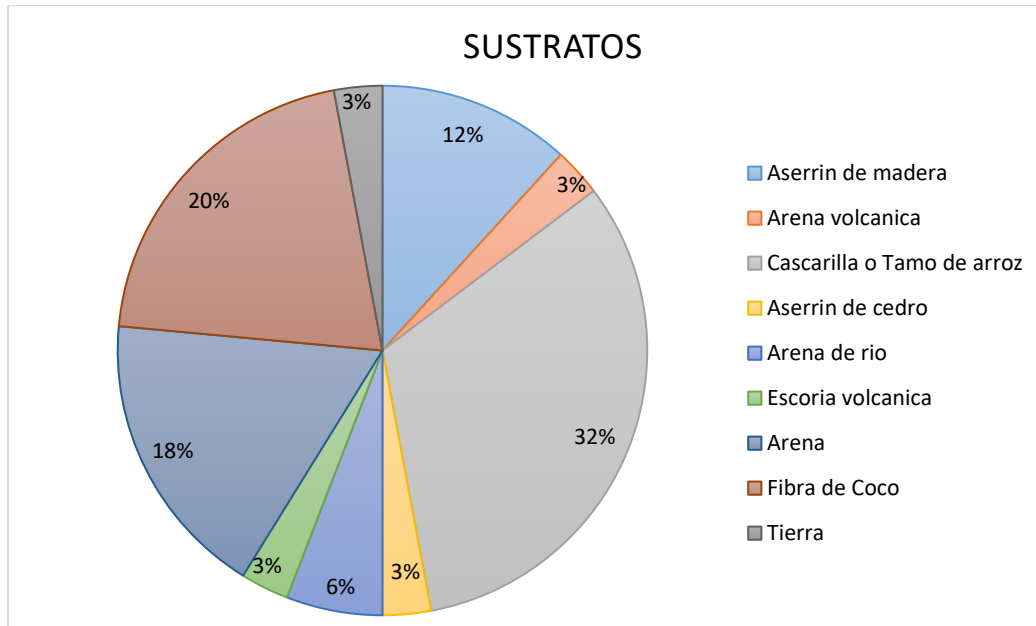
### **3.2.3. Tipos de sustratos**

**3.2.3.a. Sustratos orgánicos.** Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica. Son polímeros orgánicos biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (Elastómeros (termoplásticos, termoestables), celulosos semisintético, etc.). También se les consideran a subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas. La mayoría de los materiales de este grupo deben experimentar un proceso de compostaje, para su adecuación como sustratos (cascarillas de arroz, pajas de cereales, fibra de coco, orujo de uva, cortezas de árboles, aserrín y virutas de la madera, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, etc.)[66].

**3.2.3.b. Sustratos Inorgánicos o minerales.** Se obtienen a partir de rocas o minerales de diverso origen, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc.). y algunos son transformados o tratados, partiendo de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos, se modifican notablemente las características de los materiales de partida (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida, etc.). También se les considera a los residuos y subproductos industriales, como los materiales procedentes de muy distintas actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, etc.)[66]

**Figura 15.**

*Gráfico circular de Tipos de Sustratos*



**Nota.** El gráfico elaborado con la herramienta *Excel* permite visualizar los sustratos generalmente usados para el cultivo de lechuga y las diferentes variedades presentadas en los documentos de la revisión bibliográfica.

Con respecto al análisis realizado en los documentos extraídos por la revisión sistemática Figura 15, los sustratos sólidos más usados para el cultivo de lechuga son la cascarilla de arroz, fibra de coco, aserrín y arena. Estos no suelen estar puros, como se dijo anteriormente, son más aptos para cultivar si se mezclan varios materiales.

Como se puede observar en el trabajo de Barrios [61], se usan varias mezclas de sustratos donde la mayoría realizan una combinación entre un sustrato orgánico y otro inorgánico, variando así mismo las proporciones entre ellos. Las mezclas usadas se muestran en la tabla 3:

**Tabla 3.**

*Mezclas de sustratos con una base de cascarilla de arroz.*

No	Sustrato base	Sustrato adicional
1	50 % de cascarilla de arroz	50 % de escoria volcánica.
2	80 % de cascarilla de arroz	20 % de aserrín de cedro o caoba.
3	50 % de cascarilla de arroz	50 % de arena de río.
4	50 % de cascarilla de arroz	50 % de arena volcánica (pómez).
5	50 % de cascarilla de arroz	40 % de escoria volcánica y 10 % de aserrín.

**Nota.** La tabla muestra las diferentes mezclas de sustratos sólidos para el cultivo de lechuga, tomando como sustrato base la cascarilla de arroz. Tomado de: N. E. Barrios Arreaga, Evaluación del cultivo de la lechuga, *lactuca sativa l.* bajo condiciones hidropónicas en pachalí.

Donde concluye que al realizar cultivo de lechuga se debe usar el sustrato sólido compuesto por 50 % de cascarilla de arroz y 50 % de arena blanca puesto que se tiene un menor costo total, se obtiene mayor rendimiento por caja y a la vez el manejo es más fácil y seguro [61].

Por otro lado Yance [64] decide hacer tres comparaciones, la primera es la combinación entre cascarilla de arroz y arena, variando el porcentaje de cada uno de los sustratos, en la segunda comparación realiza la mezcla de aserrín de madera y arena al igual que la primera, varían los porcentajes de la cantidad de los sustratos. La tercera se decide solo analizar la arena como sustrato sin ninguna otra adición de material.

**Tabla 4.**

*Mezclas de sustratos*

No	Sustrato 2	Sustrato 1
1	50 % de cascarilla de arroz	50 % de arena
2	40 % de cascarilla de arroz	60 % de arena
3	30 % de cascarilla de arroz	70 % de arena
4	50 % de aserrín de madera	50 % de arena
5	40% de aserrín de madera	40 % de arena
6	30 % de aserrín de madera	70 % de arena
7	100% de aserrín de madera	0

**Nota.** La tabla muestra las diferentes mezclas de tres sustratos sólidos para el cultivo de lechuga. Tomado de: M. A. Yance Muños, Establecimiento del cultivo hidropónico de Lechuga (*Lactuca sativa L.*) variedad Great Lakes 188, mediante la utilización de diferentes tipos de sustratos sólidos en la zona de Babahoyo.

Yance [64] concluye que el mayor rendimiento de lechuga se obtuvo con el sustrato arena 100 %, pero, los comportamientos agronómicos aceptables de las plantas se dieron en las mezclas de sustrato de cascarilla de arroz el 30% más arena 70%, las diferentes mezclas presentadas en este estudio se visualizan en la tabla 4. Por otro lado, el uso del sustrato de aserrín de madera no es apropiado para el cultivo de lechuga, debido a que arrojaron los valores más bajos de producción de lechuga en kilogramos por hectárea [64].

El último documento que realiza mezclas de sustratos para el cultivo de lechuga es el de Guerrero y Revelo [62], donde realiza la mezcla de los dos sustratos más usados para el cultivo de lechuga, la cascara de arroz y la fibra de coco; realiza varios tratamientos presentados en la tabla 5, donde varía el porcentaje en cantidad de los dos sustratos, para analizar su rendimiento.

**Tabla 5.**

*Mezclas de los sustratos cascarilla de arroz y fibra de coco*

No	Sustrato 1	Sustrato 2
1	100 % de cascarilla de arroz	0
2	70 % de cascarilla de arroz	30 % de fibra de coco
3	50 % de cascarilla de arroz	50 % de fibra de coco
4	30 % de aserrín de madera	70 % de fibra de coco
5	0	100 % de fibra de coco

**Nota.** La tabla muestra las mezclas entre la cascarilla de arroz y la fibra de coco, como sustratos sólidos para el cultivo de lechuga, variando entre ellos sus proporciones. Tomado de: E. M. Guerrero y J. C. Revelo, Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de pasto.

Una vez estuvieron listos los sustratos se humedecieron hasta un punto de saturación y se combinaron en proporciones de acuerdo a la proporción establecida, Durante el desarrollo del trabajo, los mejores resultados se obtuvieron con una mezcla de 70% fibra de coco más 30% cascarilla de arroz, seguido de 50 % cascarilla de arroz más 50% fibra de coco y finalmente 70% cascarilla de arroz más 30% fibra de coco; en los cuales no se presentaron diferencias; los valores más bajos se obtuvieron con el uso de 100% fibra de coco y 100% cascarilla de arroz [62]. Llegando a la afirmación que las mezclas de los dos sustratos obtuvieron mejor respuesta que los sustratos individuales, los cuales dieron plantas con mejor desarrollo fisiológico en las variables diámetro peso de cabeza, y rendimiento [62].

Con respecto a toda la información recolectada anteriormente se recomienda el uso de los siguientes sustratos compuestos para el sistema de fertirrigación, los cuales se visualizan en la tabla 6.

**Tabla 6.**

*Resultados de los mejores sustratos*

No	Sustrato
1	30 % de fibra de coco + 70% Cascarilla de arroz
2	50 % de fibra de coco + 50% Cascarilla de arroz
3	70 % de fibra de coco + 30% Cascarilla de arroz
4	30% Cascarilla de arroz + 70% Arena
5	50% Cascarilla de arroz + 50% Arena

**Nota.** La tabla muestra las mejores mezclas entre la cascarilla de arroz, la fibra de coco y arena, propuestas para el proyecto como sustratos sólidos en el cultivo de lechuga.

Estos tres materiales se caracterizan por tener un bajo costo, son de un fácil manejo y son seguros [61]. La utilización del sustrato de aserrín de madera se descarto debido a que Yance [64] afirma en su trabajo que no es apropiado para el cultivo de lechuga.

Para el cultivo se recomienda el uso de cualquiera de los 5 tipos de sustratos propuestos anteriormente ya que son los que presentaron mejores resultados en los diferentes documentos de la revisión sistemática, además de ser materiales de fácil acceso en Colombia.

#### **3.2.4. Suspensión nutritiva (SN)**

La solución nutritiva es la base de la alimentación de las plantas [63], además de los elementos que los vegetales extraen del aire y del agua (carbono, hidrógeno y oxígeno), consumen en grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio; estos macronutrientes son brindados a las plantas mediante la mezcla de fertilizantes disueltos en agua [64].

Comúnmente las plantas absorben estos elementos del suelo por medio de las raíces. Sin embargo, en el sistema propuesto no se utiliza suelo, razón por la cual, es necesario aplicar la solución nutritiva que contiene los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas [63].

Las microalgas tienen un gran potencial como biofertilizantes y acondicionadores de suelo; juegan un papel importante como una de las principales fuentes de fijación atmosférica de nitrógeno, convirtiéndolo en formas disponibles como el amonio, necesario para el crecimiento de las plantas [9], asimismo, contribuyen al bio-control de plagas agrícolas [3]. La biomasa microalgal en general representa un aporte de nutrientes como un abono agrícola muy completo [1].

El género *Chlorella* ha sido el más utilizado para la biofertilización, principalmente porque aporta altas cantidades de macro y micronutrientes (tabla 7), y factores promotores del crecimiento como citoquininas. Esto permite reducir la cantidad necesaria de fertilizantes químicos para los cultivos, mejorando el pH y la conductividad eléctrica del medio [9].



