

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE MONITOREO Y
CONTROL PARA LA PRODUCCIÓN DE MICROALGAS COMO ALTERNATIVA
DE BIOFERTILIZANTE EN EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA SABANA DE
BOGOTÁ

JUAN DIEGO TUTA SEGURA
KEVIN ALBERTO SÁNCHEZ CARREÑO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA - UNIAGRARIA
FACULTAD INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ DC
2024

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE MONITOREO Y
CONTROL PARA LA PRODUCCIÓN DE MICROALGAS COMO ALTERNATIVA
DE BIOFERTILIZANTE EN EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA SABANA DE
BOGOTÁ

JUAN DIEGO TUTA SEGURA
KEVIN ALBERTO SÁNCHEZ CARREÑO

INFORME FINAL – TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO

DIRECTOR
VALENTINA REYES MARTÍNEZ

CODIRECTOR
DUMAS OVIEDO PEREIRA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA - UNIAGRARIA
FACULTAD INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ DC
2024

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C. 20 de marzo del 2024

Agradezco a la vida por mis padres: por su amor incondicional, apoyo constante y por enseñarme el valor de la perseverancia y la dedicación. A mi familia, por su apoyo y palabras de aliento durante tantos años. A mis amigos, por su amistad incondicional y por sus palabras de aliento. Y, por último, a mí mismo: por la dedicación, esfuerzo y sacrificio que he puesto en este proyecto. Gracias por nunca rendirte y por creer que era posible alcanzar este sueño.

Quiero expresar mi dedicatoria a todas las personas que han sido parte fundamental de este proyecto y que han contribuido a su éxito. Su apoyo y colaboración han sido claves para mí. A ti madre quien siempre me guio y brindo su amor incondicional para ser fuente de inspiración y motivación.

AGRADECIMIENTOS

Culminar el proyecto de tesis representa un logro significativo en nuestra vida personal y profesional. Es por esta razón que queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas aquellas personas que contribuyeron y aportaron sus conocimientos en este logro.

En primer lugar, queremos agradecer a nuestra familia, especialmente a nuestros padres por su apoyo absoluto a lo largo de toda la carrera, fuente de inspiración en cada desafío y cada paso de este camino lleno de momentos de alegría y aprendizaje constante.

A nuestros directores de tesis y a todos aquellos profesores que nos brindaron su orientación y consejos valiosos, su dedicación y compromiso son parte de nuestro crecimiento académico para alcanzar con éxito este resultado.

Este logro no solo es de nosotros, sino de todas aquellas personas que nos acompañaron en este largo camino, su voz de aliento y su fe puesta en nosotros han sido pilares claves que nos han sostenido hasta este momento, con humildad y gratitud en nuestro corazón estaremos dispuestos mantener la luz de la perseverancia en los siguientes proyectos y desafíos que lleguen a nuestra vida profesional.

¡Gracias a todos!

Con sincero cariño,

Juan Diego Tuta Segura
Kevin Alberto Sánchez Carreño

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	19
4. OBJETIVOS.....	24
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
5 MARCO REFERENCIAL	25
5.1 ESTADO DEL ARTE	25
5.2 MARCO HISTÓRICO	28
5.3 MARCO TEÓRICO.....	30
5.4 MARCO CONCEPTUAL.....	41
5.5 MARCO LEGAL.....	51
6 DISEÑO METODOLÓGICO	53
6.1 FASES DEL PROYECTO.....	55
7 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	58
8 CONCLUSIONES.....	77
9 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	78
10 BIBLIOGRAFÍA	80
11 ANEXOS	88

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Tipos de algas.....	32
Tabla 2. conversión de unidades de turbidez.	35
Tabla 3. Sintonía controlador PID por el método de Cohen-Coon.....	40
Tabla 4. Composición general de diferentes algas (% peso seco).	42
Tabla 5. Rangos de funcionamiento del sensor de iluminación.	44
Tabla 6. Rangos de funcionamiento del sensor de turbidez.	46
Tabla 7. Rangos de temperatura de la PT100.	48
Tabla 8. Variables de Kp, Ti y Td por Ziegler y Nichols.	51
<i>Tabla 9. Calibración PT100.</i>	<i>63</i>
Tabla 10. Comparación de especies de microalgas en microscopio.	72
Tabla 11. Resultados prueba t-student.	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Consumo global de fertilizantes sintéticos.	16
Figura 2. Sistema de control en lazo cerrado.	37
Figura 3. Respuesta del método de sintonización de Cohen-Coon.	39
Figura 4. <i>Chorella vulgaris</i> . Aumento en microscopio óptico: 10x; B; 100x.	43
Figura 5. Sensor intensidad de luz para Arduino BH1750	44
Figura 6. Sensor pH análogo	45
Figura 7. Sensor de turbidez del agua análogo óptico.....	46
Figura 8. Termocupla con MAX6675	47
Figura 9. Respuesta de la planta a una entrada de escalón unitario.	50
Figura 10. Sobre impulso máximo a la respuesta escalón.....	50
Figura 11. Etapa inicial de los medios de cultivo.	58
Figura 12. Interfaz para la lectura de las variables del cultivo.	59
Figura 13. Calibración pH con buffer solution 4, 7 y 9	60
<i>Figura 14. Calibración sensores turbidez 0 NTU</i>	<i>61</i>
<i>Figura 15. Calibración sensores turbidez 46 NTU</i>	<i>61</i>
<i>Figura 16. Calibración sensores turbidez 63 NTU</i>	<i>62</i>
Figura 17. Calibración sensor luminosidad (Ix)	63
Figura 18. Montaje sistema de control en GE	64
Figura 19. Interfaz de monitoreo del cultivo de microalgas (login).	65
Figura 20. Interfaz de monitoreo del cultivo de microalgas.	65
Figura 21. Diagrama de flujo código Python e interfaz de monitoreo.....	66
Figura 22. Interfaz de adquisición de datos en SQL Server.....	67
Figura 23. Promedio por día de los datos del cultivo de microalga <i>Chlorella</i>	68
Figura 24. Obtención función de transferencia Matlab.....	69
Figura 25. Respuesta del control de temperatura.	70
Figura 26. Interfaz de control Matlab.	70
Figura 27. Reconocimiento de la microalga <i>Chlorella</i> sp en laboratorio.	71
Figura 28. Resultados de crecimiento de la microalga <i>Chorella</i> sp por análisis de laboratorio.....	73
Figura 29. Resultados del crecimiento por medio de la turbidez en los dos medios de cultivo de microalga <i>Chlorella</i> sp	73
Figura 30. Comportamiento de la temperatura de los ambientes de microalga <i>Chlorella</i> sp.....	74
Figura 31. Luminosidad recibida en los medios de cultivos.	75

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Toma fotográfica muestras de laboratorio 1	88
Anexo 2. Toma fotográfica muestras de laboratorio 2	88
Anexo 3. Toma fotográfica desecador muestras biomasa	89
Anexo 4. Toma fotográfica secado muestras biomasa	89
Anexo 5. Muestras biomasa Chlorella centrifugada	90
Anexo 6. Toma de muestras placas Petri para secado de biomasa	90
Anexo 7. Muestras biomasa secas	91
<i>Anexo 8. Maquinas centrifugas laboratorio UNIAGRARIA.....</i>	<i>91</i>
<i>Anexo 9. Bascula laboratorio UNIAGRARIA.....</i>	<i>92</i>
<i>Anexo 10. Microscopio laboratorio UNIAGRARIA.....</i>	<i>92</i>

GLOSARIO

Cultivo microbiológico - El cultivo es el proceso de proliferación de microorganismos al proporcionarles un entorno apropiado. Los microorganismos en proliferación producen réplicas de sí mismos y necesitan los elementos presentes en su composición química. Los factores que deben controlarse durante la proliferación incluyen nutrientes, pH, temperatura, aireación, concentración de sales entre otros (Carroll K.C ., 2016).

Microalgas – Pertenecientes en su mayoría al reino protista, son organismos fotosintetizadores acuáticos de organización sencillo, que viven en el agua o en ambientes muy húmedos (Padrón, y otros, 2020), estas pueden variar en tamaño desde microscópicas hasta grandes colonias multicelulares.

Fertilizante biológico – Durante el proceso de descomposición, las materias primas de origen vegetal o animal liberan su contenido de nutrientes (nitrógeno, potasio y fosforo) y de esta manera enriquecen la composición de la tierra, estimulando la actividad microbiana y contribuyen al crecimiento (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

Ambiente Controlado – entorno en el que se han tomado medidas para regular y mantener ciertas condiciones específicas, como la temperatura, iluminación y demás factores ambientales en la agricultura de precisión aumentando la producción mediante el control de variables, y así mejorar la calidad y sostenibilidad de una producción agrícola (Dwivedi, Naresh, Kumar, Yadav, & Kumar, 2017).

Biomasa - Es la cantidad total de materia viviente que se encuentra en un área determina o en uno de sus niveles tróficos, expresada en gramos de carbono o en calorías por unidad de superficie. se da debido a la transformación de la energía solar en energía química (Martínez Romero Anirebis, 2014).

Ambiente controlado – Es un área cuyos parámetros físicos y bioquímicos están predefinidos por la necesidad de crear y controlar condiciones especiales como; temperatura, humedad relativa, presión, entre otras (Airedinámica, 2018).

Carbono - Pueden emplear como fuente de carbono el CO₂ presente en la atmósfera, así como los iones bicarbonato (HCO₃) por medio de la enzima anhidrasa carbónica. Son capaces de tolerar hasta unas 150.000 ppm de CO₂ en el aire. Algunos sistemas de cultivo inyectan aire enriquecido en dióxido de carbono en el reactor como fuente y cuando se provee de carbonato se hace generalmente en forma de Na₂CO₃ y NaHCO₃.

Nitrógeno - El contenido en nitrógeno de la biomasa esta entre el 1% y el 10% según la fuente de nitrógeno implementada en el cultivo, en general la biomasa toma el nitrógeno del medio ambiente en forma de urea, amonio, nitrato, nitrito, nitrógeno gas y óxido de nitrógeno. La espirulina se ve prácticamente inhibida ante concentraciones de 200 mg NH₄ + /L.

Fosforo - Es tomado en forma de ortofosfatos (P-PO₄⁻³), cuya concentración en equilibrio depende lógicamente del pH del medio. Algunos factores intervienen en el proceso como es el pH excesivamente bajo o muy alto o la ausencia de iones como el potasio, sodio o magnesio.

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto de tesis con enfoque experimental se centra en la implementación de un sistema mecatrónico diseñado para optimizar la reproducción de microalgas, usando como organismo modelo la microalga *Chlorella sp.* El objetivo de este experimento es desarrollar un dispositivo mecatrónico capaz de monitorear y controlar variables claves en la reproducción de la microalga para ser usada posteriormente como una alternativa de biofertilizante para el sector agro en la sabana de Bogotá.

La importancia del desarrollo económico y la seguridad alimentaria se ve amenazada por la degradación del suelo, el uso excesivo de fertilizantes químicos tiene una gran relevancia en esta problemática generando un impacto negativo tanto en el medio ambiente como en la salud humana. Por ello, es imperativo explorar alternativas más sostenibles, como el uso de biofertilizantes, entre los que destacan las microalgas. Sin embargo, es evidente la falta de tecnología disponible en el sector agrícola colombiano, especialmente la falta de equipos asequibles para controlar las condiciones de reproducción de estos cultivos.

En este contexto, es crucial resaltar las bondades de la microalga *Chlorella sp* como solución natural a los diversos problemas que enfrenta el sector agrícola y en especial la sabana norte de Bogotá. Esta cepa fue estudiada en el desarrollo de un dispositivo mecatrónico a escala piloto. Este dispositivo permitirá controlar variables críticas como la temperatura, así como monitorizar otros parámetros como el pH, la turbidez y la iluminación. Al mismo tiempo que es capaz de registrar cada dato en una database en SQL server donde se logra estudiar alguna anomalía presente en el cultivo cuando se genere un valor atípico del sistema.

Mediante experimentos de laboratorio y sensores especializados, se determinó la curva reproductiva de la microalga *Chlorella sp* donde se evidencio que el control dispuesto en el sistema mejoro su reproducción. Lo que justifica nuevos estudios en diferentes rangos de temperatura, así como continuar ampliando el control a otras variables como el control de suministro de CO₂ para el cultivo.

El seguimiento se llevó a cabo mediante muestreos periódicos de microalgas individuales de cada tanque. Estas muestras representarán el estado de las poblaciones en diferentes momentos del periodo de estudio, que durará un mes. Tomando estas muestras cada tres días, será posible captar y analizar los cambios en la biomasa y la turbidez de los cultivos a lo largo del tiempo. Esto proporcionará una imagen dinámica del proceso reproductivo en respuesta a la regulación de la temperatura, permitiendo así una comprensión más completa de su comportamiento y de su uso potencial en la agricultura sostenible.

Los resultados obtenidos mediante la prueba t de Student para las medias de dos muestras suponiendo varianzas desiguales indican una diferencia significativa en los valores medios de turbidez entre los grupos experimental y de control. Se observa que el grupo experimental, sometido a un control constante de la temperatura, presenta una turbidez significativamente mayor que el grupo de control. Además, es evidente que el control de la temperatura tiene un efecto positivo sobre la reproducción de la microalga *Chlorella sp*, lo que apoya la hipótesis de trabajo propuesta.

En cuanto a las conclusiones, se destaca el efecto positivo del control de la temperatura sobre la reproducción de las microalgas, así como la importancia de monitorizar y controlar otras variables ambientales como el pH, la luminosidad, y la turbidez. Se resalta el potencial de la microalga *Chlorella sp* para la producción sostenible en la sabana de Bogotá, aunque se reconoce la necesidad de realizar estudios adicionales para evaluar su efectividad como biofertilizante en condiciones de campo. Además, se resalta la importancia de tomar precauciones al instalar y calibrar los sensores para asegurar mediciones precisas y evitar posibles errores.

PALABRAS CLAVE: Agricultura, biofertilizante, control, eficiente, microalgas, monitoreo, sistema mecatrónico.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente, el mundo opera de una manera exponencial en la producción agrícola, esto debido a la demanda global de alimentos por lo tanto hace que la producción agrícola aumente de forma exponencial, haciendo de la agricultura una fuente de desarrollo para el crecimiento económico de muchos países. Por esta razón, es de vital importancia darle el reconocimiento necesario al papel que juega el sector agrícola en cuanto al suministro de alimentos, el desarrollo económico, la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria (Perfetti & Becerra, 2013).

Teniendo en cuenta la seguridad alimentaria (SA) como una de las situaciones más importantes a seguir y ante las crecientes tendencias negativas, que incluyen el crecimiento de la población mundial, la urbanización progresiva y los cambios climáticos, incrementando así las preocupaciones sobre la posibilidad de garantizar la seguridad alimentaria a escala mundial (Marzęda-Młynarska, 2019). Esto implica que la SA baja, aparece cuando las personas tienen una reducción en la calidad, la variedad, la deseabilidad y hasta en la ingesta de alimentos debido a la contaminación del suelo (Castell et al., 2015).

En este sentido, el suelo tiene un impacto significativo en las actividades sociales y económicas de las comunidades que lo utilizan, experimentando deterioro debido a prácticas agrícolas inadecuadas y el uso de productos químicos (Gardi C, 2014). La contaminación del suelo, según la FAO, proviene de actividades que incluyen agroquímicos como fertilizantes y plaguicidas, así como productos derivados del petróleo los cuales se liberan de manera descontrolada en suelos de producción de alimentos. Restaurar y fortalecer las propiedades nutricionales del suelo es esencial para cultivar alimentos seguros.

Se debe considerar los diferentes factores que inciden en los suelos agrícolas tales como los residuos industriales señalados por la FAO, debido a que estos tienen consecuencias significativas en las características naturales del suelo. Cada etapa del proceso de producción de alimentos desempeña un papel crucial en la obtención de materias primas a nivel mundial, desde la preparación del suelo hasta la cosecha y post cosecha de los cultivos. La producción tiene un impacto directo en la calidad

y cantidad de los alimentos ofrecidos al consumidor. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estos factores para garantizar la sostenibilidad y calidad de la producción agrícola a nivel mundial y en el territorio colombiano.

La susceptibilidad del suelo se encuentra en la compactación de este, dando así el problema de la pérdida de propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que afecta directamente su fertilidad (Fertilab, 2022). El suelo es un recurso limitado y los procesos naturales que lo forman, desarrollan y restauran no ocurren al mismo ritmo que la degradación causada por el uso de fertilizantes químicos. Las propiedades físicas del suelo pueden ser fácilmente observadas y medidas sin alterar su composición química, y están relacionadas con la circulación de aire, calor, agua, raíces y nutrientes.

Las propiedades nutricionales del suelo se ven descompensadas por el uso indiscriminado de agroquímicos y cómo estos perjudican directamente la producción de cultivos, la salud y bienestar de la población, (Fao, 2019). Además, se ha identificado el exceso de nitrógeno en los suelos como el principal causante de acidificación y salinización ya que este elemento presenta una transformación de nitrificación y genera una alteración química (Iberdola, 2020).