**Tabla 7.***Composición elemental de la microalga chlorella.*

Elemento	% en peso	Composición elemental por % en peso	
		Min	Max
<b>Macro elementos</b>			
N	7.7	6.2	7.7
P	2	1.0	2.0
K	1.62	0.85	1.62
Mg	0.8	0.36	0.8
S	0.39	0.28	0.39
Fe	0.55	0.04	0.55
<b>Micro elementos</b>			
Ca	0.08	0.005	0.08
Zn	0.005	0.0006	0.005
Cu	0.004	0.001	0.004
Mn	0.01	0.002	0.001
B	0.0026	-	0.0026
Mo	0.001	-	0.001
Co	0.001	-	0.001

**Nota.** La tabla muestra los valores de la composición elemental de las especies *chlorella* según lo reportado por Oh-Hama y Miyachi (1988). Tomado de: R. K. Mandalam y B. Ø. Palsson, Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures.

Faheed y Fattah [67] evaluaron el efecto de *Chlorella vulgaris* como biofertilizante sobre plantas de lechugas y registraron que las microalgas funcionan como nutrientes para las plantas obteniendo un incremento de hasta el 186% en características como crecimiento, contenido de biomasa y pigmentos en plántulas fertilizadas con microalgas

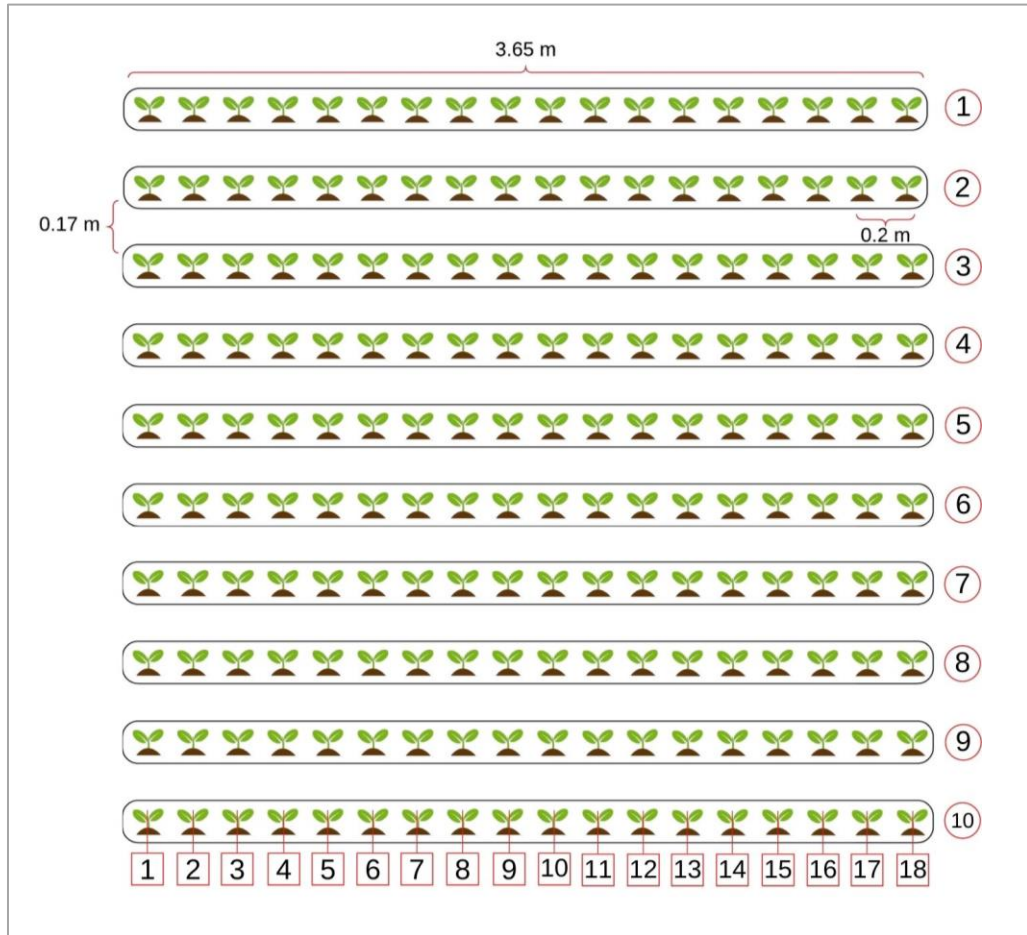
[9]; asimismo, evidenciaron que se atribuye a la reducción de la contaminación ambiental al minimizar la aplicación de fertilizantes inorgánicos.

El estudio presentado por Ergun, Dasgan e Isik [68] mostró que utilizar *Chlorella* en la solución nutritiva aumentó el contenido de los sólidos solubles totales (brix) y vitamina C en la lechuga, por lo que concluyen que la microalga puede aumentar las propiedades de calidad de la hortaliza. Finalmente con la tesis presentada por Sánchez [40] se ratifica la selección de la microalga propuesta para la solución nutritiva; en el estudio confirman que la biomasa microalgal si es eficiente como fertilizante, al realizar 3 experimentos con *chlorella* tanto en suelo como en suelo estéril se favoreció el crecimiento de la planta y recuperación del suelo.

Con el objetivo de determinar la cantidad de lechugas que pueden ser cultivadas de acuerdo a los parámetros del reactor presentado en la sección 2.3., se consideran los datos presentados por Djidonou y Leskovar [69] para una bahía NFT, la cual consiste en 10 canales de 3.65 m de longitud separados uno del otro a 0.17 m de distancia, cada canal con 18 plantas separadas a una distancia de 0.2 m dentro del canal (Figura 15) con los datos presentados se establece que el área por bahía es igual a 6.205 m<sup>2</sup>.

**Figura 16.**

*Estructura de cultivo planteado por Djidonou y Leskovar*



**Nota.** Representación gráfica de una bahía NFT descrita por Djidonou y Leskovar en “*Seasonal Changes in Growth, Nitrogen Nutrition, and Yield of Hydroponic Lettuce*”.

Como se visualiza en la tabla 2, aparte del carbono, el hidrógeno y el oxígeno, la microalga está compuesta principalmente por nitrógeno (7.7%) el cual es vital para el crecimiento de la hortaliza. Una vez seleccionado el nitrógeno como el nutriente limitante y considerando que Djidonou y Leskovar [69] proporcionan 300 L de solución nutritiva por bahía con una concentración de nitrógeno de 100 mg/L cada 35 días aproximadamente, se realizaron los cálculos correspondientes para la adaptación del sistema con sustrato sólido:

$$\frac{18 \text{ lechugas}}{\text{canal}} * \frac{10 \text{ canales}}{1 \text{ bahía}} = 180 \frac{\text{lechugas}}{\text{bahía}}$$

$$\frac{300 \text{ L}}{\text{bahía}} * \frac{\text{bahía}}{180 \text{ lechugas}} = 1.67 \frac{\text{L}}{\text{lechuga}}$$

$$\frac{1.67 \text{ L}}{\text{lechuga}} * \frac{100 \text{ mg N}}{\text{L}} = 167 \frac{\text{mg N}}{\text{lechuga}} \text{ cada 35 días}$$

Como se presenta en la tabla 1 la producción máxima de biomasa aproximada es de 0.5 g/L día para un reactor de 20 L, entonces el reactor tendría la capacidad de suministrar la siguiente cantidad de nitrógeno:

$$0.5 \frac{\text{g Chlorella}}{\text{L día}} * 0.077 \frac{\text{g N}}{\text{g Chlorella}} * \frac{1000 \text{ mg N}}{\text{g N}} = 38.5 \frac{\text{mg N}}{\text{L día}}$$

$$\frac{38.5 \text{ mg N}}{\text{L día}} * 35 \text{ días} * 20 \text{ L} = 26950 \text{ mg N}$$

Finalmente, considerando la cantidad de nitrógeno asociado a microalgas que sería capaz de producir el reactor propuesto y el requerimiento de este elemento para cada planta de lechuga de acuerdo Djidonou y Leskovar [69] , se estableció el número de lechugas aptas para el cultivo, con un reactor de 20 L en 35 días:

$$26950 \text{ mg N} * \frac{\text{Lechuga}}{167 \text{ mg N}} = 161 \text{ lechugas}$$

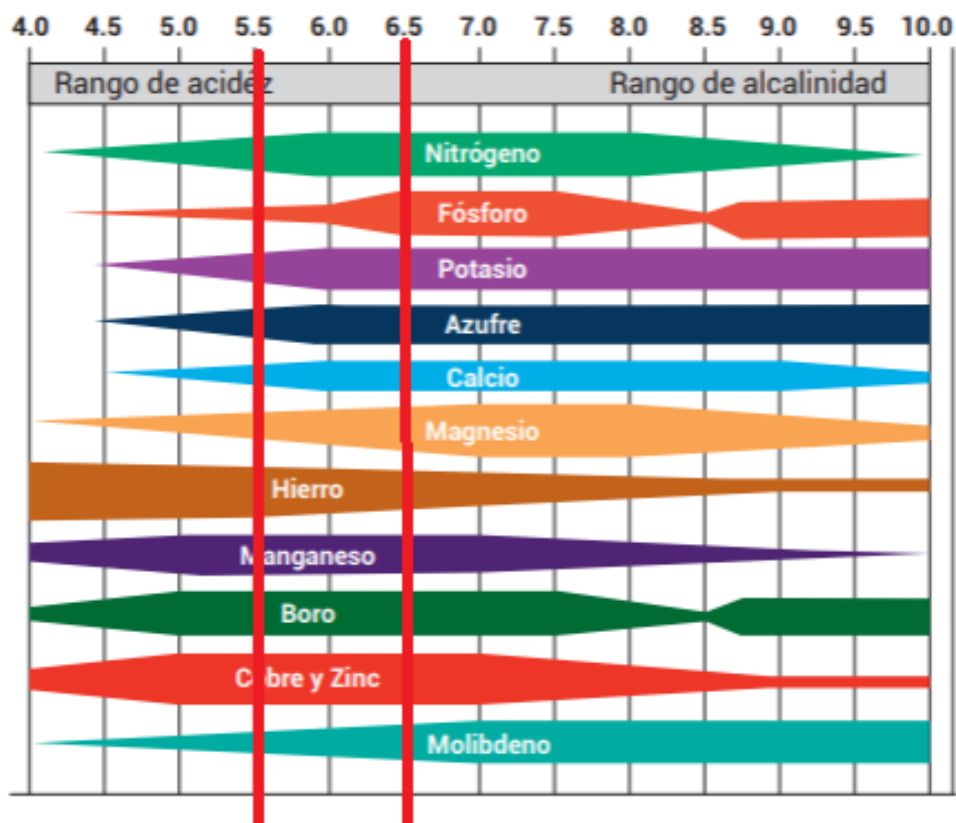
De tal forma se determina que el reactor de 20 L propuesto en la sección 2.3. tiene la capacidad de suministrar el nitrógeno necesario para un cultivo de 161 lechugas. De acuerdo a la literatura los parámetros usados para controlar la calidad de la solución nutritiva de los sistemas hidropónicos son los siguientes:

**3.2.4.a. pH.** Esta variable es una de las más importantes puesto que la disponibilidad de nutrientes varía de acuerdo al pH de la solución nutritiva [61]. En el apartado 3.2.1. se define el valor de pH adecuado para el cultivo de lechuga de 6.0 a 7.0 , sin embargo, en el seminario web de Hanna Instruments [24] se afirmó que el rango óptimo para la solución nutritiva es de 5.5 a 6.5 y Lara Herrera [70] asegura que para evitar la precipitación de los nutrientes el pH de la SN debe estar entre 5.5 y 6.0; por otro lado Inca Sánchez [59] muestra que en un rango de 6.0 a 6.5 todos los nutrientes se encuentran disponibles.

Es importante mantener el registro de los valores de pH de la solución nutritiva para que todos los nutrientes se encuentren disponibles; de acuerdo a las referencias mencionadas y como se visualiza en la figura 17, en un rango de pH desde 5.5 a 6.5 están disponibles tanto micronutrientes como macronutrientes y la raíz de la planta es capaz de absorberlos.

**Figura 17.**

*Disponibilidad de nutrientes en relación con el pH*



**Nota.** La figura permite visualizar la disponibilidad de nutrientes en función del pH de la solución nutritiva y el rango propuesto. Tomado de: R. Lizcano Toledo et al., Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos.

Un pH fuera del rango provoca deficiencia de los nutrientes aunque estén presentes en la solución nutritiva [22] Hacia pH muy ácidos (por debajo de 4.5) se disminuye la capacidad de la planta para la asimilación de macronutrientes, por el contrario en rangos alcalinos o básicos se tiene disponibilidad de macronutrientes pero disminuyen los micronutrientes que son importantes en estados fenológicos del cultivo [24]. Los fertilizantes pueden afectar el pH original del agua, cuando se presentan rangos ácidos, [22] sugiere corregir el pH por medio de hidróxido de potasio y en caso de rangos alcalinos emplear ácido sulfúrico o fosfórico diluido.

**3.2.4.b. Conductividad eléctrica (CE).** La conductividad eléctrica indica el contenido de sales de la solución nutritiva, la medición de este parámetro se puede realizar con un medidor portátil denominado conductímetro, La unidad de medida es en milisiemes (mS/cm) [61]. Es uno de los parámetros más útiles para determinar la cantidad de fertilizante a aplicar [62] La utilidad de este parámetro se basa en el concepto de la proporcionalidad de la conductividad eléctrica de una solución en relación a la concentración de sales disueltas [59].

Jaques Hernández [27] afirma que los valores adecuados de CE para los cultivos generalmente son 1.5 – 3.0 dS/m, Inca Sánchez [59] señala que el valor óptimo es de 1.3 ds/m y Barrios Arreaga [61] asegura que el rango para el adecuado crecimiento del cultivo se encuentre entre 1.5 a 2.5 dS/m. Por lo tanto se establece que los valores de la CE deben encontrarse en un rango de 1.5 – 3.0 dS/m, puesto que Guerrero y Revelo [62] manifiestan que si se presentan valores menores a 1.5 dS/m la SN debe renovarse totalmente, en caso contrario si los valores de CE se encuentran sobre el límite del rango se debe agregar agua [61], por lo cual, se recomienda que la medición del nivel de CE sea realizada diariamente o, en su defecto, semanalmente para poder realizar correcciones si este parámetro se encontrase fuera del rango.

**3.2.4.c. Temperatura .** La temperatura de la SN influye en la absorción de nutrimentos [70] y depende de cada planta, según [71] este parámetro afecta el balance de oxígeno de la solución nutritiva. Conforme se incrementa la temperatura, la cantidad de oxígeno del agua disminuye, la falta de oxígeno hace más susceptibles a las plantas a ataques de patógenos.

En los estudios analizados se plantea que a temperaturas entre 10 a 13 °C se disminuye la absorción y asimilación de nutrientes como N, P y K en cultivos hidropónicos [72]. Para la lechuga, Pachón Camelo [73] afirma que se debe mantener la SN entre 17 a 28 °C y en el estudio de Fernández Navarro [72] determinan que cuando la temperatura se encuentra entre los 20 a 25°C se incrementa la absorción.

Plantas como la lechuga presentan problemas nutricionales a temperaturas superiores a 27 °C y su temperatura ideal es alrededor de los 18 °C , Según [70] con temperaturas menores a 15 °C las plantas son incapaces de captar fosforo. Teniendo en cuenta la

información presentada por los autores mencionados, se concluye que las temperaturas entre 17-26 °C permitirán el correcto desarrollo de las plantas. En los estudios revisados se plantea que a temperaturas entre 10 a 13 °C se disminuye la absorción y asimilación de nutrientes como N, P y K en cultivos hidropónicos [72]. Para la lechuga Pachón Camelo [73] afirma que se debe mantener la SN entre 17 a 28 °C, en el estudio de Fernández Navarro [72] se infiere que cuando la temperatura se encuentre entre los 20 a 25°C se incrementa la esta absorción.

### **3.2.5. Sistema estructural**

Los contenedores pueden ser de la forma que se prefieran y casi de cualquiera material (acrílico, plástico, madera, aluminio y entre otros), el metal es poco recomendable debido a la posible oxidación resultante de la reacción con la solución nutritiva [22].

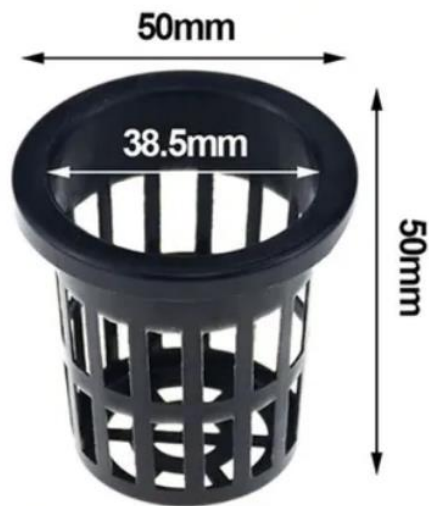
La distancia entre plantas se determina por el tipo de cultivo. Para el cultivo de lechuga, Zárate Aquino [22] propone una distancia entre plántulas de 0.3 m. En otro orden de ideas, Djidonou y Leskovar [69] plantearon el montaje experimental para el sistema NFT con sustrato líquido y Guerrero y Revelo [62] elaboraron una estructura escalonada usando sustrato sólido. Cabe resaltar que esta estructura también es empleada en sistemas con sustrato líquido; ambos estudios establecen una distancia de 0.2 m entre cada planta. Por lo tanto, como se determinó previamente en el apartado 3.2.1., la separación adecuada para el cultivo puede ser de 0.2 m a 0.3 m entre cada plántula.

Según las características de las estructuras se puede determinar la distribución de las plantas y la geometría, así como estimar el aprovechamiento del espacio disponible y de la estructura generada [23]. Como se establece en el apartado 3.2.4. el cultivo base planteado es de 161 plantas; considerando el estudio realizado por Guerrero y Revelo [62] se propone la construcción de una estructura en "A" o también llamada sistema de producción escalonada [62] para el desarrollo del cultivo, ya que esta estructura angular permite el aprovechamiento de alturas y profundidad. La distribución de la plantación es vertical en canales horizontales con alturas fijas y una pendiente del 2% para facilitar el riego y el drenaje [23]. Se plantea la distribución del cultivo en 9 canales con 16 plantas y 1 canal con 1 plantas, cada uno ubicadas en canastas netpot (figura 18), para un total de 161 plantas de lechuga.



**Figura 18.**

*Canasta netpot*

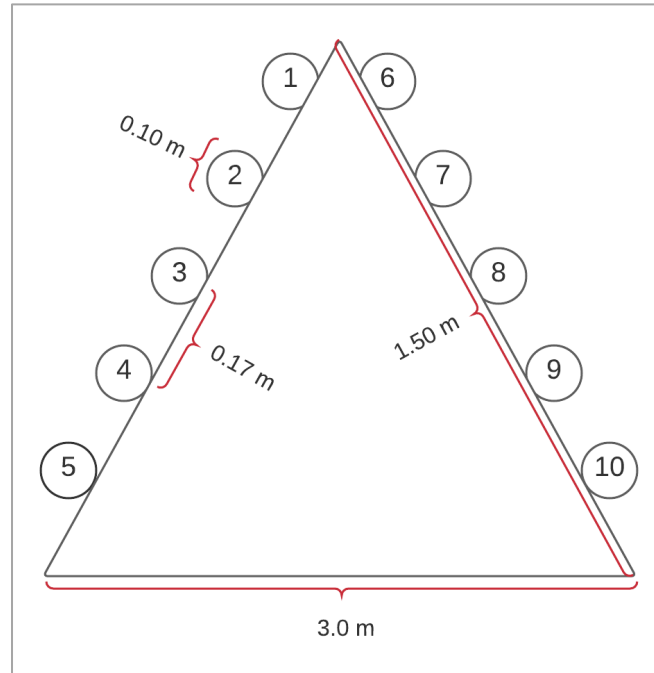


**Nota.** La figura presenta la canasta *netpot* sugerida para el cultivo hidropónico. Tomado de: <https://articulo.mercadolibre.com.co>

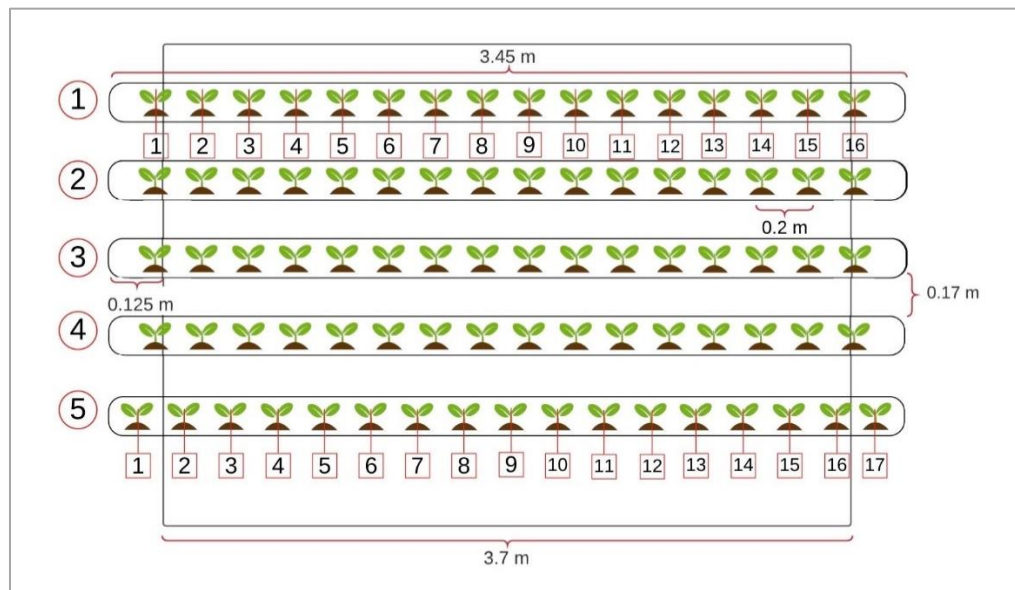
Para asegurar la estabilidad de la estructura se sugiere la construcción en madera junto con el uso de un sistema de cama individual con tuberías PVC (4 pulgadas), ubicando una plántula por agujero. Se sugiere el uso de este material debido a su bajo costo y fácil acceso. Las dimensiones aproximadas para la propuesta del sistema estructural son presentadas en la figura 19. Estas dimensiones pueden ser modificadas para futuros estudios de acuerdo al espacio disponible, únicamente garantizando la distancia entre cada plántula (0.2 m – 0.3 m) para su crecimiento adecuado.