El principal contribuyente a los problemas ambientales presentes en la agricultura es la aplicación excesiva de fertilizantes y estiércoles dando como resultado la acidificación del suelo. El uso ineficiente de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo (N-P) en los fertilizantes hacen que disminuya su pH. además, el exceso de nitrógeno conduce a la acumulación de nitratos y su filtración en cuerpos de aguas superficiales. Por otro lado, el exceso de fósforo contribuye a la eutrofización de las fuentes de agua, representando una amenaza para la salud humana dando así un impacto negativo en la calidad del suelo y en el entorno ambiental (Kanter, 2018).

Para abastecer la creciente población, en el siglo XX se comenzaron a implementar fertilizantes con compuestos como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), que aportan nutrientes y ayudan a regenerar suelos poco productivos. Sin embargo, el uso excesivo de estos compuestos se convierte en contaminante para los suelos. La demanda de fertilizantes ha aumentado considerablemente a nivel mundial a lo largo de los años como se observa en la gráfica 1, lo que ha llevado a un uso descontrolado de los mismos con la idea errónea de que más fertilizante resulta en

una mayor producción y beneficios para el suelo. Esto ha ocasionado graves problemas ambientales, como se menciona en el estudio de (Withers et al., 2014).

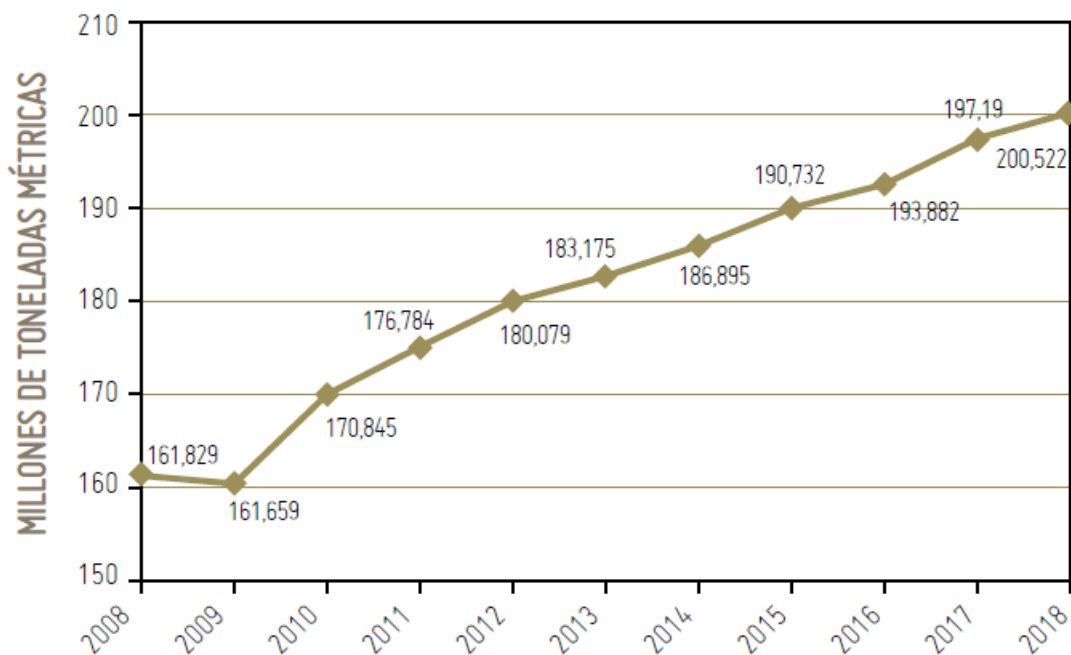


Figura 1. Consumo global de fertilizantes sintéticos.
Fuente: FAO 2019.

Se puede observar según la gráfica 1 que en los últimos años el uso de biofertilizantes a nivel global va en aumento. Como se ha mencionado anteriormente el suelo agrícola se ve afectado además de no tener una adecuada absorción de los nutrientes, dando así una baja probabilidad de tener una óptima cosecha. La implementación de fertilizantes nitrogenados sin control puede contaminar el agua con nitrato lo cual causa problemas de salud en las personas como metahemoglobina lo cual reduce el oxígeno que se transporta en la sangre y en los niños puede generar malformaciones en el sistema nervioso central (Vega Oliva, 2017).

En Colombia, el uso excesivo e indiscriminado de fertilizantes químicos no es una excepción, ya que es una práctica común entre los agricultores que buscan mejorar la productividad de sus cultivos (Orlando & Poveda, 2019). Esta práctica puede tener consecuencias graves para el medio ambiente, la biodiversidad, la degradación de

los suelos y la contaminación de las aguas subterráneas. Según el censo agropecuario de 2014, en Colombia se cultivan 8.577.010 hectáreas, siendo el 78,18% de estas hectáreas las que se cosechan (Orlando & Poveda, 2019).

La región de la Sabana de Bogotá es una importante zona de producción agrícola, hay diversos cultivos como papa, zanahoria, lechuga, cebolla, fresas, uvas y hierbas aromáticas. Sin embargo, el sector agrícola de esta región enfrenta desafíos como la escasez de recursos hídricos para el riego, la contaminación del aire y del agua, y el mal uso de fertilizantes químicos como la urea, que es comúnmente utilizada debido a su bajo costo y alta concentración del 46% de nitrógeno (Lombo, 2021).

A medida que aumenta la demanda de fertilizantes, los precios de los agroquímicos también aumentan, lo que hace que muchos agricultores no puedan permitirse los altos costos. De hecho, el aumento en los precios de los fertilizantes químicos puede poner en peligro la rentabilidad de los cultivos (Conislla et al., 2023). Por lo tanto, es necesario buscar alternativas más sostenibles y responsables para el uso de los fertilizantes en el sector agrícola de la región, que sean más rentables para los agricultores y menos perjudiciales para el medio ambiente y la seguridad alimentaria del país.

La escasez de tecnología en el sector agrícola agrava estas dificultades y restringe la capacidad de los agricultores para adoptar prácticas más sostenibles y eficientes. Entre los numerosos desafíos que enfrentan los agricultores, se destaca la limitación en el acceso a herramientas de monitoreo y control, fundamentales para optimizar las condiciones de cultivo y aumentar los rendimientos (Jiménez, 2024). Una de estas alternativas que se viene desarrollando actualmente es el uso de fertilizantes biológicos como las microalgas, que disponen al sector agro una concentración de nutrientes esenciales mejorando el rendimiento de los cultivos. El crecimiento y reproducción de estas se ve limitada por su entorno, ya que, para maximizar su rendimiento se deben tener condiciones ambientales, lumínicas y nutricionales específicas. Factores como la cantidad y calidad de luz que reciben, la temperatura, el pH y el medio de cultivo (agua) junto con la concentración de dióxido de carbono (CO₂) condicionan el crecimiento de esta. Estas son variables que afectan la reproducción de las microalgas, es por ello por lo que deben ser monitoreadas y controladas adecuadamente para su óptimo desarrollo (Collahuazo Reinoso & Araujo Abad, 2019).

La limitación en la disponibilidad de dispositivos asequibles y de bajo costo para monitorear y controlar las condiciones específicas en la agricultura restringe la capacidad de los agricultores para aprovechar el potencial de las microalgas y así mejorar la productividad agrícola; en consecuencia, urge el desarrollo de dispositivos mecatrónicos económicos que puedan supervisar y controlar las condiciones de crecimiento de microalgas como *Chlorella*. Cabe resaltar que esto proporcionaría a los agricultores una herramienta efectiva para mejorar tecnológicamente sus prácticas agrícolas y que a su vez sean amigables con el medio ambiente (Jiménez, 2024).

A raíz de la problemática presentada anteriormente se desea indagar sobre: **¿Qué influencia ejerce un control de temperatura en la tasa de reproducción de la microalga *Chlorella* para su posterior uso como alternativa de biofertilizante en la agricultura de la sábana de Bogotá?**

Al abordar esta pregunta, se espera no solo avanzar en la comprensión de los factores que inciden en el cultivo exitoso de microalgas, sino también proporcionar una solución práctica y accesible en cuanto a la productividad y sostenibilidad en el sector agrícola.

3. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento de la población a nivel mundial ha incrementado con el tiempo, lo que implica que el sector agrícola debe aumentar la producción de cultivos para satisfacer las necesidades de más personas (Stewart W, 2022). Se espera que la población mundial aumente aproximadamente en un 40% en un período de 40 a 45 años. A nivel global, se evidencia la necesidad de incrementar el rendimiento de los cultivos y la eficiencia de la producción para suplir las futuras demandas. Por ejemplo, en Estados Unidos, la producción de maíz, y en Asia, la producción de arroz, actualmente alcanzan entre el 40% y el 65% de su potencial de rendimiento, lo que indica la necesidad de aumentar entre un 70% y un 80% para satisfacer la demanda alimentaria en el futuro (Stewart W, 2022).

Para abordar esta necesidad alimentaria como antes, la industria, ha llevado a una sobreexplotación de los suelos, resultando en la pérdida de nutrientes y en la falta de parámetros óptimos para los cultivos, ya sea debido a fenómenos naturales o a la intervención humana (Omaña-Silvestre, 2019). Los cambios frecuentes en el uso de la tierra no permiten un estudio adecuado de las propiedades químicas del suelo, especialmente en relación con la fertilidad de los cultivos. Esto puede resultar en problemas anticipados y una reducción significativa del impacto negativo en la pérdida de nutrientes, que es uno de los factores que alteran los suelos agrícolas.

Según Martin Calcagno, (2021), la optimización adecuada del uso del suelo y la rotación de cultivos implica alternar diferentes variedades de cultivos con distintas necesidades nutricionales a lo largo de varios ciclos de producción. Esto tiene varios beneficios, como aumentar los ingresos del agricultor, reducir los costos económicos, evitar efectos negativos en la agricultura y disminuir la propagación de enfermedades específicas de un solo cultivo. Además, la rotación ayuda a evitar la descompensación de los suelos y las consecuentes actividades necesarias para equilibrarlos, lo que lleva a los agricultores y empresas del sector agrícola a buscar soluciones para garantizar el desarrollo nutricional adecuado de sus cultivos

Por otro lado, se plantea el uso de técnicas de fertilización orgánica como la microalga *Chlorella*, que no solo benefician a los agricultores al reducir su dependencia de costosos productos sintéticos del mercado, sino que también representan una alternativa efectiva para mejorar el estado nutricional del suelo, incluyendo nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio. Estos métodos

orgánicos tienen un impacto positivo en la estructura y biodiversidad del suelo, en contraste con los fertilizantes químicos, lo que es crucial para mantener la salud del suelo, la sostenibilidad de la producción agrícola y minimizar el impacto ambiental (Insuasti & Burbano, 2013).

Sin embargo, para profundizar en las alternativas naturales, es crucial explorar más a fondo las propiedades nutricionales de las microalgas en el ámbito agrícola. Estas diminutas formas de vida pueden desempeñar un papel crucial como reguladoras de nutrientes para el suelo, satisfaciendo las necesidades óptimas de los cultivos gracias a su rica composición nutricional. Además de proporcionar una liberación gradual de nitrógeno y contener una amplia gama de microelementos esenciales, las microalgas ofrecen una ventaja adicional: la ausencia de semillas que puedan germinar y convertirse en malezas en los campos de cultivo. Este aspecto beneficioso no solo contribuye a la salud de los cultivos, sino que también tiene un impacto positivo tanto en el plano social como en el económico, promoviendo así el desarrollo global de la agricultura sostenible (Vargas Días, 2019).

Cabe mencionar que existe una variedad de aproximadamente 50.000 algas alrededor del mundo las cuales tienen diversas ventajas según la implementación. Como lo determina (López-Padrón et al., 2020), las macro y microalgas han demostrado un eficiente funcionamiento como bio estimulantes, biofertilizantes, promotores del crecimiento y rendimiento de las plantas en cultivos, mitigadores de estrés abióticos y biocidas. Los efectos positivos que generan los extractos de algas van desde la germinación temprana de las semillas, la calidad de las frutas hasta la mejora de las defensas de las plantas frente a plagas y patógenos.

Añadiendo a lo anterior, se evidencia una eficiencia en las plantas lo cual se recomienda la implementación de los bio productos a base de algas en la agricultura moderna gracias a sus micronutrientes, aminoácidos, vitaminas y fitohormonas vegetales. La eficiencia de la implementación de las microalgas en cultivos se refleja en un estudio realizado en la universidad de la sabana. El estudio se basa en implementar aproximadamente 200 semillas de brócoli en las cuales se escogen 8 semillas geminadas de forma aleatoria, en las cuales miden longitud de tallo y de raíz. En las semillas geminadas en las cuales se implementa el biofertilizante a base de microalgas se evidencia un crecimiento más rápido (Chacón Lee, 2010).

El cultivo de algas presenta varias bondades destacables las cuales asegura (Hernández Pérez & Labbé, 2014). Por el otro lado, es beneficioso en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad depuradora conocida como fitorremediación, que permite la eliminación o biotransformación de contaminantes. El cultivo de algas contribuye a la captura de CO₂, ayudando a la mitigación del cambio climático. Otra ventaja es su rápida tasa de crecimiento, permitiendo un uso eficiente de los recursos durante el proceso de cultivo. Una vez cultivadas, las algas pueden ser utilizadas como biofertilizantes para los cultivos agrícolas, uso para biodiesel, uso cosmético, super alimento entre otros beneficios.

Resaltando todo lo anterior se destaca la necesidad de la implementación de una agricultura sostenible día a día se convierte en una obligación. Según (López-Padrón et al., 2020) el incremento en el uso de productos biológicos es uno de los retos de la agricultura moderna, buscando alternativas más sostenibles para la región de la sabana de Bogotá. La implementación de las algas es una de las alternativas considerables debido al alto valor nutricional que poseen sus aportes biofertilizantes.

Así mismo esta propuesta puede ser una estrategia sostenible para los agricultores ya que aumentaría sus utilidades y a su vez se vería reflejada en la reducción de los precios para el consumidor final. Al reducir el uso de fertilizantes químicos se minimizarían los impactos ambientales asociados a su uso, lo que a su vez mejoraría la calidad de los recursos naturales usados en la producción de alimentos, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y a cumplir los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) a nivel nacional e internacional, como se menciona en el "Análisis de los impactos ambientales ocasionados por el uso de los fertilizantes nitrogenados en el cultivo de papa en el municipio de Zipaquirá" (Lombo, 2021).

El ICA en su resolución No. 000698 designa un tiempo para realizar las pruebas de ensayo. En el Artículo 8 "TRAMITE PARA REALIZAR EL ENSAYO DE EFICACIA AGRONÓMICA DE UN PRODUCTO A REGISTRAR" en el cual el protocolo tendrá una vigencia de tres años, durante este tiempo se debe de realizar la prueba de ensayo de eficacia del biofertilizante en dos zonas agroecológicas distintas. Por tal motivo la primera fase y objetivo de este proyecto es realizar el dispositivo mecatrónico capaz de reproducir adecuadamente la microalga para posteriormente en un trabajo futuro poder pasar a las pruebas de ensayo tal cual lo menciona el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2011).

La propuesta de grado se fundamenta en las líneas institucionales y de investigación de la Facultad de Ingeniería Mecatrónica. Según (Andrés Ríos M et al., 2019) el desarrollo rural implica mejorar el bienestar de la población utilizando los recursos naturales. Además, la agricultura de precisión, como señalan (García & Flego, 2022), ofrece el enfoque de aplicar la cantidad correcta de insumos en el momento y lugar adecuados para satisfacer las necesidades del sector agrícola. La elección de la microalga *Chlorella* como organismo modelo se basa en su versatilidad y potencial como biofertilizante. Es importante destacar que el sistema mecatrónico desarrollado para monitorear y controlar las condiciones de cultivo de *Chlorella* puede adaptarse a una variedad de distintas especies de cultivo según se requiera, lo que lo hace relevante para diversas aplicaciones agrícolas en cuando a la necesidad de adoptar prácticas agrícolas sostenibles y eficientes, que cada vez más se necesita, especialmente ante los desafíos globales como la sobreexplotación de suelos y la escasez de recursos naturales. La tecnificación del sector agrícola, mediante herramientas como el dispositivo mecatrónico propuesto, ofrece una solución prometedora para mejorar la productividad y la sostenibilidad de la agricultura.

De igual manera poder comprender las condiciones óptimas para la producción de microalgas necesarias para maximizar su rendimiento y utilidad en diversas aplicaciones, incluida la fertilización del suelo. Las condiciones ambientales, como la temperatura, el pH, la luz y la disponibilidad de nutrientes, desempeñan un papel fundamental en el crecimiento y la reproducción de las microalgas. Por lo tanto, es necesario investigar y controlar estas variables para garantizar unas condiciones óptimas que mejoren la productividad de las microalgas.