**Figura 19.**

*Propuesta sistema estructural*



(a) Vista lateral



(b) Vista frontal

**Nota.** La figura representa la estructura de la bahía para el cultivo propuesto, este diseño se fundamentó en las investigaciones de Guerrero y Revelo y Djidonou y eskovar.

### **3.2.6. Sistema de riego**

Los sistemas hidropónicos en sustratos de interés pueden ser irrigados mediante sistemas de riego por goteo, subirrigación o exudación; mediante distribución continua, periódica o manteniendo la circulación de la solución a un nivel constante [74]. El riego es un factor limitante del cultivo de lechuga, las deficiencias de agua reducen el rendimiento del cultivo y el riego excesivo puede llegar a producir asfixia radicular [75].

Durante la revisión de la bibliografía seleccionada, se consideró inicialmente el sistema de riego por goteo. A pesar de ser un sistema eficiente en el aprovechamiento del agua y adecuado para el cultivo de lechuga por utilizar pequeños caudales a presiones constantes [76], se descartó este tipo de irrigación, puesto que el principal problema que puede sufrir los equipos de riego es la obstrucción del gotero [77], esta factor podría implicar complicaciones al emplear una suspensión nutritiva de microalgas, asimismo, para el diseño del sistema se debe tener en cuenta una serie de parámetros agronómicos que tienen que ver con la planta a cultivar, el ambiente en que se cultiva y entre otros; por lo cual realizar el diseño de sistema de riego por goteo fue considerado inviable.

Por otro lado, el sistema de subirrigación además de ahorrar agua, facilita el manejo de los parámetros de la SN al mantenerlos estables, este sistema permite la uniformidad del riego y reduce la compactación del sustrato proporcionando cultivos más uniformes [78]. En este método es necesario determinar el tiempo de riego y la lámina de riego, factores que dependen del tipo de planta a trabajar.

**3.2.5.a. Lamina y tiempo de riego en subirrigación** . Según Reed [79] como regla general para llevar a cabo el sistema de subirrigación, se debe inundar alrededor del 20 a 25% de la altura del contenedor, para el cultivo propuesto se sugiere el uso de canastas netpot (figura 17), entonces, el riego se suministraría a una profundidad aproximada de 10 mm a 12.5 mm, para que pueda distribuirse a la zona radical por capilaridad.

La suspensión debe permanecer un tiempo determinado para evitar daños por anegamiento, este factor depende de la composición del sustrato y especie a trabajar, Santamaria [80] y Rangel [78], irrigaron durante  $20 \pm 30$  min, por otro lado, Ferrarezi

[81], lo realizó diariamente durante 3 min usando un temporizador. Ken y Reed [79] señalan que el tiempo ideal sería de 10 min a 15 min, pero si se desea enfocar el tiempo de riego en la eficiencia en el uso del agua, el estudio de [82] mostró que se mejoró entre un 20% y 30% mediante la adopción de un periodo de 3 a 5 minutos en comparación con una duración de 10 min a 15 min.

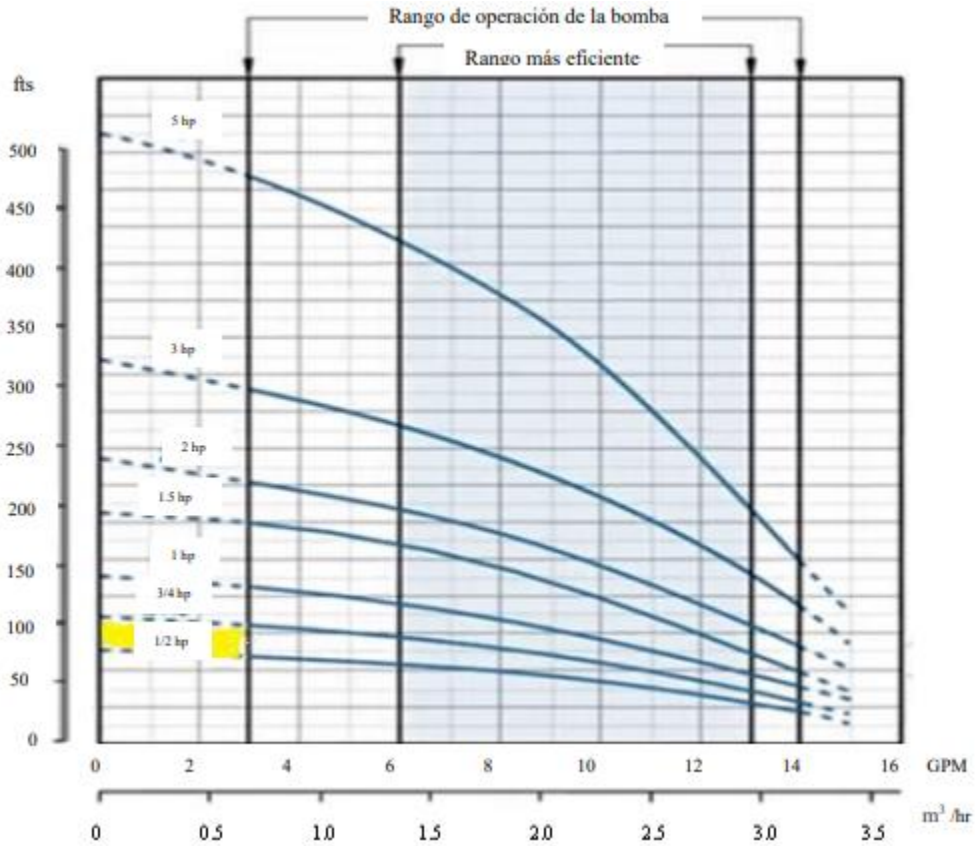
**3.2.5.b. Equipo de Bomba.** La función principal de la bomba es proporcionar el flujo y la presión que requiere el sistema de riego. La característica funcional de los equipos de bombeo es que, dentro de un cierto límite operativo, al cambiar la carga hidráulica, el flujo cambiará, es decir, cuanto mayor sea la carga operativa, menor será el flujo entregado y viceversa [83].

El sistema representa una técnica que impulsa la suspensión nutritiva por medio de una bomba sumergible, a través de una serie de tuberías y una lámina fina, la cual pone en contacto el sustrato que contiene las raíces de la planta con la suspensión, facilitando la circulación del líquido [65].

Como lo expone Murcia y Chacón [84], en su trabajo de grado, para poder seleccionar la bomba requerida en el sistema, se debe tener en cuenta la distancia total en pies del plano de la tubería donde pasaría la solución nutritiva. Para esto se tiene en cuenta que el sistema de riego posee aproximadamente una distancia total recorrida por la tubería de 45.2m, que al considerarlos en unidades de “ft” se obtiene un valor de 148.3 ft.

**Figura 20.**

*Gráfico selección de bomba*



**Nota.** La figura muestra los parámetros requeridos para la selección de la bomba y sus respectivos según lo reportado por Frankin Electrics. Tomado de: J. D. Murcia Vélez y L. F. Chacón Segura, Diseño de un sistema automático de cultivo hidropónico para forraje verde.

De acuerdo a la Figura 20, mediante el valor obtenido de la distancia recorrida, se determina que la bomba sumergible debe trabajar con una potencia entre los 1.5 hp y 3 hp.

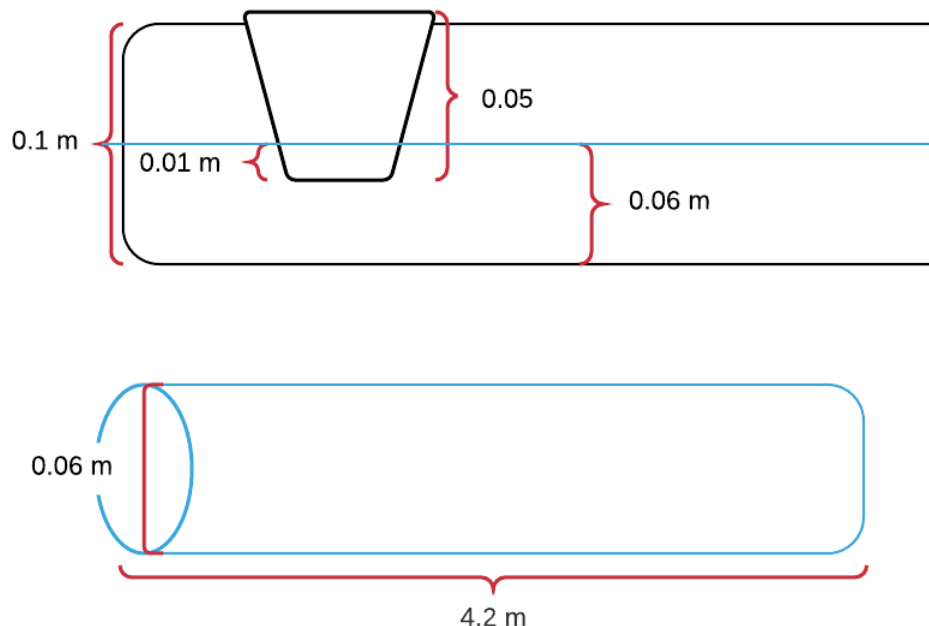
Guerrero y Revelo [62], para el cultivo de 100 plantas de lechuga en sustrato sólido, consideran una bomba con 0.75 hp, por lo tanto, el valor propuesto es congruente para el sistema de riego planteado. Adicionalmente, Alveal [76] afirma que la bomba debe trabajar con baja potencia, debido a que se necesita que el flujo del líquido sea

constante y de baja velocidad para que los nutrientes sean absorbidos por las plantas. Además, se aconseja que todas las líneas de distribución cuenten con una pendiente, en el apartado 3.2.5. se determinó una inclinación de 2%, ya que esto ayuda a que el fluido circule por el efecto de la gravedad, sin sumar cargas al sistema de bombeo.

**3.2.5.c. Contenedor de Almacenamiento.** Consiste en un depósito de suspensión nutritiva, que suele ser cilíndrico, fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con el fin de soportar la presión interna. El contenedor de almacenamiento tiene dos interfaces (una entrada y una salida), generalmente con conexiones para introducir la solución de fertilizante en la red de riego [85].

**Figura 21.**

*Distribución interna el sistema de riego*



**Nota.** El esquema presenta las dimensiones aproximadas para el cálculo de la cantidad de agua requerida para el sistema.

Para determinar la capacidad en litros de la cantidad total de agua necesaria, se consideró que el agua suministrada se adapta a la forma cilíndrica del tubo, entonces, se calculó el volumen del cilindro formado el cual se puede visualizar en la figura 21, para obtener la lámina de riego sugerida (10mm a 12.5mm). El valor obtenido de 120 L

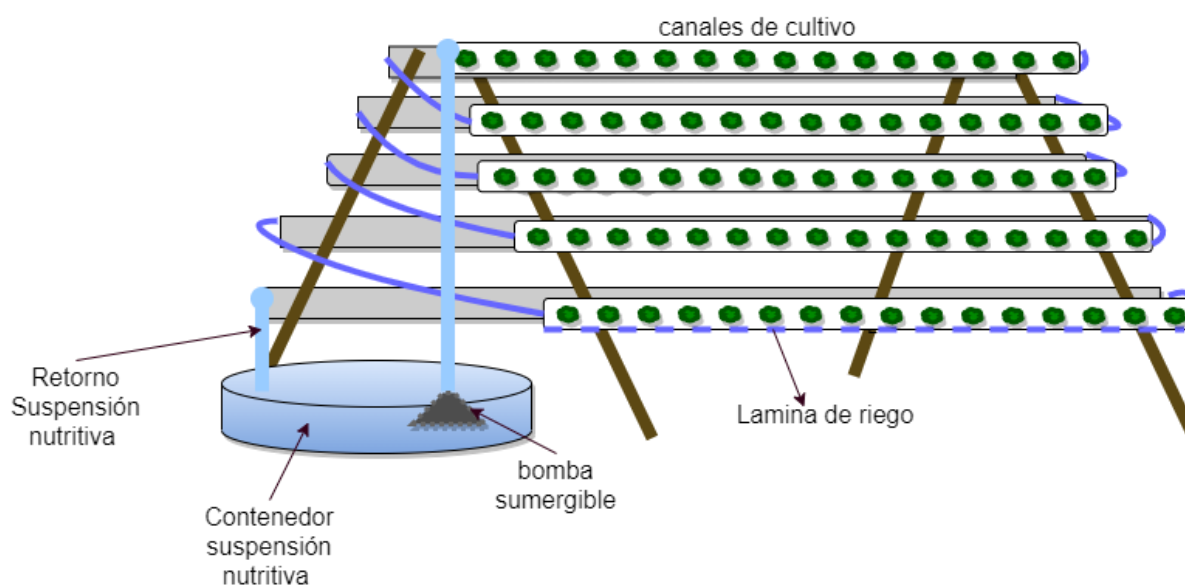
implica que el contenedor debe tener como mínimo esta capacidad de almacenamiento de agua.

### 3.2.7. Propuesta sistema de riego

Mediante la revisión bibliográfica de los textos seleccionados y con los diferentes análisis presentados previamente en los apartados del capítulo 3, se define la propuesta del sistema de riego para el cultivo en sustrato, la cual se presenta de manera esquemática en la figura 22.

#### Figura 22.

*Propuesta sistema de fertiirrigación*



**Nota.** El esquema presenta la propuesta planteada por las autoras del sistema de fertiirrigación para el cultivo de lechuga

#### 4. ALTERNATIVA DE UN SISTEMA DE BIOFERTIRRIGACIÓN

Una vez establecidas las propuestas de los capítulos 2 y 3, se procede a realizar el diseño conceptual del sistema de biofertilización. Inicialmente se define el proceso de disposición de la biomasa requerida para el contenedor de suspensión nutritiva, como se menciona en el apartado 3.2.4., las plantas requieren de una cantidad específica de nitrógeno provisto por el biofertilizante para su crecimiento.

Las plantas aprovechan el nitrógeno dispuesto por la suspensión nutritiva, por lo cual, es necesario compensar esta pérdida manteniendo constantemente la producción de biomasa microalgal para que el macronutriente esté disponible en el sistema durante el tiempo de cultivo establecido previamente. Con el objetivo de mantener este suministro se debe asegurar que la producción de microalgas, en lo posible, se encuentre en un estado estable.

Para la producción de biomasa se plantea la fase inicial de arranque, para ello, se adiciona un barrido de la cepa *Chlorella spp.* en un matraz con capacidad menor a 1 L provisto con las condiciones adecuadas para el crecimiento de la microalga (capítulo 2), de esta manera se realiza el primer escalamiento. Posteriormente se continúa con el escalamiento trasladando a un recipiente de mayor capacidad, el contenido con biomasa microalgal; una vez se visualice suficiente densidad celular se procede a agregar la biomasa producida para su inoculación en un reactor *batch* de 20 L (Reactor 1). En el momento que se observe densidad celular en el “reactor 1”, se sugiere retirar la mitad de la biomasa microalgal obtenida, para ser agregada como inóculo para un segundo reactor *batch* con la misma capacidad (reactor 2), con el fin de acelerar el proceso de obtención de suspensión nutritiva para el sistema de biofertilización.

Cuando se logre la cantidad de biomasa mínima requerida para suplir los nutrientes del cultivo de lechuga, por medio de los 2 reactores, se procede a verter la biomasa directamente al contenedor de la suspensión nutritiva. Para reemplazar la pérdida de nutrientes mencionada anteriormente, se sugiere mantener el uso de un solo FBR de flujo continuo.

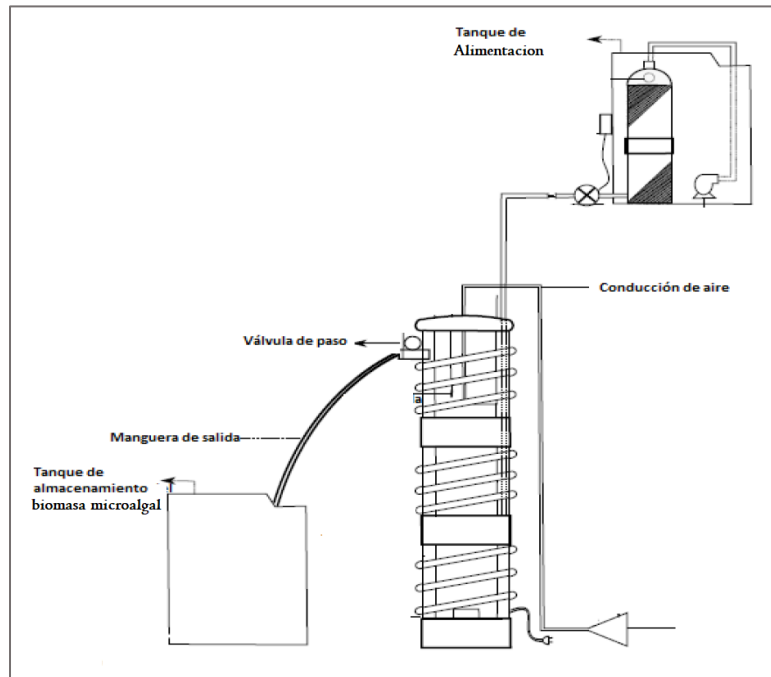


En el momento que la producción de biomasa se encuentra en un estado estable, se procede a establecer el método de recolección. De acuerdo con las investigaciones desarrolladas por el grupo GRESIA, al suministrar medio de cultivo se supera la capacidad del FBR lo cual genera una acción de desbordamiento de la biomasa microalgal, la suspensión de salida es recolectada mediante una manguera unida a una válvula de paso ubicada en la parte superior del FBR, la cual se conecta a un contenedor para su almacenamiento (figura 22) [40].

Según Moreno y Vanegas [86], se debe considerar que la evaporación generada por la aireación, el calentamiento y agitación del sistema. Esto infiere una pérdida de agua en el volumen del cultivo, por lo cual, se requiere reponer esta pérdida. Se espera que el porcentaje de evaporación no sea mayor al 10%.

### Figura 23.

#### Sistema FBR continuo



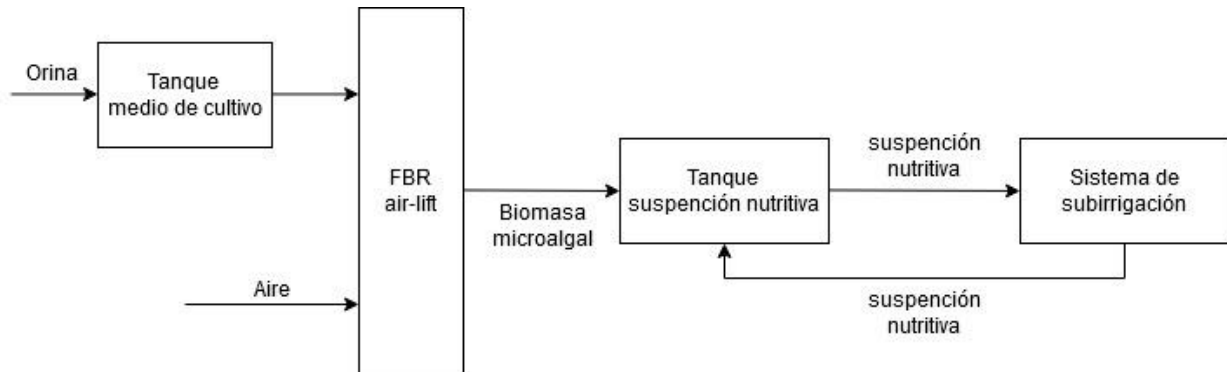
**Nota.** El diagrama presenta el diseño del reactor continuo tomado como referencia para el sistema de biofertilización. Tomado de: A. M. Sánchez Otalora, Evaluación de la eficiencia de biomasa microalgal cultivada con agua residual como biofertilizante para el cultivo de lechuga.

Puesto que la microalga es el biofertilizante planteado para el desarrollo del cultivo, al asegurar la producción necesaria de biomasa se logra satisfacer la cantidad de nitrógeno para el cultivo de lechuga establecido en el apartado 3.2.4. Para la recolección de suspensión nutritiva en el contenedor de almacenamiento propuesto en el sistema de irrigación (figura 21), se tiene en cuenta el método presentado en la figura 23.

Cabe aclarar que para la propuesta del sistema de biofertilización, el suministro de la suspensión nutritiva para la irrigación, depende del clima y las necesidades reflejadas en la planta, por ende, es inviable determinar la cantidad de veces de suministro diarias de manera teórica. Mediante las diferentes revisiones sistemáticas realizadas durante el desarrollo de este estudio, finalmente, se planteó la propuesta del diseño conceptual del sistema de biofertilización representada en el diagrama de flujo de bloque (figura 24).

**Figura 24.**

*Diagrama de flujo en bloque*

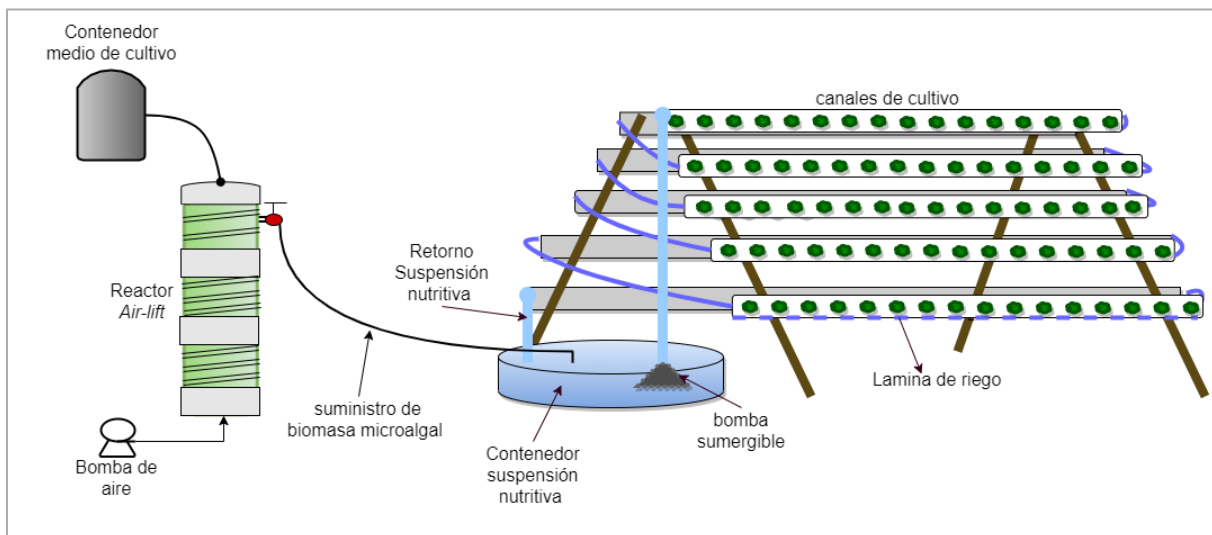


**Nota.** La figura presenta el diagrama de flujo en bloque de la propuesta para el sistema de biofertilización.

De acuerdo al diagrama de flujo se realiza el esquema presentado en la figura 25, para visualizar de manera gráfica la propuesta del diseño conceptual del sistema de biofertilización.