Además, la aplicación de microalgas como biofertilizantes ofrece una solución prometedora para mejorar la salud del suelo y aumentar la eficiencia de la producción agrícola. Las microalgas tienen una composición rica en nutrientes que puede beneficiar a los cultivos aportando nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio de forma natural y sostenible. Al destacar estas ventajas, se destaca la importancia de la investigación y el desarrollo tecnológico para explotar el potencial de las microalgas en la fertilización del suelo, contribuyendo así al fomento de prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes (Nieves et al., 2015).

El proyecto tiene como objetivo desarrollar un dispositivo tecnológico que satisfaga las necesidades básicas de reproducción de microalgas, para que estas puedan ser evaluadas posteriormente como una alternativa de biofertilizante en la sabana de Bogotá. Este dispositivo es capaz de controlar la variable temperatura y monitorear las demás variables críticas como lo son: pH, iluminación y turbidez, para el crecimiento y reproducción idónea de la cepa de microalga a estudiar. Este control preciso es esencial para optimizar la productividad y eficiencia en la agricultura, ya que permite detectar y corregir problemas en tiempo real, asegurando así rendimientos más altos y de mejor calidad en los cultivos y evitar la dependencia con los agroquímicos usados actualmente.

El dispositivo tendrá la implementación de un control de la temperatura ya que en los cultivos de microalgas es esencial para mejorar productividad de reproducción de esta. Obteniendo una temperatura estable en el medio de cultivo, lo que evitara problemas en el crecimiento de la microalga y a su vez permitiendo corregir cualquier perturbación que pueda surgir dentro del sistema. Mientras que a su vez se estarán monitoreando y registrando las demás variables claves para su reproducción. Cabe mencionar que el controlador será capaz de mantener continuamente la cantidad de calor suministrado al medio de cultivo y que el sistema propuesto está abierto a ser usado en diferentes sistemas según la necesidad lo requiera (Fernández García et al., 2006).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de monitoreo y control de bajo costo para las variables físicas de crecimiento de la microalga *Chlorella sp* como organismos modelo, con el fin de obtener un biofertilizante como alternativa sostenible para la sabana de Bogotá.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar el montaje y la interfaz de monitoreo desde Python para las variables claves en la reproducción de la microalga (pH, intensidad lumínica, temperatura y turbidez).
- Desarrollar el control de temperatura del medio de cultivo que propicie la reproducción de la microalga mediante la interfaz desarrollada.
- Evaluar el sistema mecatrónico mediante el monitoreo y control de la reproducción de la microalga en condiciones piloto mediante la turbidez como indicador de la densidad celular en el medio de cultivo y el peso de la biomasa con el fin de obtener datos cuantitativos sobre su reproducción.

5 MARCO REFERENCIAL

5.1 ESTADO DEL ARTE

Las microalgas tienen una variedad de composiciones proteicas las cuales brindan un amplio campo de uso dando así múltiples posibilidades de beneficios, lo que abre nuevos horizontes para su uso. A medida que surge la necesidad de abordar el cambio climático y otras problemáticas sociales que se viven actualmente, estas microalgas emergen como una solución potente. Sus múltiples ventajas abren puertas en diversas áreas, como energía, nutrición y salud, agricultura, cosméticos y biofertilizantes, incentivando la exploración de métodos innovadores de cultivo para su propagación. (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Las diferentes investigaciones realizadas conllevan a probar diferentes métodos de cultivos para las microalgas los cuales se dividen en dos: sistemas abiertos y sistemas cerrados. García Romeral et al., (2017) indica que los sistemas abiertos se encuentran abiertos a la atmosfera y los parámetros fisicoquímico son difícilmente controlables debido a que están expuestos al medioambiente con el riesgo de contaminación por agentes externos al cultivo por patógenos. Los sistemas cerrados presentan la ventaja de estar totalmente aislados presentado un ambiente más estable y controlado como la variable temperatura la cual tiene un resultado mejor en la reproducción del cultivo.

Según Borowitzka, (2005) los ambientes abiertos son mejor opción para la reproducción de microalgas en masa, por ejemplo, para producciones de 10.000 a 1.000.000 litros los cuales son usados primordialmente para cultivos con fines comerciales. En este tipo de ambiente no se tiene principalmente un control de temperatura o humedad, dado que las diversas especies de algas requieren diferentes requisitos ambientales y son bastantes específicos

Los fotobiorreactores son una alternativa implementada para el cultivo de microalgas como menciona Herrera Sánchez, (2020). Sobre la especie *Chlorella sp* Herrera habla acerca del control de las propiedades físicas como el pH, temperatura, el flujo de CO₂ y propiedades químicas como es el uso de los micronutrientes y macronutrientes. El proceso es realizado en tres fases:

- La primera fase realiza el cultivo de la microalga y la implementación del fotobiorreactor y determinan la curva de crecimiento.
- La segunda fase es la producción de la biomasa y centrifugado de las microalgas.
- La tercera y última fase es la extracción de lípidos con el fin de obtener la biomasa para transformarla en biodiesel obteniendo un rendimiento del 57.17%.

La implementación de un fotobiorreactor para el cultivo de algas que realizaron Contreras Flores et al. (2003) obtuvo un bajo rendimiento debido a que estaban limitados en la adquisición de un sistema abierto de tipo carrusel el cual está conformado por una estructura que permite la rotación de las microalgas de manera continua en forma de zigzag, en este el rendimiento de la biomasa obtenidos en la práctica fue inferior al rendimiento teórico. A raíz del experimento y estudios realizados proponen la implementación del régimen luminoso en fotobiorreactores de sistema cerrado con baja luminosidad en ciclos de luz y oscuridad elevados, con una frecuencia media alta y con un mezclado de alto rendimiento con resultados más altos que los rendimientos teóricos.

Basándose en investigaciones previas, Ruiz Martínez, (2011) implementó un biorreactor de membranas anaeróbico en un cultivo de microalgas, estimando que sea apropiado para la alta concentración de nutrientes, alcalinidad y bajo contenido en materia orgánica. Con el objetivo de comprobar la viabilidad del cultivo de algas autóctonas bajo condiciones controladas de: luz, temperatura y nutrientes en la eliminación de un agua residual. El sistema propuesto logro un aumento en la biomasa ya que aumentaron su población y eliminación por parte de los nutrientes recuperados de forma anaeróbica además de la eliminación del fosfato y amonio presenten en el medio de agua residual.

En el avance de Ortiz Villota et al., (2018) sobre los cultivos de las microalgas y los diferentes métodos que se pueden desarrollar implementan esterilización por ultrasonido en una frecuencia de 40 Hz por 30 minutos, potencia de 80 W y una temperatura de 20 °C, usan luz natural con fotoperiodos de 12 horas oscuridad con 12 horas luz y el método de aireación implementado es por un motor de aire de 10 l/min.

Para el experimento realizado requieren remover altos valores de nitratos. Para lograrlo ponen tres tipos de algas en diferentes cultivos y concluyen que la cepa Cv

(*Chlorella Vulgaris*) tiene una remoción del 87.2%, las cepas de Sp (*Spirulina máxima* y *platensis*) no alcanzaron a superar el 82%. Permite concluir que la Cv es más eficiente para remover nitratos y en menos días que las Sp.

Se han realizado diferentes sistemas controlados dentro de los cuales se encuentra uno relacionado a la agricultura, no específicamente para producción de algas, como lo menciona Garzón Parra, (2019). Se realiza en ambientes controlados como los son los invernaderos para lograr una distribución de luz homogénea, para esto se utilizan sensores para medir la intensidad lumínica en diferentes ubicaciones, en este caso se programa un Arduino para adquirir la información de los sensores en tiempo real, obteniendo gráficas y monitoreo constante y comparando datos adquiridos con la referencia establecida.

Un estudio realizado en Argentina, en el cual el enfoque se dirige en evaluar los niveles de iluminación en una sala de propagación agámica de plantas utilizando un sistema pasivo de iluminación natural. La eficiencia del sistema varía según las condiciones climáticas, obteniendo mejores resultados en días de cielo despejado y menor eficiencia en días de cielo cubierto. En el resultado de este tipo de sistema se tiene un importante ahorro energético en comparación con el uso de iluminación artificial (Ferron et al., 2011).

Para realizar un cultivo es primordial tener en cuenta no solo las condiciones necesarias de las microalgas para su reproducción sino también para evitar contaminaciones virales que las algas puedan contraer. Para no cometer este error Lawrence, (2005), da recomendaciones de cómo poder identificar las condiciones ideales y evitar la contaminación antes de realizar el cultivo.

Para ello propone la revisión de los frascos donde se almacenan las microalgas, observar si algunas de ellas se encuentran en el fondo del recipiente con cambio de coloración perdiendo su pigmentación verdosa; para evitar esto se debe manejar un ambiente previamente preparado, aplicando soluciones o detergentes de preferencia de laboratorio y evitando pérdidas dentro del cultivo.

Hay diferentes estudios para la obtención de bioproductos de microalgas como alternativa a los fertilizantes químicos en la producción de cultivos. La microalga *Chlorella sorokiniana* se cultivó en condiciones controladas y su biomasa se utilizó para cultivar plantas de arroz (Huang et al., 2016). En este estudio se encontró que el uso de bioproductos mejora crecimiento de las plantas en comparación con los

fertilizantes químicos. También se ha demostrado que el uso de bioproductos de microalgas puede ser una alternativa sostenible y rentable a los fertilizantes químicos.

El artículo de (Molina Grima et al., 2003), analiza la importancia de los entornos controlados para el cultivo de microalgas y se examinan los diferentes fotobiorreactores disponibles. Enfatizan la necesidad de mantener las condiciones adecuadas de luz, temperatura, pH y nutrientes para lograr un crecimiento óptimo. La revisión incluye varios estudios que muestran la eficiencia de los fotobiorreactores para la producción de biomasa y compuestos de interés, así como los desafíos y limitaciones que aún existen en la tecnología. Concluyen que el cultivo de microalgas en fotobiorreactores es un método prometedor para la producción sostenible de bioproductos, pero se necesita más investigación y desarrollo para optimizar la tecnología y mejorar su viabilidad económica.

Las diferentes técnicas de control y modelado y control según Guzmán et al., (2021) son un papel fundamental en la optimización de los sistemas de biorreactores en condiciones estables y semi-controladas. Las microalgas tienen la capacidad de convertir la energía solar y fuentes carbónicas como el CO₂ en biomasa, por ende, la importancia del monitoreo y control de esta variable ya que repercute en el aumento del pH siendo una variable que afecta la reproducción de la biomasa.

Por la importancia del control en las diferentes variables como temperatura y CO₂ según Gorrini et al., (2021) implemento un controlador EKF-NMPC para desarrollar una estimación de estados y control de cultivos, implementado un control predictivo no lineal y obtuvo una mejora en los criterios de desempeño con fines de optimización de los cultivos. El controlador NMPC permite maximizar la productividad de las microalgas, mientras que el observador EKF presenta un rendimiento del 24,2% en lazo cerrado mientras que en lazo abierto presenta un rendimiento de 18,6%.

5.2 MARCO HISTÓRICO

La fertilización basada en algas es un campo de un alto interés en los últimos años. La preservación del ecosistema y la baja escasez de los recursos actuales han desarrollado la necesidad de un sistema de producción agrícola que aproveche los nutrientes de manera efectiva (López Solana, 2022). La implementación de las algas

como biofertilizante puede aportar ventajas económicas y evitar los riesgos medioambientales causados por el exceso de fertilizantes sintéticos.

El uso de las microalgas a través del tiempo se ha implementado en diferentes áreas por sus beneficios por lo cual se tiene el interés de producir la biomasa. Los cultivos de microalgas se han desarrollado anteriormente para la producción de alimentos como lo determina (FAO, 2022) quien asegura que su uso también se ha implementado para generar biocombustibles. Por estas razones se han realizado diferentes experimentos para realizar un cultivo apto para la biomasa en donde se tenga un mejor rendimiento y cuidados según su uso final.

La mayoría de los sistemas de producción industrial de biomasa de microalgas construidos en los años 90 fueron sistemas abiertos (Contreras Flores et al., 2003). Estos sistemas permiten alcanzar densidades celulares de hasta 0,7 g de células (base seca) por litro donde presentan como ventaja el bajo costo, pero implementados en grandes áreas de terreno debido a que el nivel del agua es poco profundo entre 15 y 20 cm aproximadamente.

Debido a las dificultades de contaminación que presentan los sistemas abiertos, se han desarrollado los sistemas cerrados. Estos permiten establecer cultivos de alta densidad celular, generando hasta tres veces más biomasa en comparación con los sistemas abiertos. Además, facilitan la cosecha de la biomasa y permiten un mejor control de las condiciones ideales del cultivo.

Las periódicas crisis de petróleo y el efecto invernadero han impulsado el uso de las microalgas. En particular, se ha evaluado su uso en la producción de biodiesel, con el objetivo de mejorar la calidad y la eficiencia del proceso. Para ello, se han desarrollado estrategias para adaptar y cultivar microalgas en condiciones artificiales. Estas estrategias controlan los parámetros más influyentes, como la luz, la temperatura, el pH, el CO₂, la agitación, la densidad y el oxígeno disuelto. Para ello, se utilizan microcontroladores que adquieren datos de estas variables y regulan su valor para mantenerlas dentro de un rango óptimo (Ynga & Niño, 2019).

5.3 MARCO TEÓRICO

La diversidad de microalgas y su versatilidad permiten su aplicación exitosa en varios campos industriales. Estas especies se encuentran en diversos entornos, como lagos, mares y ríos, con la posibilidad también de cultivarlas en suelos. Esta adaptabilidad sugiere un amplio potencial en sectores como la producción de alimentos y la generación de energía sostenible.

Las microalgas de forma general son organismos fotoautótrofos, es decir, obtienen la energía de la luz como se mencionó anteriormente. Sin embargo, algunas de las especies tienen la capacidad de desarrollarse con el uso de materia orgánica como fuente de energía o de carbono. Por eso se dividen en:

- Fotoautótrofa: Las algas obtienen la energía del sol y el carbono de compuestos inorgánicos (Ruiz Martínez, 2011)
- Foto heterótrofa: Obtienen la energía del sol y emplean compuestos orgánicos como fuente de carbono (Ynga & Niño, 2019).
- Mixotróficas: Son capaces de crecer bajo procesos tanto autótrofos como heterótrofos, de forma que la fuente de energía es tanta luz como materia orgánica. El carbono es obtenido de compuestos orgánicos y del CO₂ como la *Spirulina* (Pedraza Cuesta & Prada Garavito, 2018).
- Heterótrofa: Los compuestos orgánicos proporcionan tanto la energía como la fuente de carbono, existen en efecto algas que pueden desarrollarse bajo la ausencia de luz como la *Chlorella* (Pedraza Cuesta & Prada Garavito, 2018).

Para los métodos de cultivo de organismos fotosintéticos como lo son las microalgas encontramos:

- Cultivo en tanques abiertos al aire libre, permitiendo la entrada de luz solar y la circulación de aire (Mata et al., 2010).
- Cultivo en tanques cerrados donde se controla la luz, la temperatura, la aireación y el flujo de nutrientes para optimizar el crecimiento (Lee, 2001).

- Cultivo en columna de burbujas vertical donde las burbujas de aire generan una turbulencia que promueve la circulación y mezcla del agua y los nutrientes (Chisti, 2008).
- Cultivo en módulos planos en posición horizontal o vertical, permitiendo el control de la intensidad de la luz, la temperatura y el flujo de nutrientes (Borowitzka & Moheimani, 2013a).
- Cultivo en fotobiorreactores son sistemas cerrados que controlan la luz, la temperatura, la aireación y la mezcla para optimizar el crecimiento (Borowitzka & Moheimani, 2013b).

El cultivo de microalgas se puede realizar en diferentes ambientes controlados. Para lograr una adecuada optimización en el crecimiento, es importante considerar las distintas opciones disponibles como los sistemas cerrados en fotobiorreactores. Estos se dividen en dos partes según Guzmán et al., (2021), la columna de burbujeo, donde se lleva a cabo el proceso de aireación y control de temperatura; y el receptor solar, por donde circulan las microalgas mediante una bomba de impulsión para exponerlas a la radiación solar y permitirles realizar la fotosíntesis. Los fotobiorreactores cerrados son una opción a la calidad y cantidad de cultivo obtenido, ya que permiten un control más preciso de las condiciones ambientales y lo que puede llevar a una mayor producción.

Por otro lado, los fotobiorreactores usados de sistemas abiertos son comunes en la producción mundial de microalgas, ya que cubren más del 90% de producción total con esta tecnología. Estos reactores se suelen implementar con grandes tanques y poca profundidad con el fin de que el cultivo reciba la mayor cantidad de luz posible. Estos reactores están divididos en 3 partes: Un foso bajo el suelo que suele tener una profundidad máxima de 2 a 3 metros donde se realiza el proceso en el cual se hace la inyección de gases, un canal o receptor solar en forma de U por donde circulan las microalgas para recibir la radiación solar realizando una mejor fotosíntesis y unas aspas para poder impulsar el cultivo a lo largo del sistema.

5.3.1 Variedades de microalgas

Se deben analizar algunos tipos de microalgas las cuales tienen la posibilidad de ser implementadas en cultivos como alternativa de biofertilizantes. Rodríguez Castillo et al., (2016), consideran que las microalgas son biofábricas ya que

convierten el dióxido de carbono y la luz solar en biocombustibles, alimentos, fijación del nitrógeno y absorción del CO₂. Como se observa en la tabla 1 cada tipo de alga cuenta con sus propias características y algunas tienen un mejor uso en determinadas áreas.

Microalga/características	<i>Chlorella</i>	<i>Spirulina</i>	<i>Nannochloropsis</i>
Temperatura	27 ±1 °C	33 ±1 °C	22 ±2 °C
pH	7,2	8,5	8 ±1
Lux	2414 lx	No implementado	1000
información	implementación en biocombustible, super alimentos, cosméticos y biofertilizante	Uso en super alimentos, tratamiento de aguas negras, fuente energética y biofertilizantes.	Uso para alimentos en acuicultura y productos farmacéuticos
Autor	(Rodríguez-Castillo et al., 2016)	(Pedraza, 2023)	(Ma et al., 2016)

*Tabla 1. Tipos de algas
Fuente: elaboración propia.*

5.3.2 Características del cultivo

Un cultivo eficiente de microalgas depende de diferentes factores que intervienen en el proceso de desarrollo, lo que hace que sea un éxito, como se observa en los datos de la tabla 1 algunos de estos factores incluyen: la iluminación, la temperatura, transferencia de gases, el pH, la agitación y los nutrientes disponibles. Reconocer la estructura biológica de la microalga espirulina es importante ya que Mérida Ramírez, (2020) asegura que poseen una composición química que la acredita como un alimento altamente nutritivo, esto por la alta composición de proteínas, aminoácidos esenciales y otros compuestos de importancia alimentaria que se pueden aprovechar en el agro para compensar la falta de nutrientes NPK.

5.3.2.1 Iluminación

La intensidad de iluminación presente en el cultivo es un parámetro importante la cual se debe de tener en cuenta, ya que (Cruz López, 2018) explica que por medio

de este la productividad primaria se define como el proceso mediante el cual las sales inorgánicas se transforman en biomasa (material vivo), siendo realizada por organismos autótrofos que sintetizan estos elementos por medio de la fotosíntesis. La *Chlorella* al ser un organismo autótrofo no tolera altos tiempo de exposición a la luz debido a que esto puede generar el rompimiento de la pared celular por fotólisis.

(FAO, 2022): determina que para el cultivo las algas deben recibir entre (15.000-25.000) Lx (Lux), este valor varía según el recipiente implementado entre su altura y diámetro. Lo recomendado para la *Chlorella* es implementar un tiempo de 12 horas de luz y 12 horas de noche ya que por medio de estos intervalos de tiempo se lleva a cabo la asimilación de CO₂ en el día y en la noche presentan las reacciones de síntesis de proteínas. La cantidad de iluminación presente en los cultivos de laboratorio está presente en un rango de (2000-5000) luxes, según la concentración de biomasa presente.

5.3.2.2 Agitación

La agitación o la turbulencia presente durante el cultivo se genera con el fin de lograr una diseminación uniforme de la biomasa en el medio acuoso y para que la mayor parte de la biomasa tenga contacto con la luz. Hay que tener en cuenta la velocidad de agitación ya que si ésta es muy alta puede generar espuma que impide el paso de la luz y la disolución de gases. En algunos casos la implementación de bombas centrifugas o cascadas de agua no son bien aceptadas debido a la alta agitación que generan, para el caso de cultivos de menos de 10 litros, la agitación se puede realizar a través de intención de aire con un compresor de acuario. Los beneficios que presenta la agitación en las algas es impedir la sedimentación de las algas y su adherencia en las paredes del recipiente del cultivo y homogeniza el pH. Se debe tener en cuenta que no todas las especies toleran una agitación fuerte que provea los equipos implementados ya que hay algunas especies que son sensibles al estrés hidrodinámico (Ruiz Martínez, 2011).

5.3.2.3 pH

La biomasa requiere de un factor determinante para el desarrollo del cultivo que se encuentra en función de varios parámetros como la productividad, la actividad metabólica, temperatura y suministro de CO₂. La alcalinidad aumenta por la asimilación del carbono presente en el cultivo, el pH se encuentra en la mayoría de los cultivos en un rango entre 7 y 9 con un pH óptimo entre 8,2 y 8,7. El control de

pH se puede regular mediante dos formas; aireación o adición de CO₂, para el caso de los cultivos que se encuentran en sistemas abiertos estos manejan un pH más alto para ser más resistentes ante los microorganismos a los cuales se encuentran expuestos (Mérida Ramírez, 2020).

5.3.2.4 Temperatura

La variación de temperatura provoca cambios en la velocidad de crecimiento, en el contenido de lípidos y en la composición de los ácidos grasos en la célula, además de que los efectos son diferentes según cada especie. Según (Lugo De Ossa, 2022), el crecimiento de *Chlorella* se ve afectado a temperaturas superiores a los 35 °C y una variación en la temperatura entre 25° a 30 °C desarrolla el incremento en la cantidad de lípidos de 5.9 a 14.7 % dando así como resultado un aumento en la productividad de los lípidos de 8 a 20 mg/l.d.

5.3.4.5 Turbidez

La turbidez es una medida de la cantidad de partículas en suspensión que se encuentra en el agua (*Folleto Informativo Turbidez*, 2023). Las microalgas tienen la capacidad de realizar este proceso de enturbiar el agua dando así la posibilidad de usar un sensor de turbidez. La absorbancia que permite el sensor de turbidez el cual está relacionado con la cantidad de luz que el cultivo permita pasar, es decir, entre más turbio es el medio de cultivo menos luz dejara pasar, dando un resultado de evolución del medio de cultivo.

La unidad de medida adoptada por el estándar ISO es FTU (Unidad de turbidez de la formazina) que es igual al NTU (Unidad nefelométrica de turbidez). Existen otros dos métodos usados para medir la turbidez y sus respectivas unidades de medida son el JTU (Unidad de turbidez Jackson) y las unidades de Silicio (mg/l SiO₂) (Guemisa, 2023).

	JTU	FTU(NTU)	SiO ₂ (mg/l)
JTU	1	19	2,5
FTU (NTU)	0,053	1	0,13
SiO ₂ (mg/l)	0,4	7,5	1

Tabla 2. conversión de unidades de turbidez.

Fuente: (Guemisa, 2023)

5.3.3 Tipos de cultivos

Al tener seleccionado el tipo de microalga a cultivar según (Castro Bustamante, 2018) se debe de escoger el tipo de cultivo que se realizara para la reproducción de la biomasa dentro de las cuales están:

5.3.3.1 Cultivo autótrofo

La implementación del cultivo requiere de un matraz de cristal o botellas de cristal o plástico transparente para el almacenamiento del cultivo de las algas, la capacidad puede variar según la necesidad de algas que se requiera para el cultivo y el volumen de crecimiento se frena en el punto donde la densidad celular no permite la penetración de la luz en el cultivo. Así mismo el tanque contendrá diferentes sensores controlados mediante Arduino los cuales ayudaran a tener un monitoreo constante lo cual beneficia una adecuada reproducción de las algas (Fao, 2006).

Es un sistema de cultivo el cual presenta un costo de construcción y de operación bajo como ventaja, se basa en la obtención de energía por medio de la luz solar, es decir, utiliza la fotosíntesis como fuente de energía y fija el CO₂ de la atmosfera. Este tipo de cultivos se pueden llevar a cabo en algunos fotobiorreactores como estanques abiertos, fotobiorreactores cerrados de tubo y fotobiorreactores cerrados de placas planas.

5.3.3.2 Cultivo heterótrofo

5.3 Al tener seleccionado el tipo de microalga a cultivar según (Castro Bustamante, 2018) se debe de escoger el tipo de cultivo que se realizara para la reproducción de la biomasa dentro de las cuales están:

Se basa en el desarrollo de las microalgas en ambientes con ausencia de luz por ende se implementan azúcares como fuente de carbono como azúcar de remolacha, maíz, caña de azúcar, entre otros. Al usar la glucosa como fuente de carbono que más se utiliza en estas condiciones, ya que es con la que mayores producciones en biomasa se han conseguido en los diferentes estudios.

Este método de cultivo elimina dos de los principales problemas de los fotobiorreactores: permite el uso de prácticamente cualquier fermentador (tanque agitado) como biorreactor y también se logra mejorar la energía y los rendimientos, sin embargo, una de las limitaciones del cultivo heterótrofo es el costo de los sustratos orgánicos y la necesidad de una alta tasa de renovación del cultivo lo cual puede llegar a contaminar el medio ambiente si no se manejan adecuadamente.

Se reconoce también la importancia del ambiente controlado en los cultivos ya que es un espacio diseñado para mantener las condiciones en el cual los parámetros físicos y bioquímicos están predefinidos por la finalidad del espacio, teniendo en cuenta aspectos como la temperatura, la presión, las emisiones radiactivas, la humedad y la segregación de residuos. Los ambientes controlados son sistemas cerrados y permiten que las algas sean cultivadas siendo así los fotobiorreactores (Gutiérrez Barragán, 2017).

La elaboración y operación de los fotobiorreactores presentan un alto coste debido a los altos requerimientos de energía, el alto costo de los materiales de construcción y de los sistemas de control. Estos sistemas cerrados permiten la capacidad de controlar los principales parámetros del cultivo para estudiar su influencia y obtener productividades de biomasa más altas en comparación a sistemas abiertos. Las ventajas de estos sistemas permiten reproducir y mantener condiciones ambientales específicas, reduce la variabilidad en los resultados experimentales y en la producción industrial al mantener condiciones constantes y proporciona un ambiente seguro minimizando el riesgo de estar en contacto con agentes externos.

5.3.4 Sistema de control

Para tener un ambiente controlado de forma óptima se debe implementar algún sistema de control, lo cual es un conjunto de dispositivos que se encargan de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema o subsistema, también es conocido como planta dentro del sistema de control como indica Mendoza et al., (2018). Se implementa con el fin de controlar máquinas o

actuadores logrando mantener unos valores predeterminados dando así una probabilidad de fallo menor.

Entre los tipos de sistemas de control se encuentra: el control manual que no requiere ninguna tecnología, el control automático que utiliza un sistema automatizado para controlar y regular la operación de un proceso, el control en lazo abierto; este no tiene en cuenta la salida o el resultado del proceso, el cual se centra en la entrada o condiciones iniciales del sistema. Por otro lado, está el control en lazo cerrado que tiene en cuenta la variable entrada y salida, el cual hace ajustes para mantener la salida en línea con el objetivo del control y por último el control digital, utiliza dispositivos digitales como los microcontroladores o PLC (Controlador Lógico Programable) para controlar el proceso (López Sánchez, 2023).

5.3.4.1 Sistema de control realimentado

Los sistemas de control realimentados denominados también como sistemas de control de lazo cerrado según la figura 1, se caracteriza por tener un controlador por medio del cual se alimenta la suma entre la referencia y la salida. El control más conocido en este sistema es el PID (proporcional, integral, derivativo).

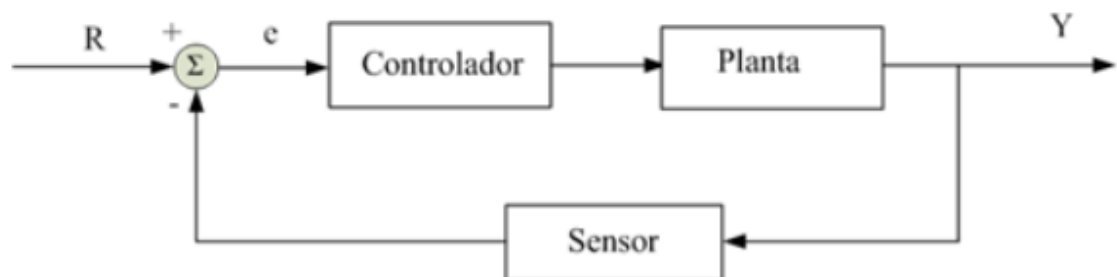


Figura 2. Sistema de control en lazo cerrado.
Fuente (Mendoza et al., 2018).

Analizando la figura 1 y la información de Adam (2020), los elementos de hardware de un sistema de control se constituyen por un controlador o elemento de registro, la planta o proceso, elementos de medición como: sensores y transductores. Según la figura 1 el sistema de control en lazo cerrado está conformado por:

- La planta representa un sistema de control, que se refiere al proceso o sistema físico que se está controlando. Es la parte del sistema que responde

a las acciones del controlador y que se desea influir o regular para lograr ciertos objetivos.

- Los elementos de medición están compuestos por tres elementos: el sensor el cual se encarga de realizar la medición de la variable de entrada del proceso. Los transductores son los elementos encargados de realizar el acondicionamiento de la señal enviada por el sensor para facilitar el envío de la información conocido como controlador y por ultimo los cables son implementadas para llevar la señal medida desde el dispositivo de medición hasta el controlador para realizar la conversión de señal digitales-analógicas o analógicas digitales en la planta.
- El controlador es el dispositivo que realiza el control escogido por el/los encargados. A este dispositivo llega la señal; la señal de medición del error que sería la referencia menos la salida de la planta.

Los controladores PID se clasifican en 3 acciones las cuales son; proporcional (P), integral (i), y derivativo (D). Su implementación se da según la necesidad o las condiciones del sistema según sus costos, disponibilidad, precisión, etc. Estos controles ofrecen al usuario la capacidad de programar su operación de modo que se realice de forma regular, es decir, si el sistema se ha preparado adecuadamente hace que el sistema sea independiente de las perturbaciones externas. Su clasificación se da según lo menciona Henríquez Novoa & Martínez Rodríguez, (2019) en:

- **Control proporcional:** Este control tiene una salida proporcional a su entrada en donde k_p es la constante de proporcionalidad. El sistema responde de manera proporcional a la señal de error, el error en un estado estacionario se reduce si incrementa la ganancia y esto dará una respuesta más oscilatoria.
- **Control integral:** La ganancia integral es una amplificación de la señal de error presente en el proceso, aunque no depende del tiempo. Este controlador elimina el error en el estado estacionario en respuesta a su escalón unitario.

- **Control derivativo:** La ganancia diferencial es proporcional a la velocidad del cambio del error e implementa una corrección anticipada del error con el fin de disminuir la sobre modulación del control frente a las perturbaciones.

Método de sintonización de Ziegler-Nichols

Ziegler y Nichols en 1942 implementaron dos parámetros de controladores PID. Estos métodos son implementados en su forma original o con alguna variación según Casignia V, (2016), a menudo constituyen la base de los procedimientos de sintonía de controladores más finos. Los dos métodos se basan en la determinación de algunas características de la dinámica del proceso, con el fin de lograr un sistema de control estable y con el rendimiento optimo.

La tabla muestra los valores de los parámetros del controlador PID para diferentes tipos de controladores (P, PI y PID) en función del tiempo muerto (θ) y la constante de tiempo (T) del proceso. La información proporcionada (θ , T y K) se puede utilizar para calcular los valores de los parámetros del controlador PID para un tipo de controlador específico utilizando las ecuaciones de la tabla.

Método de sintonización de Cohen-Coon

Es un método de sintonía para los controladores PID propuesto por Cohen y Coon en 1953 el cual se requiere una sintonía para procesos con un retado más elevado (Castaño Giraldo, 2021). Este método también supone que la dinámica tenga un comportamiento en forma de S, es decir que pueda ser representado por una función de transferencia de primer orden con retardo como se puede observar en la figura 2.



Figura 3. Respuesta del método de sintonización de Cohen-Coon.
Fuente: (Castaño Giraldo, 2021)

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$(1,03 + 0,35\left(\frac{\theta}{T}\right))\left(\frac{T}{K\theta}\right)$	-	-
PI	$\left(0,9 + 0,083\left(\frac{\theta}{T}\right)\right)\frac{T}{K\theta}$	$\frac{\theta(0,9 + 0,083\left(\frac{\theta}{T}\right))}{(1,27 + 0,6\left(\frac{\theta}{T}\right))}$	-
PID	$\left(1,35 + 0,25\left(\frac{\theta}{T}\right)\right)\frac{T}{K\theta}$	$\frac{\theta(1,35 + 0,25\left(\frac{\theta}{T}\right))}{(0,54 + 0,33\left(\frac{\theta}{T}\right))}$	$\frac{0,5\theta}{(1,35 + 0,25\left(\frac{\theta}{T}\right))}$

Tabla 3. Sintonía controlador PID por el método de Cohen-Coon.

Fuente: (Castaño Giraldo, 2021)

5.3.4.2 sistema de control de lazo abierto

Cabe mencionar que también existen los sistemas de control de lazo abierto los cuales no son retroalimentados por una señal como en el caso del sistema anterior, es decir, es un control en el que la salida controlada no tiene efecto sobre la acción de control según (Adam, 2020).