**Figura 25.**

*Propuesta sistema de biofertilización*



**Nota.** El diagrama presenta el diseño del sistema de biofertilización partiendo de un FBR tipo *Air-lift* y un cultivo de *chlorella spp.* para el cultivo de lechuga.

El diseño conceptual del sistema de biofertilización surge de la toma de diferentes decisiones planteando alternativas, este proceso es presentado en la tabla 8.

**Tabla 8.**

*Proceso de decisión jerárquica*

Decisión		Alternativas
D1	¿Qué tipos de bases de datos se incluyeron para definir los espacios de búsqueda?	Repositorio institucional Bases de datos bibliográfica Plataformas de investigación
D2	¿Se empleo un gestor bibliográfico?	Si No
D3	¿Qué tipo de gestor de bibliográfico?	Zotero Mendeley RefWorks
D4	¿Qué tipo de hortaliza?	Tomate Lechuga
D5	¿Qué tipo de cultivo?	Con suelo Sin suelo
D6	¿Qué tipo de sustrato?	Solido inerte Agua
D7	¿Qué tipo de sistema estructural?	Banco / Bancada Producción escalonada
D8	¿Qué tipo de sistema de riego?	Por goteo Subirrigación
D9	¿Se incluyó bomba de aireación en el contenedor de suspensión nutritiva?	Si No
D10	¿Ubicación de la bomba de aire FBR?	Parte inferior Parte superior
D11	¿Ubicación de manguera para la recolección de biomasa microalgal?	Parte inferior Parte superior
D12	¿Cuál sistema de arranque se plantea para la producción de biomasa?	Reactor Continuo Reactor Batch

**Nota.** La tabla presenta la aplicación del proceso de decisión jerárquica al diseño conceptual del sistema de biofertilización para el cultivo de lechuga partiendo de un fotobiorreactor tipo *air-lift* y un cultivo de *Chlorella spp.*

Para seleccionar las alternativas que favorezcan el estudio se plantearon los criterios presentados en la tabla 9. A cada uno de los criterios se les asignó un grado de relevancia dentro del diseño de acuerdo a la perspectiva de las autoras; los valores asignados se encontraban dentro de un rango de 0-1, siendo 1 el criterio más relevante.

**Tabla 9.**

*Criterios utilizados para la toma de decisiones*

Criterios	Peso
Disponibilidad	1
Viabilidad	1
Simplicidad de manejo	0.8
Cantidad de información	1
factibilidad de sistema de irrigación	0.8
Requisito para el diseño	0.5
Relevancia de la información	0.8

**Nota.** La tabla presenta los criterios empleados para la toma de decisiones y el peso relativo asignado para el diseño conceptual.

Una de las decisiones más relevantes para el diseño conceptual del sistema fue “¿Qué tipo de sistema de riego?” Para seleccionar la alternativa adecuada se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: “viabilidad”, “simplicidad de manejo”, “cantidad de información” y “requisitos para el diseño”; a partir de esto la opción recomendada fue incorporar el sistema de subirrigación para su respectivo análisis. Todas las alternativas seleccionadas se presentan en la tabla 10 para el diseño final propuesto en la figura 24.

**Tabla 10.**

*Resultados del proceso de decisión jerárquica*

<b>Decisión</b>	<b>Alternativas Seleccionadas</b>
D1	Repositorio institucional Bases de datos bibliográfica Plataformas de investigación
D2	Si
D3	Zotero
D4	Lechuga
D5	Sin suelo
D6	Solido inerte
D7	Producción escalonada
D8	Subirrigación
D9	No
D10	Parte inferior
D11	Parte superior
D12	Reactor batch

**Nota.** La tabla presenta las alternativas seleccionadas en el proceso de decisión jerárquica para realizar el diseño conceptual de un sistema de biofertilización.

## 5. CONCLUSIONES

Los parámetros de operación para el fotobiorreactor, mencionadas en el capítulo 2, se establecieron con base en la realización de la revisión sistemática, utilizando bases de datos y plataformas disponibles. La selección correcta de las palabras clave junto con los operadores booleanos para las ecuaciones de búsqueda, permitieron obtener documentos acordes al tema investigado, gracias a los criterios de inclusión y exclusión se garantizaron que los documentos seleccionados brindaran información pertinente y de calidad.

Mediante la herramienta *Bibliometrix* se logró un soporte adicional para ratificar que los criterios definidos permitieran una correcta recopilación de los archivos relevantes para la revisión. Debido a que al comparar los resultados obtenidos por la revisión sistemática con los documentos más citados en *Scopus* por la herramienta (apartado 2.1.1.), se observó que 13 textos diferían, de los cuales solo 1 contenía información relevante para el objetivo.

Los parámetros relacionados directamente con el crecimiento de la microalga *Chlorella spp.* en el FBR como temperatura, suministro de luz y pH, se lograron definir mediante rangos establecidos por la información presentada por los diferentes autores. Asimismo, el medio de cultivo y las variables geométricas se lograron establecer con la ayuda de afirmaciones planteadas por los mismos. A diferencia del suministro de gas, en el cual no se encontró relación entre la información propuesta por los autores, se decidió optar por identificar los documentos que usaron reactores con un volumen cercano al propuesto (20 L).

Al momento de iniciar la revisión bibliográfica para realizar el diseño conceptual del sistema de riego, se observó que el tema de investigación arrojaba resultados superiores o iguales a 500, por lo cual, se estableció la lechuga (*Lactuca sativa*) como material vegetal para el cultivo, asimismo, se empleó la herramienta *Bibliometrix* para la identificación de las palabras claves adecuadas, con el fin de obtener documentos relevantes para el objetivo.

Durante el análisis de los documentos obtenidos mediante la revisión bibliográfica se identificaron las limitaciones atribuidas a los parámetros agronómicos

para el diseño conceptual del sistema de fertirrigación, por lo cual, se concluyó enfocar la revisión en cultivos sin suelo. Se decidió optar por un sistema de irrigación con sustrato sólido, debido a que el cultivo en agua no es considerado un sistema para irrigar. Finalmente se establece un sistema de riego por subirrigación con el uso de sustrato sólido, para suministrar el biofertilizante al cultivo de lechuga (figura 21).

Se definió que la fase de arranque es un aspecto fundamental, dado que se obtiene la biomasa microalgal requerida para suplir los nutrientes en el cultivo de lechuga. Teniendo en cuenta el diseño del sistema de fertirrigación y que el FBR de flujo continuo se debe encontrar en un estado estable, se procedió a establecer el método de recolección de biomasa y que de esta manera se logre distribuirla al contenedor de suspensión nutritiva. La alternativa propuesta sugiere que el sistema para el desarrollo del cultivo se encuentre en una estructura en "A", ya que esta permite el aprovechamiento de alturas y profundidad. Gracias a la pendiente que se plantea en los canales de cultivo, no se requiere una bomba de aire y se facilita la distribución del riego junto con el drenaje.

Teniendo en cuenta las revisiones sistemáticas realizadas, se logró plantear una alternativa para el diseño conceptual de un sistema de biofertirrigación, compuesto de un FBR *air-lift* de flujo continuo, para la producción de *Chlorella spp.* como biofertilizante y un sistema de subirrigación para el cultivo de lechuga con sustrato sólido.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Chaudhary et al., "Bioefficacy of novel cyanobacteria-amended formulations in suppressing damping off disease in tomato seedlings", *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 28, n.o 12, pp. 3301-3310, dic. 2012, doi: 10.1007/s11274-012-1141-z.
- [2] J. Lopez, *Fijación y movilización de nutrientes*, vol. 1. España: CSIC-CISC, 1991 [Online]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=6qn6ulDo\\_n0C&hl=es&lr=\[Acceso: septiembre 20, 2020\]](https://books.google.com.ec/books?id=6qn6ulDo_n0C&hl=es&lr=[Acceso: septiembre 20, 2020])
- [3] M. Manjunath et al., "Developing PGPR consortia using novel genera *Providencia* and *Alcaligenes* along with cyanobacteria for wheat", *Arch. Agron. Soil Sci.*, vol. 57, n.o 8, pp. 873-887, dic. 2011, DOI: 10.1080/03650340.2010.499902
- [4] B. Bar-Yosef y M. R. Sheikholslami, "Distribution of Water and Ions in Soils Irrigated and Fertilized from a Trickle Source", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 40, n.o 4, pp. 575-582, jul. 1976, doi: 10.2136/sssaj1976.03615995004000040033x.
- [5] J. Hagin, M. Sneh, y A. Lowengart-Aycicegi, *Fertigation Fertilization: through*, vol. 23. Suiza, 2003 [Online]. Disponible en: <https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/39-fertigation-fertilization-through-irrigation.pdf> [Acceso: septiembre 20, 2020]
- [6] J. C. Tovar S., y J. P. Ruiz D., *Propuesta de escalamiento de un fotobiorreactor para la microalga *Chlorella Vulgaris* a nivel piloto*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia 2016 [Online]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/825/1/6102537-2016-2-IQ.pdf>
- [7] G. Tello H., *Respuesta agronómica del fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) a un biofertilizante con base en microalgas *Chlorella* y *Scenedesmus**, tesis pre. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador, Ecuador, 2016.
- [8] M. L. Ortiz M., K. X. Sandoval P., y L. V. Solarte M., (2019). *Chlorella, ¿un potencial biofertilizante?*, Orinoquia en: <https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/582>.
- [9] A. K. Romo P., (2002). *Manual Para el cultivo de microalgas», Memoria técnica de un trabajo profesional*, Universidad Aunonoma de Baja California Sur, La Paz, [Online]. Disponible en: <http://biblio.uabcs.mx/tesis/TE1366.pdf>
- [10] A. Hernández P., y J. I. Labbé, "Microalgas, cultivo y beneficios", *Rev. Biol. Mar.*

- Oceanogr., vol. 49, n.o 2, pp. 157-173, 2014, doi: 10.4067/S07187019572014000200001[Acceso: septiembre 22, 2020]
- [11] F. Almario M., P. Mojica, S. Cuéllar, y A. Tamayo, *Tecnología Relacionada con Biofertilizantes*, Super Intend. Ind. Comer. Grupo Banco Pat., p. 132
- [12] A.U. Kafkafi y J. Tarchitzky, *Fertirrigación: una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua*. París ; Horgen (Suiza): Asociación internacional de la industria de fertilizantes ; Instituto internacional de la potasa, 2012
- [13] J. M. Jiménez B., y J. C. Rodríguez V., *fertirrigacion*, Info Agro, 2007. <http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Publicaciones/fertirrigacion.pdf>
- [14] M. A. Otalora, (2012) Fertirrigación, Fertirrigación, <https://www.fertirrigacion.com/que-es-la-fertirrigacion>
- [15] M. Martínez D., Riego localizado Principios y tipo de riego localizado,( 2012), Slideshare <https://es.slideshare.net/miguelarmenia/riego-localizado>
- [16] L. S. Pereira, J. A. De Juan V., M. R. Picornell B., y J. Martin B.,( 2010), El Riego y Sus Tecnologías. [http://crea.uclm.es/crea/descargas/ files/El\\_Riego\\_y\\_sus\\_Tecnologias.pdf](http://crea.uclm.es/crea/descargas/ files/El_Riego_y_sus_Tecnologias.pdf)
- [17] J. P. Saud Toledo, *Diseño de un sistema de riego por goteo para cultivos en zonas con escasas de agua*, Tesis pre, Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2012 [Online]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1450/1/104385.pdf>
- [18] W. Montesinos R., *Comparación De La Fertirrigación Por Goteo Y Microaspersión*, Tesis de pre, Division de Ingenierias, Universidad Autónoma Agraria, México, 2012 [Online]. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5644/T19283%20MONTESINOS%20RAMOS%2C%20WANERGES%20%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] J. J. Pongutá H., (2003), *Guia Para El Almacenamiento, Manejo Y Conduccion Del Agua*. [Online]. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=-Vz2cvQ5AWoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=-Vz2cvQ5AWoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