5.3.4.3 Sistema de control robusto

El control robusto según Gualotuña Logacho, (2021), se centra en la extracción de las características de incertidumbre del modelo implementado y aplicar la recopilación de la información al diseño del sistema de control. El control robusto busca garantizar el óptimo desempeño debido a las perturbaciones y variaciones del sistema siendo así un sistema insensible a las incertidumbres del modelo matemático del sistema controlado, dado que su estrategia de la robustez es oponerse a los errores numéricos, perturbaciones ruidos, impedancia entre otros.

5.3.4.4 Sistema de control predictivo

El control predictivo basado en modelo (MBPC o MPC), (Sendoya, 2012), es un conjunto de métodos de control que se ha desarrollado alrededor de diferentes principios como: el uso de un modelo del proceso para pronosticar la salida del sistema en tiempos futuros y el cálculo de un control óptimo basado en la minimización de una o más funciones de costo. Este sistema es implementado para predecir la evolución de un sistema en un tiempo futuro, según las predicciones por

medio del controlador se busca optimizar una función que tenga de referencia la señal deseada, restricciones del sistema y costos de control.

5.3.4.5 Sistema de control difuso

El control difuso, también conocido como control borroso, es una técnica de control que se basa en la lógica difusa (fuzzy logic) para la toma de decisiones en sistemas complejos y no lineales (Agustín Jiménez, 2020). Su objetivo principal es incorporar en el computador, un entorno intrínsecamente numérico, las estrategias de control de los operadores del proceso, expresadas normalmente en términos lingüísticos, es decir, precisos. Este control permite modelar cualquier proceso no lineal, además de tener la capacidad de aprender de los datos por inteligencia artificial al implementar redes neuronales, haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje y permite utilizar fácilmente el conocimiento del personal para la optimización automática.

5.4 MARCO CONCEPTUAL

5.4.1 Microalga *Chlorella*

Las microalgas varían en sus rangos de temperatura ideales para reproducirse; por ejemplo, la especie *Chlorella* prospera entre 5 °C y 42 °C. La temperatura del cultivo ideal para su reproducción debe mantenerse en 25 °C. La variación térmica amplia exige regulación, especialmente en sistemas cerrados, equilibrando el calentamiento en horas de poca luz y el enfriamiento durante las horas de mayor iluminación. Aunque la temperatura puede ser influyente en algunos casos, es fundamental considerar otros factores como dióxido de carbono y luz en el cultivo de microalgas (Ruiz Martínez, 2011).

Reconocer la estructura biológica de la microalga *Chlorella* es importante tal como señala Mérida Ramírez (2020), donde asegura que poseen una composición química que acredita a esta microalga como un alimento altamente nutritivo. Esto debido a la alta presencia notable de proteínas, aminoácidos esenciales y otros compuestos de importancia alimentaria que se pueden aprovechar en el agro para compensar la falta de nutrientes NPK en la agricultura.

La microalga *Chlorella* tiene un gran potencial para ser implementada como una fuente de proteína, ya que estudios han demostrado que se puede obtener de esta especie hasta un 78% en peso de proteína (Murcia & Parra, 2018). Revelando que se trata de una proteína de alta calidad por su contenido en aminoácidos esenciales en comparación con otras fuentes, aunque el alto costo de producción a dificultado su implementación en las diferentes áreas como los fertilizantes.

Alga	Protein	Carbohydrates	Lípids
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	62	23	3
<i>Chlamydomonas reinhardii</i>	48	17	21
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9

Tabla 4. Composición general de diferentes algas (% peso seco).
Fuente (Murcia & Parra, 2018)

En la tabla 4 se identifica la información de las diferentes especies, la microalga *Chlorella* donde se evidencia que tiene un peso seco de un 51% a un 58%, según los parámetros puede alcanzar hasta el 78% como se mencionó anteriormente. Algunas de las especies se escogen para trabajar a gran escala como: *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* y la cianobacteria *Spirulina* (Murcia & Parra, 2018).

En base a un estudio donde consideran temas como la luz, temperatura y la disponibilidad de nutrientes para su reproducción implementan condiciones estables y controladas (Gagneten & Marchese, 2023). El ensayo de inhibición de crecimiento del alga *Chlorella Vulgaris* con una temperatura de 23 ± 2 °C, una intensidad de luz de 4000-8000lux en iluminación constante y un ensayo estático tiene como resultado en microscopio la siguiente imagen.

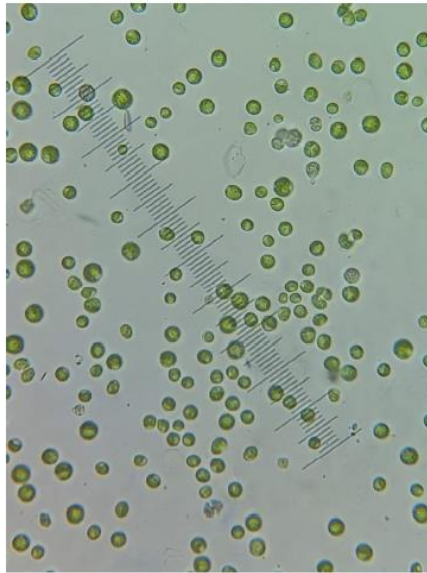


Figura 4. Chorella vulgaris. Aumento en microscopio óptico: 10x; B; 100x.
Fuente: (Gagneten & Marchese, 2023)

La acuicultura describe uno de los sistemas de producción de alimentos más importantes en términos de impacto económico y seguridad alimentaria. La cría de organismos acuáticos se realiza en ambientes controlados, como estanques, tanques y jaulas en el mar. Sin embargo, la acuicultura enfrenta varios desafíos, incluyendo el costo de la alimentación y el impacto ambiental (Fajardo et al., 2022)

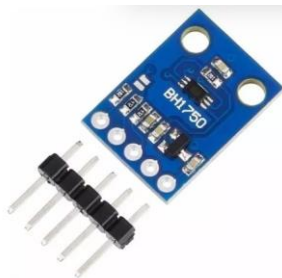
La alimentación representa una gran parte de los costos por lo tanto es de vital importancia encontrar formas de reducir sin comprometer la salud y el crecimiento de los organismos acuáticos. Además, el exceso de alimento puede contaminar el agua y afectar la calidad y los organismos vivos. Para combatir estos desafíos, es necesario desarrollar tecnologías que mejoren la eficiencia y reduzcan el impacto ambiental. La automatización del sector acuicultor puede ser una solución para mejorar la eficacia y reducir los costos. El uso de inteligencia artificial y el monitoreo del comportamiento de los organismos acuáticos pueden ayudar a optimizar y mejorar la producción en la actualidad (Zhou et al., 2019).

Es importante reconocer que las microalgas son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos que pueden medir entre 2-200 μm y tienen la habilidad de crecer de modo autotrófico o heterotrófico. Las microalgas son capaces de realizar la fotosíntesis por lo cual pueden convertir la energía del sol en materia orgánica denominada biomasa, con una eficiencia hasta cuatro veces mayor a la de las plantas (González Céspedes, 2015).

Es así como se parte de la importancia de tener un sistema de control para las condiciones del sistema ya que nos permitirá detectar problemas rápidamente y tomar medidas preventivas sobre los organismos acuáticos, de tal modo se mejorará la eficiencia teniendo una mayor producción de alimentos y reducción de algunos costos asociados con su producción.

5.4.2 Sensores

- Sensor de iluminación



*Figura 5. Sensor intensidad de luz para Arduino BH1750
Fuente: (Innovatronics, 2024).*

El sensor de intensidad de luz tiene como referencia BH1750FVI. A través de este sensor es posible la detección de una alta gama de alta resolución, (1-65535 lx). Presenta la facilidad de ser controlado por cualquier controlador o Arduino (By ALLDATASHEETCOM, 2009).

Modelo	BH1750FVI
Voltaje de entrada	4.5 VDC
Voltaje de operación	2.4-3.6 VDC
Corriente de operación	120-190 μ A
Potencia	260 mW
Resolución	1-65535 lx (16 bits)
Temperatura de operación	-40°C - 80°C

*Tabla 5. Rangos de funcionamiento del sensor de iluminación.
Fuente: Recuperado de datasheet BH1750FVI.*

Según la tabla 5 los rangos de funcionamiento del sensor de iluminación se adaptan al rango de luminiscencia de la *Chlorella* determinado en la tabla 1. Sus características se adaptan para ser implementado en el proyecto y poder realizar la adquisición de los datos de luminiscencia y observarlos a través de la interfaz de monitoreo.

Su funcionamiento se da a través de un sensor que integra un fotodiodo el cual es sensible a la luz. Cuando la luz da directamente en el fotodiodo genera una corriente eléctrica la cual se convierte en una señal análoga, sin embargo, este modelo es digital por lo tanto por medio de un convertidor análogo-digital interno se convierte a una señal digital. Al tener la señal procesada esta se puede visualizar mediante la placa de desarrollo Arduino (Sacado Mora & García Diego, 2015).

- Sensor de pH



Figura 6. Sensor pH análogo
Fuente: (picmicros, 2024).

El sensor de pH ayuda a realizar un monitoreo constante ya que su rango de medición es de (0-14) pH ideal para el proceso del cultivo de la microalga el cual tendrá un rango entre (7-9) pH para la especie *Chlorella*. Por medio del datasheet se determina que es adecuado para la implementación en el medio de cultivo.

Este sensor cuenta con un electrodo especial que está diseñado para tener una reacción con los iones de hidrogeno presentes en una solución. Este electrodo genera una señal eléctrica proporcional al nivel de acidez o alcalinidad de la solución. La calibración de este sensor se puede hacer internamente en el sensor o externamente en el microcontrolador (Electronics, 2024). Para saber el dato real se cuenta con soluciones de calibración también conocidos como “buffers” que se

deben diluir en agua destilada el cual es el punto de referencia para determinado valor.

- Sensor de turbidez



*Figura 7. Sensor de turbidez del agua análogo óptico
Fuente: (ferretronica, 2024).*

El sensor de turbidez detecta cantidad de partículas en suspensión que posee un líquido, por lo tanto, la variación en la densidad celular de la microalga hará que se registre un cambio en la turbidez y esta reflejara directamente la reproducción de la microalga *Chlorella*. Utiliza luz para detectar partículas suspendidas en el agua midiendo la transmitancia de la luz y la tasa de dispersión, que cambia con la cantidad de sólidos suspendidos en el medio. A medida que aumenta la señal de turbidez, aumenta el nivel de turbidez del líquido (DFRobot, 2023).

Este sensor es apto para la medición de reproducción de la microalga debido a su principio de funcionamiento y especificaciones las cuales se pueden observar en la siguiente tabla:

Sensor turbidez	Valores
Voltaje	5VDc
Corriente de operación	40mA
Salida análoga	0-4.5V
Temperatura de operación	5°C-90°C
Tiempo de respuesta	<500 ms

*Tabla 6. Rangos de funcionamiento del sensor de turbidez.
Fuente: Recuperado de datasheet sensor de turbidez.*

Este sensor implementa una fuente de luz LED y un fotodiodo. La luz que es emitida por el LED atraviesa el fluido y recoge en el fotodiodo, al tener partículas suspendidas en el fluido, estas dispersan la luz que está directamente relacionada con la turbidez por ende cuanto mayor sea la turbidez, mayor será la cantidad de luz dispersa. Su calibración se puede hacer de forma interna en el sensor o de forma externa por medio del microcontrolador y puede incluir ajustes para compensar factores como la variabilidad en la fuente de la luz (DFRobot, 2024).

- Sensor de temperatura



*Figura 8. Termocupla con MAX6675
Fuente: (Electronicas afg, 2024).*

El sensor de temperatura implementado es una PT100 la cual consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohmios y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. En la tabla 7 se puede identificar la temperatura equivalente al valor de resistencia en ohmios. Usando esta tabla, se puede determinar con precisión la temperatura del entorno en el que se encuentra el sensor en función de la resistencia eléctrica que mide. Esta precisión hace que los sensores PT100 sean muy útiles en una variedad de aplicaciones donde se requiere una medición precisa de la temperatura.

0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.77	141.15	141.53	141.91
110	142.29	142.67	143.04	143.42	143.80	144.18	144.55	144.93	145.31	145.69
120	146.06	146.44	146.82	147.19	147.57	147.95	148.32	148.70	149.07	149.45
130	149.83	150.20	150.58	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20
140	153.58	153.95	154.33	154.70	155.08	155.45	155.83	156.20	156.57	156.95
150	157.32	157.69	158.07	158.44	158.81	159.19	159.56	159.93	160.30	160.68
160	161.05	161.42	161.79	162.16	162.53	162.91	163.28	163.65	164.02	164.39
170	164.76	165.13	165.50	165.88	166.25	166.62	166.99	167.36	167.73	168.10
180	168.47	168.84	169.21	169.58	169.95	170.31	170.68	171.05	171.42	171.79
190	172.16	172.53	172.90	173.26	173.63	174.00	174.37	174.74	175.10	175.47
200	175.84	176.21	176.58	176.94	177.31	177.68	178.04	178.41	178.78	179.14
210	179.51	179.88	180.24	180.61	180.98	181.34	181.71	182.07	182.44	182.81
220	183.17	183.54	183.90	184.27	184.63	185.00	185.36	185.73	186.09	186.45
230	186.82	187.18	187.55	187.91	188.27	188.64	189.00	189.37	189.73	190.09
240	190.46	190.82	191.18	191.54	191.91	192.27	192.63	192.99	193.36	193.72
250	194.08	194.44	194.80	195.17	195.53	195.89	196.25	196.61	196.97	197.33
260	197.69	198.05	198.41	198.77	199.14	199.50	199.86	200.22	200.58	200.94
270	201.29	201.65	202.01	202.37	202.73	203.09	203.45	203.81	204.17	204.53
280	204.88	205.24	205.60	205.96	206.32	206.68	207.03	207.39	207.75	208.11
290	208.46	208.82	209.18	209.53	209.89	210.25	210.60	210.96	211.32	211.67

°C 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

*Tabla 7. Rangos de temperatura de la PT100.
Fuente: (Arian, 2024).*

5.4.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Una función de transferencia es una representación matemática implementada para modelar el comportamiento dinámico de un sistema lineal e invariante en el tiempo, el cual se modela por medio de ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes constantes, es a través de su función de transferencia que se puede predecir cualquier cambio en el sistema (Vieyra Natanael & Franco, 2017). Este sistema trabaja con una entrada y una salida denominado SISO por sus siglas en inglés y también puede haber sistemas MIMO que son sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas.

La transformada de Laplace de la respuesta de impulso brinda la función de transferencia, esto indica teóricamente una descripción completa de un sistema lineal se puede obtener excitando el sistema con una función impulso y midiendo la respuesta de salida (Ponce de Leon, 1967). Sin embargo, un impulso no puede ser generado de forma física, un pulso con un espesor pequeño siendo menor que la constante de tiempo del sistema permite una aproximación y esto permite obtener una caracterización precisa del comportamiento del sistema en el dominio de la frecuencia.

Por medio de Matlab se puede identificar la función de transferencia ya que se puede usar el Toolbox de identificación que permite obtener varios modelos: función de transferencia, procesos de control, etc. (Vargas, 2016). Dentro del Toolbox se puede usar una herramienta llamada "Ident" la cual permite obtener la función de transferencia teniendo la información del tiempo de muestreo, los datos de entrada y salida del sistema debidamente procesados en una extensión.

5.4.4 Método de respuesta en frecuencia

El comportamiento de un sistema se puede obtener según Muñoz B et al., (2020), por medio de un análisis de respuesta en frecuencia. Este método de análisis consiste en excitar la entrada del sistema con una respuesta sinusoidal en una variedad de frecuencias y analiza cómo el sistema responde en términos de amplitud y fase en función de la frecuencia de entrada. El método de Ziegler-Nichols se diferencia del análisis de Bode que busca analizar el sistema en diferentes frecuencias y no se basa en una respuesta en frecuencia del sistema. En cambio, se centra en obtener los parámetros del controlador PID a partir de pruebas de respuesta al escalón, trabajando directamente en el dominio del tiempo.

5.4.5 Método de sintonización de Ziegler-Nichols

- Método de respuesta en escalón

El método de Ziegler-Nichols se basa en obtener la información del proceso a través de la respuesta a un escalón en lazo abierto. Se utiliza para sistemas que no contienen integradores ni polos dominantes complejos conjugados. La respuesta al escalón debe mostrar una curva en forma de S caracterizada por dos parámetros: el tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (T). Estos parámetros se determinan trazando una tangente en el punto de inflexión de la curva S y

encontrando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea de la ganancia ($c(t)=K$). Este método es útil para sintonizar controladores PID y se basa en un modelo simplificado del proceso (Corredor C & Gonzalez T, 2012).

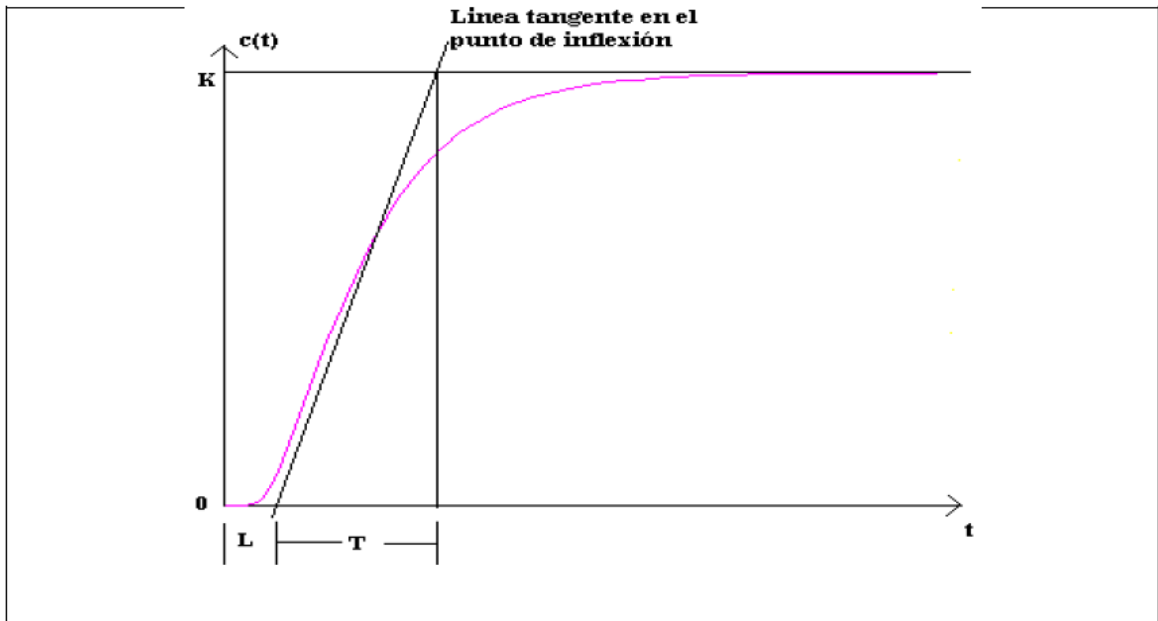


Figura 9. Respuesta de la planta a una entrada de escalón unitario.
Fuente (Corredor C & Gonzalez T, 2012).

Uno de los métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler Nichols. En el pretende obtener un 25% de sobrepaso máximo en la respuesta escalón como se puede analizar en la siguiente figura.

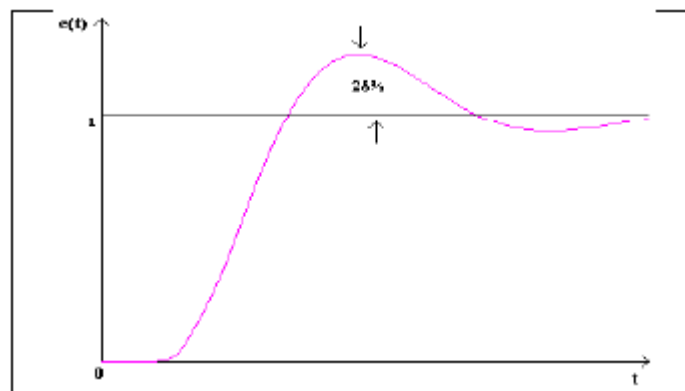


Figura 10. Sobre impulso máximo a la respuesta escalón.
Fuente: (Corredor C & González T, 2012)

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la siguiente tabla:

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{KL}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{K * L}$	$2L$	$0.5 L$

Tabla 8. Variables de K_p , T_i y T_d por Ziegler y Nichols.

Fuente (Corredor C & Gonzalez T, 2012)

Donde K_p , T_i y T_d son parámetros del PID:

K_p : Ganancia proporcional.

T_i : Tiempo integral.

T_d : tiempo derivativo.

5.5 MARCO LEGAL

En los cultivos agrícolas por la falta de nutrientes que tienen los suelos es necesario la implementación de fertilizantes, en el momento de la implementación aumenta el rendimiento de los cultivos según (IFA, 2022), si el suelo cuenta con los suficientes nutrientes no será necesario la implementación de los fertilizantes químicos.

En Colombia la entidad ICA (instituto Colombiano Agropecuario) es la entidad Nacional competente responsable de organizar y asegurar el desarrollo y ejecución de los procedimientos de registro y control de los agroquímicos para uso agrícola. A través del documento “Resolución Fertilizantes 00150 de enero de 2003” (ICA, 2003) se otorga el registro y el control legal para uso de los fertilizantes y acondicionadores de suelos en el país con el propósito de garantizar un alto nivel de seguridad alimentaria mediante el incremento de la producción de los alimentos básicos y su productividad y para ello requiere una aplicación eficaz de fertilizantes y acondicionadores de suelos.

Convertir un cultivo de microalgas en biofertilizante requiere de diversas pruebas que según (ICA, 2004), en la resolución 375 de febrero de 2004 por la cual se dictan las disposiciones sobre registro y control de los bioensayos y extractos vegetales de uso agrícola en Colombia, en el capítulo VI artículo 17 “De los ensayos de eficacia” con los fines de registro de los bio insumos y extractos vegetales de uso agrícola, se deben realizar únicamente por Departamentos Técnicos de Ensayos de Eficacia donde se debe realizar un registro ante el ICA y su correspondiente aprobación.

Desarrollar un ambiente controlado requiere de diversos sensores los cuales ayuden a monitorear por ente la normativa NTC 5167 (2004), “Norma para abonos orgánicos y fertilizantes” da las indicaciones necesarias para la implementación del sensor pH el cual se debe de calibrar con el potenciómetro con las soluciones reguladoras pH 7.0 y pH 4.0 con el fin de conocer el potencial de hidrogeno en el cultivo de algas el cual debe encontrarse en un rango de pH entre 7 y 9 para la obtención de un adecuado desarrollo del cultivo.

6 DISEÑO METODOLÓGICO

El método implementado para la investigación es experimental por lo cual se manipulo una o más variables del estudio. Esto permitió controlar el aumento o disminución de la variable y los efectos en las conductas observadas, para que se cumpla se debe mantener en condiciones totalmente controladas (Murillo et al., 2020). La investigación se basó en un enfoque cuantitativo lo que permitió medir las variables establecidas en Técnicas e instrumentos de recolección analizando la turbidez y peso de la biomasa, dato que da información referente a la densidad celular del cultivo permitiendo observar la reproducción de la microalga *Chlorella* dentro de un ambiente controlado en sus diferentes etapas.

Es así como al tener un enfoque experimental y cuantitativo permitió obtener datos objetivos y cuantificables, esto aumento la validez y confianza en los resultados. Manipulando variables controladas en un extorno experimental se pudo identificar fácilmente las relaciones causales entre los factores estudiados y los resultados que se obtendrán.

La medición de variables como la temperatura, pH, iluminación, y turbidez del cultivo, es fundamental para lograr así comprender los efectos de diferentes condiciones en el crecimiento y desarrollo de las microalgas, el enfoque cuantitativo nos permitió registrar estas variables de manera sistemática en una base de datos objetiva, facilitando de esta manera el análisis y la identificación de patrones significativos en el proyecto.

Cabe destacar que el diseño experimental permite de igual manera controlar y manipular variables de confusión que podrían influir en los resultados del estudio debido a que, al mantener constantes otras variables que no son de interés se puede aislar el efecto de la variable principal a estudiar.

-Técnicas e instrumentos de recolección- Para obtener la evaluación del desarrollo del ambiente controlado se realiza un registro de la temperatura, pH, iluminación y turbidez en dos peceras distintas. Esto con el fin de mantener la misma condición en ambas. Sin embargo, sobre una se ejecutará un control de temperatura para mantenerlo en 25°C y se evaluará el impacto de la temperatura sobre la reproducción y la diferencia entre la turbidez de la microalga *Chlorella sp.*

En cuanto a los indicadores de análisis se proponen los siguientes aspectos:

Eficacia del dispositivo – Refiere a la capacidad de mantener las condiciones de temperatura óptimas de 25 °C del cultivo.

Grado de acidez – Medir el pH del cultivo usando un sensor de pH donde se mantendrá entre 8 y 9.

Temperatura – Controlar y monitorear la temperatura constante por medio de un sintonizador PID dentro del rango adecuado de 25 °C y que garantice el crecimiento óptimo. Se implementa un sensor de temperatura y un termo regulador como actuador (termostato sumergible).

Densidad del cultivo – Medir la turbidez del cultivo el cual permite determinar el crecimiento de la microalga por medio de un sensor de turbidez .

Iluminación – medir la iluminancia del cultivo usando un sensor de lux (lumen/m²) dentro del rango adecuado según la necesidad de la microalga. Tenido como actuador una lámpara con el espectro de luz requerido por la microalga garantizando el estado óptimo en iluminación.

Agitación con burbujas de aire – implica la introducción de burbujas de aire al cultivo para proporcionar agitación y de esta manera evitar la sedimentación de la *Chlorella*, también mejora la transferencia de luz y nutrientes en el medio.

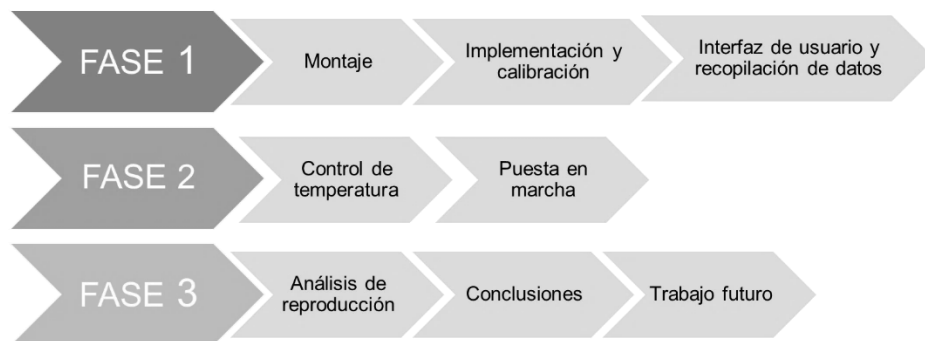
Población – Microalgas presentes en ambos recipientes, debido a que estas son las unidades de estudio. Dado que se tiene la misma cantidad de microalga y medio de cultivo obteniendo una distribución uniforme en las mismas condiciones iniciales, lo que hará que la población sea comparable.

Muestra – Las muestras individuales de microalga que serán tomadas de cada recipiente representan el estado de las poblaciones en diferentes momentos durante el mes que se estará haciendo el monitoreo. Al tomar estas muestras regularmente cada tres días, se capturará los cambios en la biomasa y turbidez de los cultivos a lo largo del tiempo. Esto proporcionará una imagen dinámica de la reproducción en respuesta al control de temperatura.

Se tomará como fuentes de información: libros y/o manuales sobre cultivos de microalgas, artículos científicos y revistas especializadas en la materia, bases de datos como lo es: Scopus, Google Scholar y ScienceDirect, trabajos de grado relacionados con el área y por último expertos como profesores, investigadores y empresas especializadas.

6.1 FASES DEL PROYECTO

El proyecto se divide en 3 fases que conforman la propuesta de la metodología para el desarrollo del trabajo de investigación. Estas fases están diseñadas para dar cumplimiento a los objetivos específicos.



Fases del proyecto Fuente: Elaboración propia.

Fase 1.

Realizar el montaje en una pecera de vidrio teniendo en cuenta la recopilación bibliográfica de la microalga para estar en condiciones aptas de reproducción. La implementación de los sensores en el montaje para la recopilación de datos de sus características en las variables de pH, iluminación, temperatura y turbidez son necesarias para analizar la reproducción, las cuales se vean reflejadas por medio de una interfaz de usuario desarrollada en lenguaje de programación Python y a su vez sea capaz de recopilar los datos en una base de datos de SQL server con el fin de monitorear el desempeño del cultivo.

Los sensores implementados en el montaje se les realizara una calibración debido a que comprueban la veracidad de las mediciones realizadas. Al estar calibrados se

puede tener la confianza en sus lecturas para tomar acciones positivas sobre el proceso (Online browsing platform, 2021).

Considerando que se trabajará con dos recipientes de igual tamaño, misma cantidad de microalga y medio de cultivo, pero solo uno de ellos será sometido al control de temperatura desarrollado, la población de interés en este estudio serán las microalgas *Chlorella sp* presentes en dichos recipientes.

Fase 2

El prototipo contará con los sensores necesarios instalados en dos recipientes, uno contendrá el grupo experimental y el otro será el grupo de control. Para realizar el monitoreo de las variables y ser sometido a pruebas de funcionamiento. En su puesta en marcha se evidencia la respuesta del sistema ante cambios de la variable temperatura, esta cuenta con el control de temperatura en el recipiente del grupo experimental el cual debe mantener constante el valor de 25 °C para la microalga a estudiar, en este experimento se utilizó la especie *Chlorella sp* como organismo modelo pudiendo evaluar el impacto de la temperatura sobre la reproducción y la diferencia entre la turbidez que evidenciara el cambio de la densidad celular del cultivo (Hernández Pérez & Labbé, 2014).

Se analizarán los indicadores descritos en el diseño metodológico:

- Eficacia del dispositivo.
- Grado de acidez.
- Temperatura.
- Densidad del cultivo.
- Iluminación.
- Agitación con burbujas de aire.

Fase 3

Hacer una evaluación de la reproducción de la microalga *Chlorella sp* por medio de los resultados obtenidos durante 30 días de los sensores de turbidez del grupo control y grupo experimental, que estará conformado por el monitoreo 24 horas y las muestras de biomasa se tomarán cada 3 días para las respectivas pruebas de laboratorio. Estos se van a comparar con análisis realizados a los dos medios de cultivos, la muestra es sometida a un proceso de gravimetría por triplicado para

determinar la reproducción de la microalga por medio de la biomasa (Angulo Rios, 2017).

Hipótesis de trabajo: Un control de temperatura permitirá optimizar las condiciones idóneas de crecimiento y reproducción de la microalga, mejorará la eficiencia y desarrollo de la especie para convertirse en una alternativa viable como biofertilizante para el sector agro.

7 ANÁLISIS Y RESULTADOS

7.1 Resultados de la fase 1

En la puesta en marcha se realiza la calibración de los sensores que registrarán los datos requeridos de: temperatura, pH, iluminación y turbidez. Por medio de la figura 11 se evidencia un registro fotográfico donde se observa el estado inicial del ambiente 1 del lado izquierdo, siendo este el grupo experimental y el ambiente 2 del lado derecho siendo el grupo control. Ambos grupos contienen una cantidad de 7 litros de agua con la cepa de la microalga *Chorella sp.*

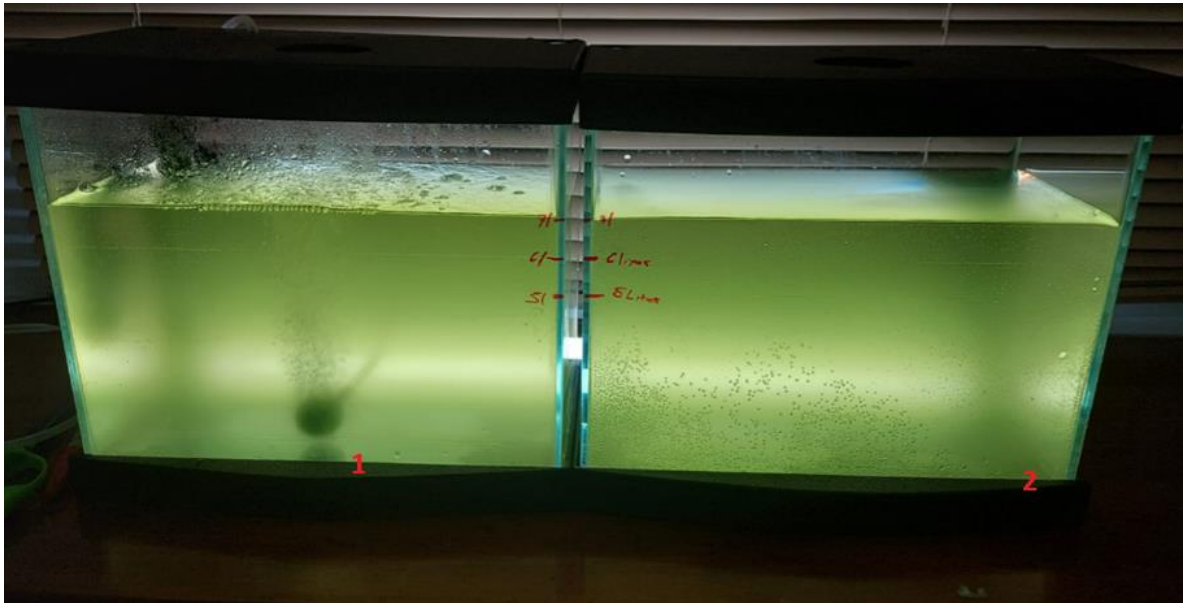


Figura 11. Etapa inicial de los medios de cultivo.
Fuente: Elaboración propia.