- [20] El Rlego, My Morel Cyclamen. (03 de octubre 2020) .Disponible en: <https://www.cyclamen.com/es/profesional/cultivo/5/1971>
- [21] N. Semananda, J. Ward, y B. Myers, "A Semi-Systematic Review of Capillary Irrigation: The Benefits, Limitations, and Opportunities", *Horticulturae*, vol. 4, n.o 3, p. 23, doi: 10.3390/horticulturae4030023. [Acceso: septiembre 03, 2020]
- [22] M. A. Aquino Z, *Manual De Hidroponia*, 1ra ed. México: Universidad Nacional Autónoma De México, (2014) [Online]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual\\_de\\_hidroponia.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual_de_hidroponia.pdf) [Acceso: septiembre 05, 2020].
- [23] D. Quirós Z., *Diseño de un sistema hidropónico a mediana escala*, Instituto tecnológico de costa rica, Cartago, 2011.
- [24] Hanna Instruments, "Fundamentos De Hidroponía" 2a EDICIÓN, Bogotá, (2020)
- [25] C. Pinto M., *Proyecto de factibilidad de cultivo semi-hidropónico de tomate riñón*, Tesis pre, Facultad de Ingenierías, Universidad de las Américas, Ecuador, 2001 [Online]. Disponible en: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/1417>
- [26] El Cultivo de La Lechuga, Infoagro. [Online]. Disponible en: <https://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm#:~:text=La%20humedad%20relativa%20conveniente%20para,momentos%20agradece%20menos%20del%2060%25>.
- [27] C. Jaques H., J. L. Hernández M., "Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (nft)", (2005) [Online]. Disponible en: <https://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/revista/sites/www.ciidiroaxaca.ipn.mx.revista/files/pdf/vol3num1/lechuga.pdf>
- [28] B. Arcos y O. Benavides, *Evaluation Of Two Sustratos And Two Dose Of Fertilization Under*, *Rev. Cienc. Agríc.*, p. 14, 2011.
- [29] J. A. P. Pérez, *Biofertilización, Tecnología Para El Cultivo De Melon*, Tesis pre, Division de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria, México, 2008. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5578/T16927%20%20P%C9REZ%20P%C9REZ,%20JES%DAS%20ALBERTO%20%20%20TESIS.pdf?sequence=1>

- [30] E. Suárez M., *tecnología sustentable en el cultivo de nogal*, Tesis pre, Division de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria, México, 2008. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5570/T16692%20%20SU%c3%81REZ%20MOREN%2c%20ENRIQUE%20%20%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [31] J. M. Covarrubias R., J. A. Hernández M., V. M. Parga T., E. Nava R., y M. Rosario, *Biofertilización con Biolíquidos en Manzano en Arteaga, Coahuila*, p. 14, 2017.
- [32] T. A. E. Otalora, *El Análisis Bibliométrico Como Herramienta Para El Seguimiento De Publicaciones Científicas, Tesis Y Trabajos De Grado*, p. 61
- [33] M. Aria y C. Cuccurullo, “bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis, *J. Informetr.*”, vol. 11, n.o 4, pp. 959-975, nov. 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- [34] J. Degen et al., “A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect”, *J. Biotechnol.*, vol. 92, n.o 2, pp. 89-94, dic. 2001, doi: 10.1016/S0168-1656(01)00350-9.
- [35] R. Qiu et al., “Effects of pH on cell growth, lipid production and CO<sub>2</sub> addition of microalgae *Chlorella sorokiniana*”, *Algal Res.*, vol. 28, pp. 192-199, dic. 2017, [En línea]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211926417305684>. [Acceso: septiembre 28, 2020]
- [36] M. Aria y C. Cuccurullo, *bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis, J. Informetr.*, vol. 11, n.o 4, pp. 959-975, nov. 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- [37] X. Tan et al., “*Chlorella pyrenoidosa* cultivation using anaerobic digested starch processing wastewater in an airlift circulation photobioreactor”, *Bioresour. Technol.*, vol. 170, pp. 538-548, oct. 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.07.086.
- [38] L. M. T. Ospitia, “Diseño Y Construcción De Un Sistema Que Simula Una Fuente Fija De Generación De Co<sub>2</sub> “, 2018.
- [39] W. Yee k., y H. Kin., “Optimization for cultivation of microalgae *Chlorella vulgaris* and lipid production in photobioreactor”, p. 16.

- [40] A. M. Sanchez O, *Evaluación De La Eficiencia De Biomasa Microalgal Cultivada Con Agua Residual Como Biofertilizante Para El Cultivo De Lechuga*, tesis pre, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia, 2016.
- [41] N. M. Langley, S. T. L. Harrison, y R. P. van Hille, "A critical evaluation of CO<sub>2</sub> supplementation to algal systems by direct injection", *Biochem. Eng. J.*, vol. 68, pp. 70-75, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369703X12002045>. [Acceso: septiembre 27, 2020]
- [42] O. Paladino y M. Neviani, "Scale-up of photo-bioreactors for microalgae cultivation by  $\pi$ -theorem", *Biochemical Engineering Journal*.pp. 1-15
- [43] Y. López H., C. Orozco, I. García P., J. Ramírez M., y L. G. Torres, "Influence of Sparger Type and Regime of Fluid on Biomass and Lipid Productivity of *Chlorella vulgaris* Culture in a Pilot Airlift Photobioreactor", *Biochemical Engineering Journal*.pp. 1-65.
- [44] J. Huang et al., "Numerical and experimental study on the performance of flat-plate photobioreactors with different inner structures for microalgae cultivation", *J. Appl. Phycol.*, vol. 27, n.o 1, pp. 49-58, feb. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10811-014-0281-y>. [Acceso: septiembre 27, 2020]
- [45] G. V. Tagliaferro et al., "Continuous cultivation of *Chlorella minutissima* 26a in a tube-cylinder internal-loop airlift photobioreactor to support 3G biorefineries", *Renew. Energy*, vol. 130, pp. 439-445, ene. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.06.041.
- [46] A. Lal y D. Das, "Biomass production and identification of suitable harvesting technique for *Chlorella* sp. MJ 11/11 and *Synechocystis* PCC 6803", *Biotech*, vol. 6, n° 1, pp. 41, jun. 2016, [En línea]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s13205-015-0360-z>. [Acceso: octubre 4, 2020]
- [47] Y. Huang et al., "Optimizing the gas distributor based on CO<sub>2</sub> bubble dynamic behaviors to improve microalgal biomass production in an air-lift photo-bioreactor", *Bioresour. Technol.*, vol. 233, pp. 84-91, jun. 2017, [En línea]. Disponible en:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852417301943>. [Acceso: septiembre 27, 2020]

- [48] C. K. Madhubalaji et al. "*Chlorella vulgaris* cultivation in airlift photobioreactor with transparent draft tube: effect of hydrodynamics, light and carbon dioxide on biochemical profile particularly x-6/x-3 fatty acid ratio". J Food Sci Technol, 2020 doi: 10.1007/s13197-019-04118-5.
- [49] S. H. Ammar, "Cultivation of Microalgae *Chlorella vulgaris* in Airlift photobioreactor for Biomass Production using commercial NPK Nutrients" , vol. 12, n.o 1, p. 10, 2016 [Archivo PDF]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/299597219\\_Cultivation\\_of\\_Microalgae\\_Chlorella\\_vulgaris\\_in\\_Airlift\\_photobioreactor\\_for\\_Biomass\\_Production\\_using\\_commercial\\_NPK\\_Nutrients](https://www.researchgate.net/publication/299597219_Cultivation_of_Microalgae_Chlorella_vulgaris_in_Airlift_photobioreactor_for_Biomass_Production_using_commercial_NPK_Nutrients) [Acceso: octubre 5, 2020]
- [50] M. Sobhi et al., "Hybrid technology for nutrients recovery as microbial biomass and ammonium sulfate from un-diluted biogas liquid digestate using a modified airlift reactor", J. Clean. Prod., vol. 267, p. 121976, sep. 2020, [En línea]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620320230>. [Acceso: octubre 28, 2020]
- [51] H. Soroosh, "Considering human urine as nutrients resource for cultivation of microalgae *Scenedesmus quadricauda* for biodiesel production in photoautotrophic metabolism", tesis master, Kristanstad University, 2011.
- [52] D. R. Fernández, D. K. Guzmán, C. M. Gutiérrez, y J. A. Sandoval, "Propuesta de diseño de un sistema continuo para un fotobiorreactor airlift a escala laboratorio", Rev. Investig., vol. 9, n.o 2, pp. 94-105, jul. 2016, doi: 10.29097/2011-639X.57. [Acceso: octubre 5, 2020]
- [53] A. Rengel, A. Zoughaib, D. Dron, y D. Clodic, "Hydrodynamic study of an internal airlift reactor for microalgae culture", Appl. Microbiol. Biotechnol., vol. 93, n.o 1, pp. 117-129, ene. 2012. [En línea]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s00253-011-3398-9>. [Accedido: octubre 17, 2020]
- [54] M. Y. Chisti, *Airlift Biorreactors*. Elsevier applied science 1989.
- [55] D. Rubio Fernández y H. L. Moreno Saboya, "Agitación y transferencia de masa de CO<sub>2</sub> en fotobiorreactores tipo airlift", Rev. Investig., vol. 10, nº 2, pp. 49-62, jul.

- 2017, [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/81>. [Accedido: octubre 6, 2020]
- [56] M. M. H. Alvarado, "Sistemas De Cultivo Sin Suelo Con Sustrato Y Cerrados Como Estrategia Sustentable Para Regiones Áridas Y Semiáridas De México.", pp. 20. [En línea]. Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi07NqWssftAhVIKa0KHQY\\_DFIQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fcore.ac.uk%2Fdownload%2Fpdf%2F78392977.pdf&usq=AOvVaw3c2LJWE\\_GVANIEgzXcJqMU](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi07NqWssftAhVIKa0KHQY_DFIQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fcore.ac.uk%2Fdownload%2Fpdf%2F78392977.pdf&usq=AOvVaw3c2LJWE_GVANIEgzXcJqMU) [ Acceso: noviembre 18, 202]
- [57] M. K. Chunata Cumbal y M. V. Loachamin Pruna, *Diseño Del Sistema De Riego Para La Junta De Aguas Chami De La Parroquia Guangaje, Cantón Pujilí*, título ingeniero civil, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2016.
- [58] J. Muro Erreguerena, "Tecnologías de producción en CSS y sostenibilidad de estos sistemas", vol. 30, pp. 3-6, 2012 [En línea]. Disponible en: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34292012000100001#:~:text=Los%20cultivos%20sin%20suelo%20\(CSS,la%20obtención%20de%20producciones%20vegetales](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292012000100001#:~:text=Los%20cultivos%20sin%20suelo%20(CSS,la%20obtención%20de%20producciones%20vegetales). [Acceso: octubre 20, 2020]
- [59] S. A. Inca Sánchez, *Automatización Y Control Del Sistema Nft Para Cultivos Hidropónicos*, Tesis, Facultad de ingeniería, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú, 2013.
- [60] O. O. Zambrano Mendoza, *Validación De Cinco Genotipos De Lechuga (Lactuca Sativa L) Cultivados En Dos Sistemas De Producción Hidropónica*, tabajo de titulación, Facultad ciencias agrarias, Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2016.
- [61] N. E. Barrios Arreaga, *Evaluación Del Cultivo De La Lechuga, Lactuca Sativa L. Bajo Condiciones Hidropónicas En Pachalí*, tesis, Facultad de agronomía, Universidad De San Carlos De Guatemala, Guatemala, 2004.
- [62] E. M. Guerrero y J. C. Revelo, "Evaluación De Sustratos En Un Cultivo De Lechuga Bajo Un Sistema Hidropónico En El Municipio De Pasto", Rev. Cienc. Agríc., vol. 31, nº 1, p. 14, 2014. [En línea]. Disponible en:

- <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5104174>. [Acceso: noviembre 14, 2020]
- [63] C. F. Mesías Camacho, "Diferentes Sustancias Nutritivas En El Cultivo De Lechuga (Láctica Sativa) En Sustrato De Cascarilla De Arroz Más Arena De Río", tesis, Universidad Técnica Estatal De Quevedo Unidad De Estudios A Distancia, Ecuador, 2015.
- [64] M. A. Yance Muños, *Establecimiento del cultivo hidropónico de Lechuga (Lactuca sativa L.) variedad Great Lakes 188, mediante la utilización de diferentes tipos de sustratos sólidos en la zona de Babahoyo.*, Universidad técnica de Babahoyo, 2012.
- [65] D. González, Y. Caballero, y O. Aguilar, "Diseño de un cultivador hidropónico vertical para uso doméstico Design of a vertical hydroponic cultivator for domestic use", vol. 6, pp. 3, 2020. [Archivo PDF] Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjG2\\_uKo8ftAhUCY6wKHW-wAQkQFjAAegQICxAC&url=https%3A%2F%2Frevistas.utp.ac.pa%2Findex.php%2Fric%2Farticle%2Fview%2F2609&usg=AOvVaw3X5JNsiDpOo16A8cvWgOEL](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjG2_uKo8ftAhUCY6wKHW-wAQkQFjAAegQICxAC&url=https%3A%2F%2Frevistas.utp.ac.pa%2Findex.php%2Fric%2Farticle%2Fview%2F2609&usg=AOvVaw3X5JNsiDpOo16A8cvWgOEL)
- [66] Infoagro (2020). Tipos De Sustratos. [https://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/tipo\\_sustratos2.htm](https://www.infoagro.com/industria_auxiliar/tipo_sustratos2.htm)
- [67] F. A. Faheed y Z. A.-E. Fattah, "Effect of Chlorella vulgaris as Bio-fertilizer on Growth Parameters and Metabolic Aspects of Lettuce Plant", J. Agric. Soc. Sci., 2008 [En línea] Disponible en: <http://www.fsublishers.org>. [Acceso: noviembre 10, 2020]
- [68] O. Ergun, H. Y. Dasgan, y O. Isik, "Effects of microalgae Chlorella vulgaris on hydroponically grown lettuce". Acta Hort., n° 1273, pp. 169-176, mar. 2020, doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1273.23.
- [69] D. Djidonou y D. I. Leskovar, "Seasonal Changes in Growth, Nitrogen Nutrition, and Yield of Hydroponic Lettuce". HortScience, vol. 54, n° 1, pp. 76-85, ene. 2019, doi: 10.21273/HORTSCI13567-18.
- [70] A. Lara Herrera, "Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía." Terra Latinoamericana, Vol. 17, n° 3, pp. 221-229 [En línea].



Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573/57317306> . [Acceso: noviembre 28, 2020]

- [71] G. A. Martínez-Gutiérrez, Y. D. Ortiz-Hernández, y R. López-Pozos, “Oxigenación de la solución nutritiva recirculante y su efecto en tomate y lechuga”, *Rev. Fitotec. Mex.*, vol. 35, nº 5, pp. 49, dic. 2012 [En línea]. Disponible en: <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/486>. [Acceso: noviembre 30, 2020]
- [72] M. A. Fernández Navarro, *Efecto de diferentes niveles de aireación de la solución nutritiva sobre el crecimiento y la calidad de canónigos y berros cultivados en bandejas flotantes*, proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica De Cartagena, 2013.
- [73] J. M. Pachón Camelo, *producción y comercialización de lechuga hidropónica Lactuca sativa L, como una alternativa económica para pequeños productores de Viotá, Cundinamarca*, Facultad de ciencias agropecuarias, Universidad de la Salle, Yopal, 2020.
- [74] P. Medrano García, *Cultivo de lechuga (lactuca sativa) en sistema mixto (suelo e hidroponía) bajo diferentes soluciones nutritivas en el centro experimental de cota cota*, Facultad de agronomía, Universidad Mayor De San Andrés, Bolivia, 2017.
- [75] Regaber (2020), Lechuga, regaber.com. <https://regaber.com/lechuga/>
- [76] M. A. Alveal Concha y K.C. Campos González, “Estudio comparativo de sistemas de riego hidropónico y por goteo.”, Facultad de ingeniería, Universidad del Bío-Bío, 2014.
- [77] E. K. Moreno Cárdenas, *Diseño de sistema de riego por goteo subsuperficial en el cultivo de tomatillo physalis ixocarpa*, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Mexico, 2017.
- [78] R. Rangel Acosta, *Combinación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos afecta la producción de tomate (Solanum Lycopersicum L.) y las propiedades químicas del sustrato bajo un sistema de subirrigación*, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Mexico, 2018.
- [79] M. W. Kent y D. Wm. Reed, “Nitrogen Nutrition of New Guinea Impatiens ‘Barbados’ and Spathiphyllum ‘Petite’ in a Subirrigation System”, *J. Am. Soc.*

- Hortic. Sci., vol. 121, nº 5, pp. 816-819, sep. 1996, doi: 10.21273/JASHS.121.5.816. [Acceso: diciembre 5, 2020]
- [80] P. Santamaria et al., "Subirrigation vs drip-irrigation: Effects on yield and quality of soilless grown cherry tomato", J. Hortic. Sci. Biotechnol., vol. 78, nº 3, pp. 290-296, ene. 2003, doi: 10.1080/14620316.2003.11511620. [Acceso: diciembre 5, 2020]
- [81] R. S. Ferrarezi, M. W. van Iersel, y R. Testezlaf, "Plant growth response of subirrigated salvia "Vista Red" to increasing water levels at two substrates", Hortic. Bras., vol. 34, nº 2, pp. 202-209, jun. 2016. [En línea]. Disponible en: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-05362016000200202&lng=en&tIng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362016000200202&lng=en&tIng=en). [Acceso: 05-dic-2020]
- [82] M. P. N. Gent y R. J. McAvoy, "Water and Nutrient Uptake and Use Efficiency with Partial Saturation Ebb and Flow Watering", HortScience., vol. 46, nº 5, pp. 791-798, may 2011. [En línea]. Disponible en: <https://journals.ashs.org/view/journals/hortsci/46/5/article-p791.xml>. [Acceso: diciembre 2, 2020]
- [83] D. A. Álvarez Velasco, *Comparación de un Sistema de Riego Subsuperficial con Goteo Integrado y Cinta de Goteo en el Cultivo de Calabacita*, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México, 2011.
- [84] J. D. Murcia Vélez y L. F. Chacón Segura, *Diseño de un sistema automático de cultivo hidropónico para forraje verde*. Facultad de ingeniería en automatización, Universidad de la Salle, Bogotá D.C., Colombia, 2018.
- [85] J. Arviza Valverde, "Dispositivos para fertirrigación en sistemas de riego localizado.", 2001. [Archivo en PDF]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=183480>. [Acceso: diciembre 5, 2020]
- [86] E. V. Moreno Rivera y D. F. Vanegas Gutiérrez, *Diseño y construcción de un biorreactor esterilizable y de bajo costo para el estudio de crecimiento de microorganismos, trabajo de grado*. Facultad de ciencias y educación, Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá D.C, Colombia, 2017
- [87] Y. Duan y F. Shi, "Bioreactor design for algal growth as a sustainable energy source". Elsevier, 2014, pp. 1-34.

- [88] J. M. Covarrubias Ramírez et al., “*Biofertilización Con Biolíquidos En Manzano En Arteaga, Coahuila*” , pp. 14, 2017 [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Jacobo-Salcedo/publication/328514052\\_Biofertilizacion\\_con\\_bioliquidos\\_en\\_manzano\\_en\\_Arteaga\\_Coahuila\\_Biofertilization\\_with\\_bioliquids\\_in\\_apple\\_tree\\_in\\_Arteaga\\_Coahuila/links/5bd1ef9e4585150b2b875371/Biofertilizacion-con-bioliquidos-en-manzano-en-Arteaga-Coahuila-Biofertilization-with-bioliquids-in-apple-tree-in-Arteaga-Coahuila.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Jacobo-Salcedo/publication/328514052_Biofertilizacion_con_bioliquidos_en_manzano_en_Arteaga_Coahuila_Biofertilization_with_bioliquids_in_apple_tree_in_Arteaga_Coahuila/links/5bd1ef9e4585150b2b875371/Biofertilizacion-con-bioliquidos-en-manzano-en-Arteaga-Coahuila-Biofertilization-with-bioliquids-in-apple-tree-in-Arteaga-Coahuila.pdf) [Acceso: septiembre 13, 2020]
- [89] R. Lizcano Toledo et al., *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*, 2017.
- [90] R. K. Mandalam y B. Ø. Palsson. (1998). “Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures”. *Biotechnol. Bioeng*, Vol. 59, pp. 1-7, 1998, doi: 10.1002/(sici)1097-0290(19980905)59:5<605::aid-bit11>3.0.co;2-8 [Acceso: noviembre 22, 2020]
- [91] Q. Huang et al. (2017) “Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms”, *Engineering*, pp. 1 – 10, doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020> [Acceso: noviembre 22, 2020]
- [92] M. Adamsson, “Potential use of human urine by greenhouse culturing of microalgae (*Scenedesmus acuminatus*), zooplankton (*Daphnia magna*) and tomatoes (*Lycopersicon*)”, *Ecological Engineering*, vol. 16, n.º 2, pp. 243-254, nov. 2000, doi: [10.1016/S0925-8574\(00\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00064-1). [Acceso: enero 26, 2021]
- [93] F.J. Choix L., *Evaluación de la Acomulación de Carbohidratos en la Microalga *Chlorella* spp. Asociada con la Bacteria *Azospirillum Brasilense**, tesis Doc, Programa de Estudios de Posgrado, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C, La Paz, E.E.U.U, 2014.