El montaje requiere de conocimiento de las características de la especie de microalga para usar en el prototipo. El conocer algunas de las especies más usadas de microalgas es necesario y para ello en el apartado del marco teórico y en el marco conceptual se realiza el análisis sobre lo propuesto para tener los datos requeridos para la reproducción de microalga, de esta forma también se puede analizar un resumen por medio de la tabla 1 la cual se identifican las características principales de temperatura, pH e iluminación de la microalga *Chlorella sp* que será usada como organismo modelo y de otras especies con el potencial para ser implementadas también en el prototipo.

Con base en el diseño del prototipo para la reproducción de la microalga *Chorella sp* en condiciones piloto se implementaron los sensores mencionados en el apartado del marco conceptual, sensores. Estos son implementados en los dos medios de cultivo los cuales cuentan con sensores de turbidez y temperatura. La medición del pH en el grupo control se realiza por medio laminas indicadores de pH, los dos medios de cultivo cuentan con un solo sensor de iluminación ambiente y el grupo experimental cuenta con una resistencia calefactora de 25 W. Por medio de estos sensores se realiza la obtención de los datos de las respectivas variables: temperatura, iluminación, turbidez y pH.

Por medio de Python se desarrolla la interfaz de monitoreo que permite al usuario observar la visualización en tiempo real de los valores de cada sensor.

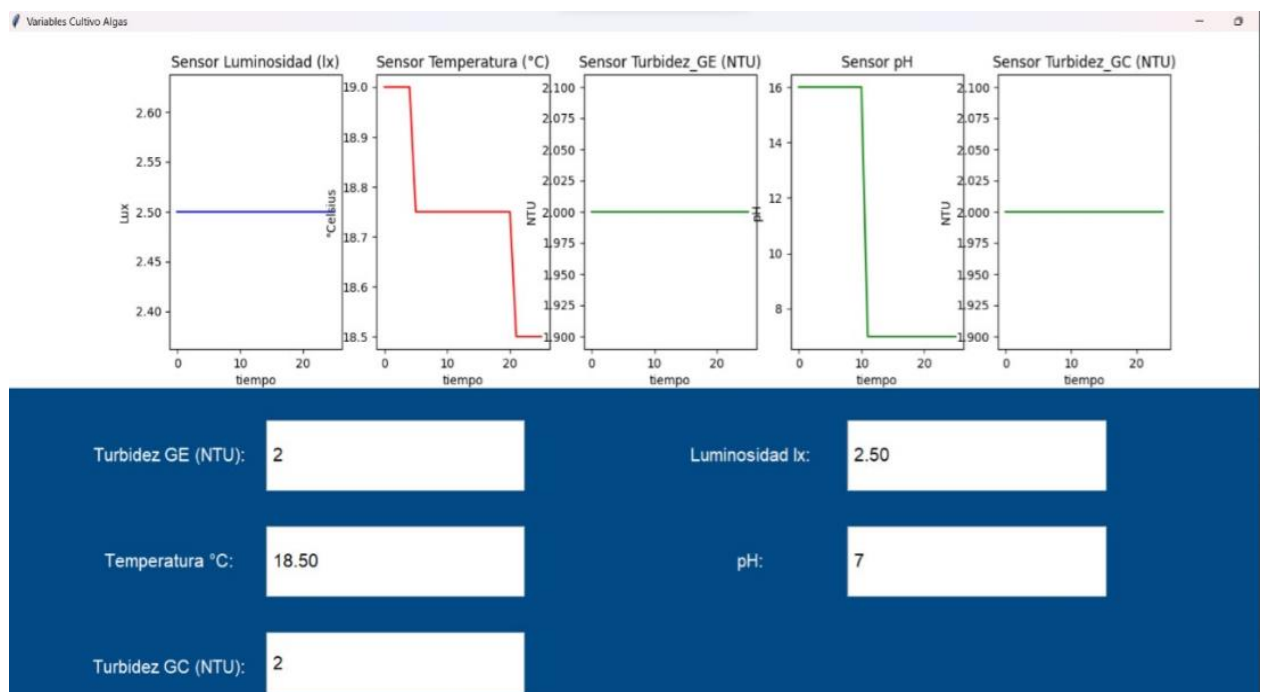


Figura 12. Interfaz para la lectura de las variables del cultivo.
Fuente: Elaboración propia.

Según la figura 12 se puede visualizar los datos de lectura de los sensores de luminosidad, temperatura, turbidez y pH. Esta interfaz puede ser modificada según la cantidad de sensores que el usuario final desee además de poder agregar

sensores de otros parámetros como CO2. Para la implementación de los sensores y una correcta medición se requiere de una correcta calibración:

- Calibración del sensor pH

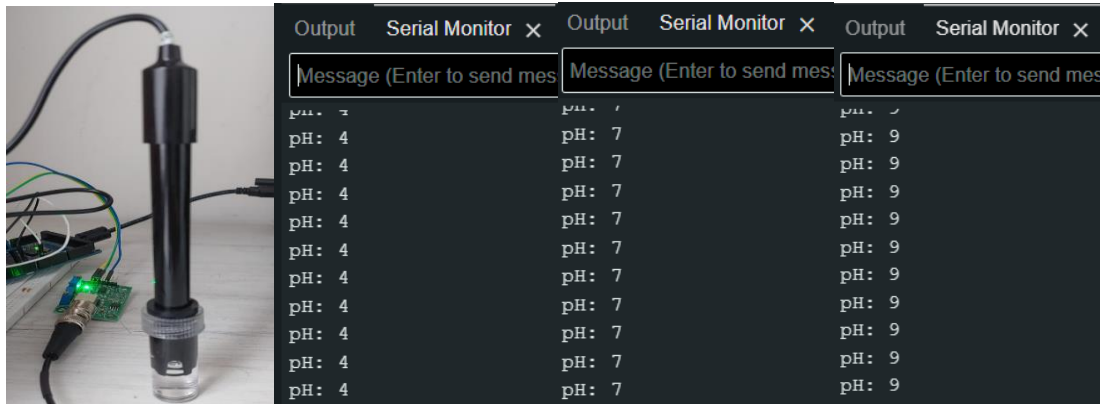


Figura 13. Calibración pH con buffer solution 4, 7 y 9
Fuente: Elaboración propia

Para la calibración del sensor se utiliza el procedimiento descrito por Labprocess, (2020), en donde describen el proceso. Antes de iniciar la lectura del valor inicial por medio de la interfaz se procede a realizar un lavado al electrodo con agua destilada. El lavado con agua destilada se realiza con el fin de evitar una contaminación cruzada entre el KCL (Cloruro de potasio) de almacenamiento del electrodo y las soluciones de los buffers patrón con el fin de tener un valor más certero.

Al realizar el lavado se sumerge en la solución de 4.01 que es el buffer de solución acida que registra un valor de 4 en la interfaz. Se realiza el mismo procedimiento para los valores de pH neutro 6.86 y alcalino 9.18. Se debe lavar previamente el electrodo con agua destilada y sumergir en KCL para almacenar el electrodo después de finalizado el estudio o para cuidar la integridad de la membrana de la sonda.

- Calibración del sensor de turbidez



Figura 14. Calibración sensores turbidez 0 NTU
Fuente: Elaboración propia

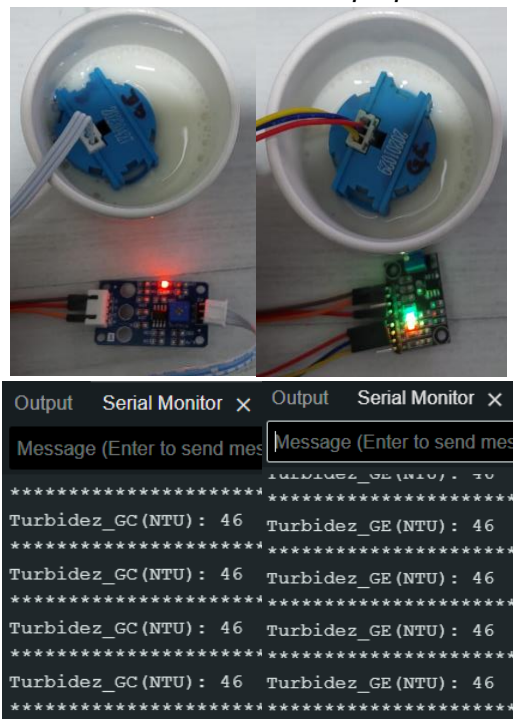


Figura 15. Calibración sensores turbidez 46 NTU
Fuente: Elaboración propia

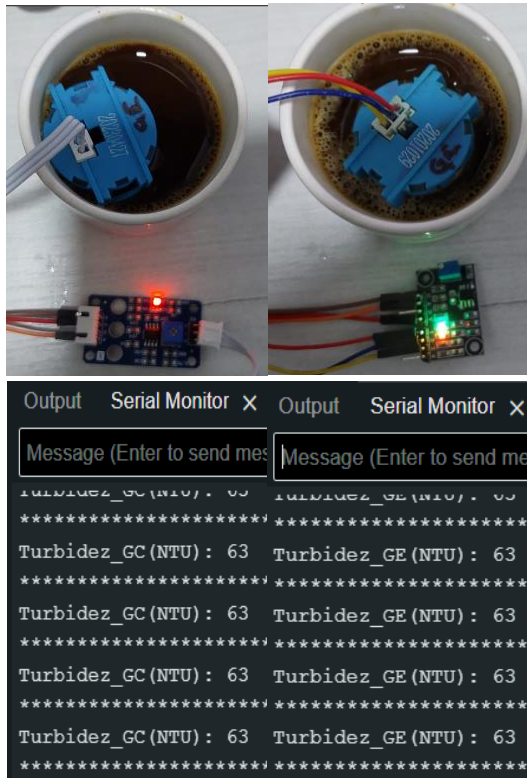
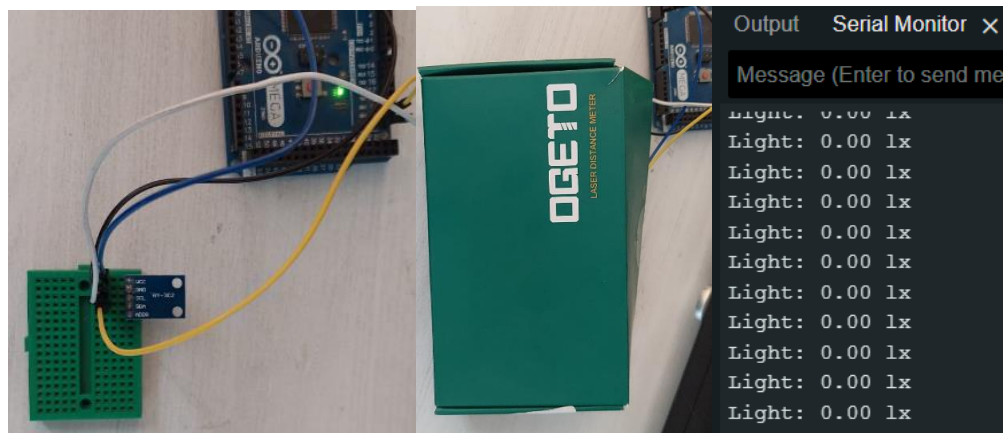


Figura 16. Calibración sensores turbidez 63 NTU
Fuente: Elaboración propia

La calibración del sensor de turbidez se utiliza el procedimiento descrito por Ebrecht & Wolfenson, (2016) el cual requiere inicialmente la limpieza con agua destilada en el área donde se realiza el muestreo. Se configura los respectivos sensores mapeando sus valores analógicos de (0 – 100) NTU. Para marcar 0 NTU se sumerge en agua destilada como solución de calibración para el punto más bajo. Estos valores se pueden observar por medio de la interfaz que previamente fue cargada en el Arduino Mega y al realizar las lecturas se logra evidenciar que ambos sensores toman los valores correspondientes para el agua destilada, así mismo se repite con 2 líquidos distintos que contienen valores de turbidez más altos para corroborar que los dos sensores poseen la misma linealidad en la medición.

- Calibración del sensor de iluminación



*Figura 17. Calibración sensor luminosidad (lx)
Fuente: Elaboración propia*

La calibración del sensor de iluminación es el proceso de ajustar el sensor para que proporcione lecturas precisas de la intensidad de la luz. Para un correcto funcionamiento se deja activo el sensor por un tiempo de 15 minutos para que este apto para las mediciones. Los sensores de iluminación suelen utilizar fotodiodos para medir la cantidad de luz que llega al sensor. Sin embargo, los fotodiodos pueden verse afectados por una serie de factores, como la temperatura, la sensibilidad y la respuesta espectral. En la calibración se implementa en 0 lúmenes, se tapa el sensor con una caja negra evitando que entre la mayor cantidad de luz posible y se toma como referencia un bombillo con 3000 lúmenes para otro valor (Sacedo Mora & García Diego, 2015).

- La calibración del sensor de temperatura

Equipo patrón (°C)	Sensor PT100 (°C)	Error absoluto (°C)
11	11	0
22	21,75	-0,25
61	60,5	-0,5

*Tabla 9. Calibración PT100.
Fuente: Elaboración propia.*

La calibración del sensor de temperatura PT100 para Arduino se realiza mediante la comparación directa en tres puntos contra una termocupla la cual será usada como instrumento patrón de acuerdo con los lineamientos dispuestos por la guía

INM/GTM-T/01 del Instituto nacional de Metrología de Colombia. Con la intención de tener una referencia para el proceso ya que no se cuenta con los medios exactos que allí se mencionan. Sin embargo, al realizar esta comparación se puede evidenciar la exactitud y el error absoluto frente a un equipo el cual por deberes de fabricante deben contemplar una trazabilidad a los patrones nacionales para la variable temperatura, la termocupla patrón usada es la dispuesta por el termómetro de la marca UNIT-T UT33C+ (ONAC, 2019).

Este sensor de temperatura dará la indicación al controlador de controlar una resistencia de 25 W que cuenta con la capacidad para calentar el medio de cultivo del grupo experimental donde se está reproduciendo la microalga *Chlorella sp* como se muestra en la figura 18.

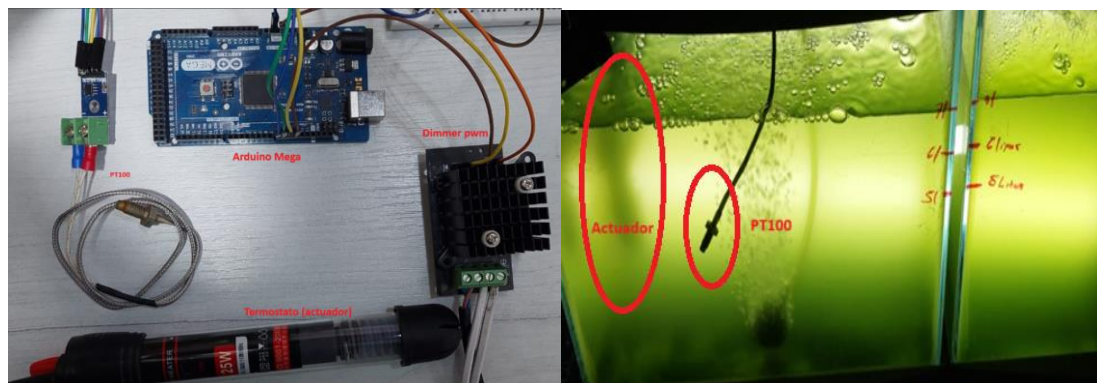


Figura 18. Montaje sistema de control en GE
Fuente: Elaboración propia

Se diseñó una interfaz para visualizar los datos recopilados por los sensores por medio de Python. La adquisición de datos se da a través de la placa Arduino Mega y posteriormente enviados a Python donde son procesados y se pueden ver reflejados los valores por medio de gráficas y valores numéricos tal y como se evidencia en la figura 10. Esta interfaz cuenta con un usuario y clave con el objetivo de tener un registro de las personas que pueden tener acceso al monitoreo de las variables.

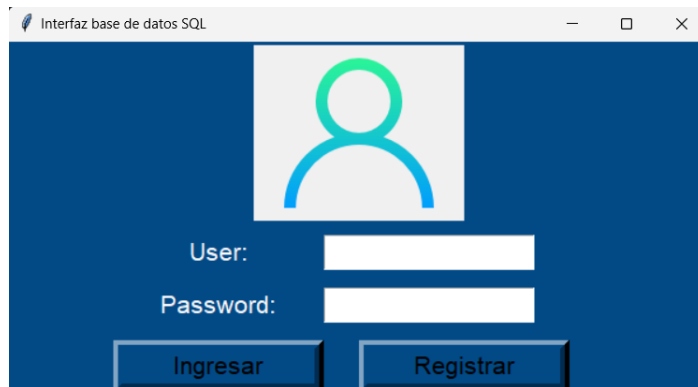


Figura 19. Interfaz de monitoreo del cultivo de microalgas (login).
Fuente: Elaboración propia.

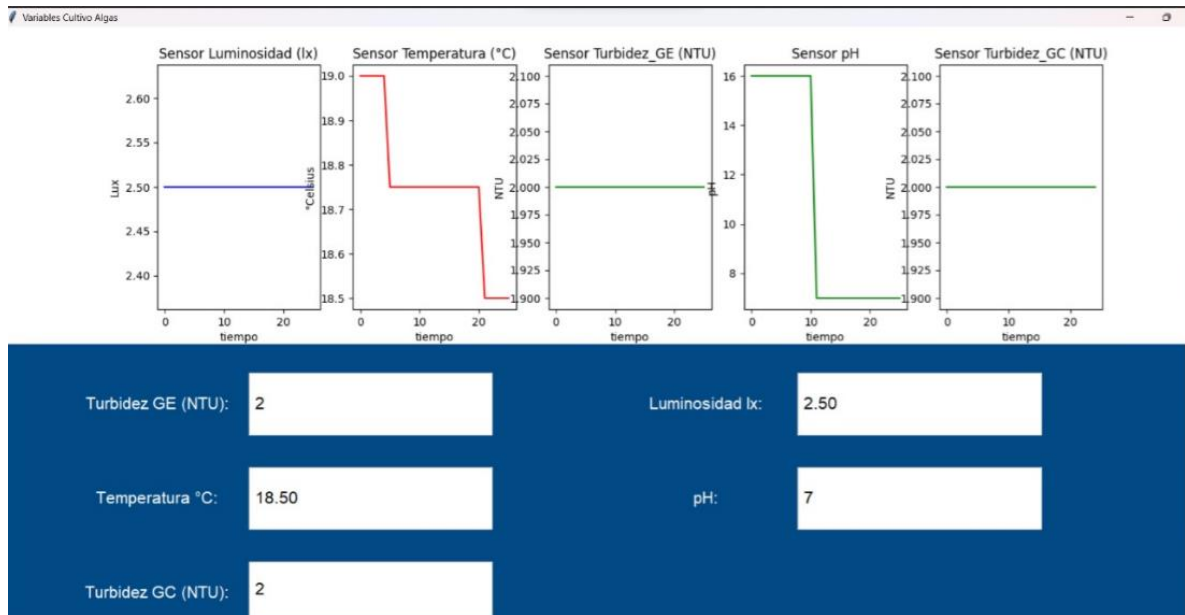


Figura 20. Interfaz de monitoreo del cultivo de microalgas.
Fuente: Elaboración propia.

Los datos enviados desde Arduino y adquiridos por Python son enviados a SQL server para tener un registro de los valores registrados de los sensores día a día para tener una trazabilidad de la reproducción de la microalga *Chlorella sp.* Los datos son enviados desde la interfaz de usuario Python a SQL en un intervalo de una hora para un total de 24 datos diarios como se observa en la figura 23. En la figura 22 se puede evidenciar un diagrama de flujo del procesamiento de los datos e ingreso a la interfaz de usuario.

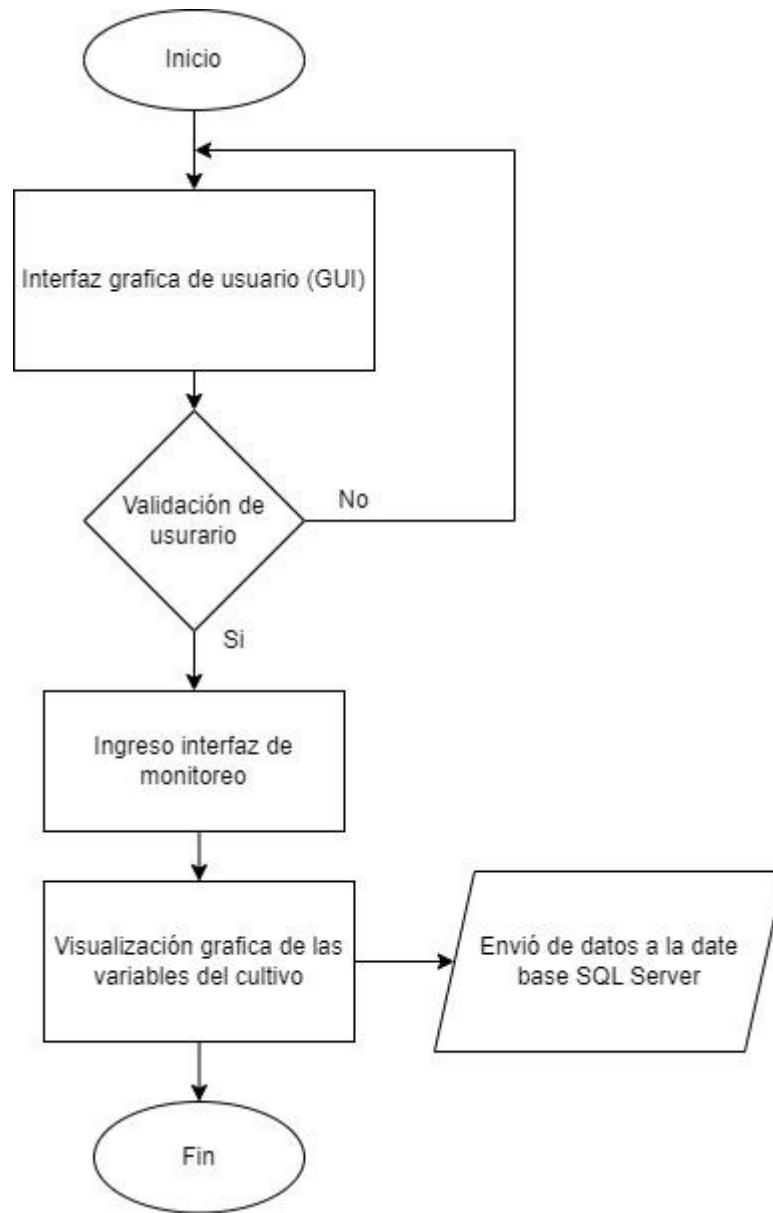


Figura 21. Diagrama de flujo código Python e interfaz de monitoreo.
Fuente: Elaboración propia.

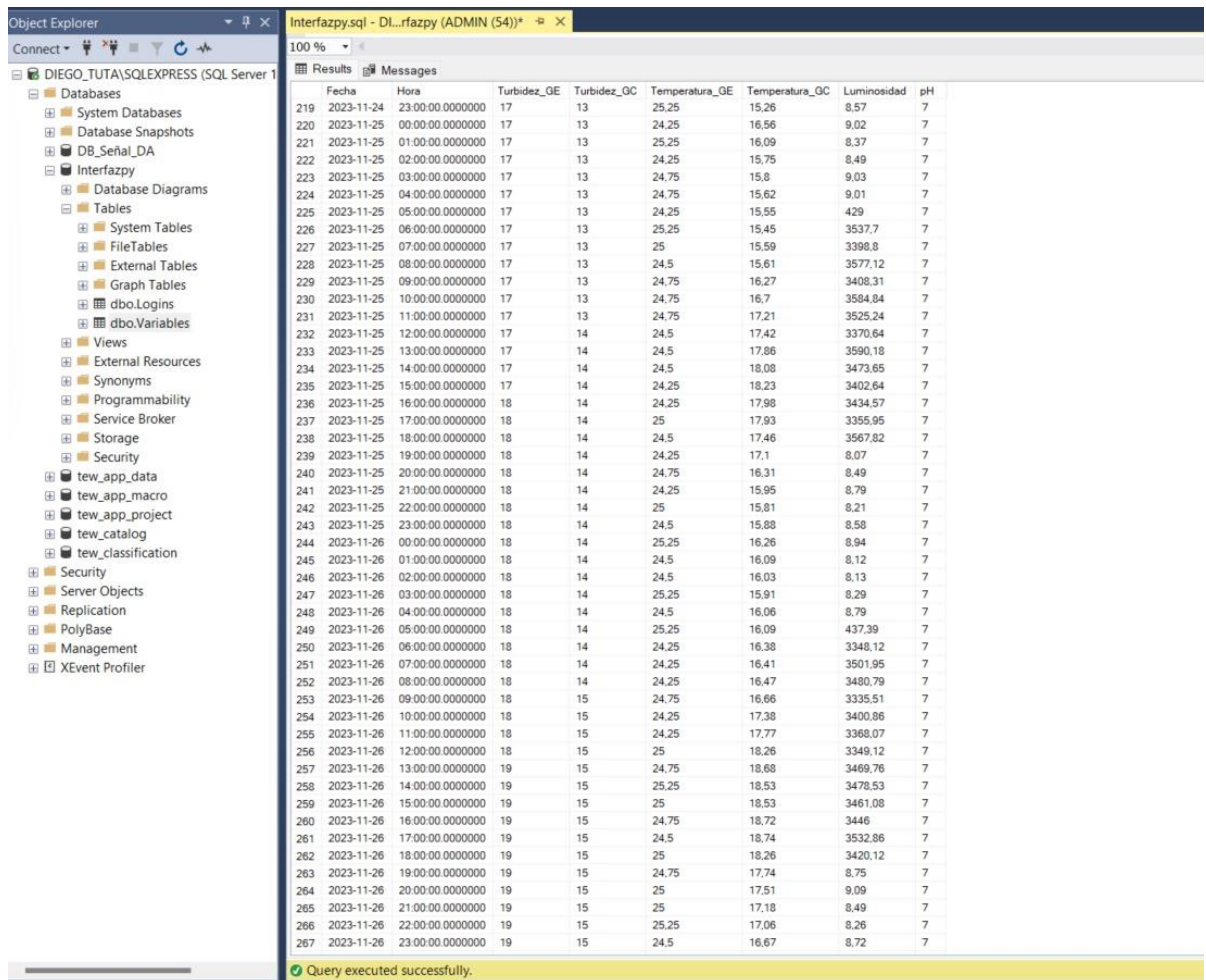


Figura 22. Interfaz de adquisición de datos en SQL Server.
Fuente: Elaboración propia.

7.2 Resultados de la fase 2

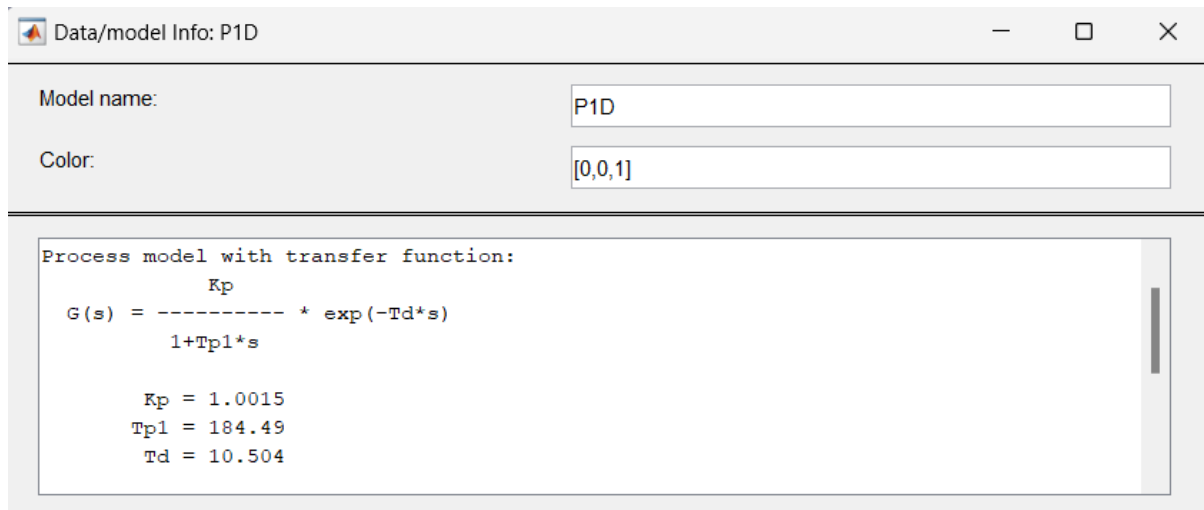
El prototipo cuenta con los sensores necesarios descritos en la sección 5.4.2 “Sensores” y calibrados en la sección 7.1 “Resultados de la fase 1” para realizar el monitoreo. Mediante la figura 21 se identifica los sensores registrados en los medios de cultivo y las gráficas correspondientes con los datos de la lectura de cada sensor en tiempo real, en los gráficos muestra los valores de temperatura, turbidez, luminosidad y pH.

Promedio por día datos cultivo de microalga Chlorella							
Día	Fecha	Turbidez_GE	Turbidez_GC	Temperatura_GE	Temperatura_GC	Luminosidad	pH
1	15/11/2023	4,00	4,00	24,83	16,61	8,5	7,00
2	16/11/2023	4,50	4,21	24,80	17,19	3445,5	7,00
3	17/11/2023	6,42	5,21	24,80	16,47	3487,7	7,00
4	18/11/2023	8,04	6,08	24,71	16,76	3444,2	7,00
5	19/11/2023	9,67	7,00	24,79	16,94	3435,9	7,00
6	20/11/2023	11,38	8,00	24,71	17,24	3473,9	7,00
7	21/11/2023	12,58	9,13	24,67	17,13	3455,0	7,00
8	22/11/2023	13,79	10,25	24,63	16,05	3470,7	7,00
9	23/11/2023	14,96	11,29	24,78	16,78	3477,0	7,00
10	24/11/2023	16,08	12,38	24,91	16,57	3450,2	7,00
11	25/11/2023	17,33	13,50	24,61	16,59	3479,0	7,00
12	26/11/2023	18,46	14,63	24,75	17,22	3430,2	7,00
13	27/11/2023	19,33	15,79	24,82	16,68	3435,2	7,00
14	28/11/2023	20,25	17,17	24,71	16,55	3440,4	7,00
15	29/11/2023	21,46	18,38	24,73	17,20	3450,0	7,00
16	30/11/2023	22,79	19,58	24,78	16,99	3452,1	7,00
17	1/12/2023	24,17	20,50	24,74	17,37	3453,3	7,00
18	2/12/2023	25,29	21,33	24,82	16,91	3462,1	7,00
19	3/12/2023	26,46	22,00	24,82	17,29	3457,6	7,00
20	4/12/2023	27,63	22,79	24,65	16,75	3446,3	7,00
21	5/12/2023	29,04	23,50	24,76	17,29	3419,5	7,00
22	6/12/2023	30,08	24,00	24,78	16,90	3423,8	7,00
23	7/12/2023	31,00	24,92	24,73	16,56	3407,0	7,00
24	8/12/2023	31,79	25,63	24,76	16,99	3459,6	7,00
25	9/12/2023	32,42	26,25	24,69	16,68	3460,8	7,00
26	10/12/2023	33,00	27,33	24,81	16,78	3454,1	7,00
27	11/12/2023	33,79	28,17	24,73	16,86	3422,0	7,00
28	12/12/2023	34,50	29,17	24,77	16,90	3429,5	7,00
29	13/12/2023	35,08	30,17	24,72	17,24	3455,2	7,00
30	14/12/2023	36,00	31,00	24,77	16,74	3472,0	7,00

Figura 23. Promedio por día de los datos del cultivo de microalga Chlorella.
Fuente: Elaboración propia.

La ejecución de un controlador digital PID por medio de la tarjeta de desarrollo Arduino Mega y una interfaz de control en el software Matlab contará con un sistema de lazo cerrado el cual se encargará de mantener constante la temperatura del cultivo en 25 °C y para otras especies se puede configurar según los requerimientos de la misma especie.

Inicialmente la función de transferencia fue hallada mediante la obtención de datos de la planta y luego por medio de la función "Ident" la cual hace parte de las herramientas de Matlab, se encontraron los respectivos valores que tendrá la ganancia y el tiempo de retraso de la ecuación de primer orden del sistema.



*Figura 24. Obtención función de transferencia Matlab.
Fuente: Elaboración propia.*

Se idealizó un sistema de control PID con la sintonía propuesta por Ziegler – Nichols al cual se le hicieron algunas pruebas de funcionamiento para conocer la respuesta del sistema y poder obtener una función de transferencia del sistema que estará sujeta en el controlador para obtener mejor respuesta por parte del controlador digital.

Desde la interfaz de Arduino se realizaron algunas pruebas de respuesta del sistema con el fin de determinar si se realizó un correcto análisis del PID implementado y si el actuador responde efectivamente a los cambios que se puedan presentar como se analiza en la figura 24.

En la parte inferior de la figura 26 se muestra el comportamiento del actuador escalado de 0 a 100 % respecto al tiempo, allí se muestra la variabilidad que tiene para ajustar la potencia de salida que debe llevar el actuador para lograr controlar la temperatura al punto de referencia establecido.

En el tiempo entre 0 a 200 segundos se coloca un punto de referencia de 30 y 50 °C luego se ubica en 35 °C y el sistema se adecua para mantener su temperatura. Al pasar de 30 °C a 45 °C entre 400 a 550 segundos el sistema no sobrepasa su temperatura dando un resultado favorable para el cultivo de microalgas ya que no se desea tener temperaturas mayores a los 25 °C.

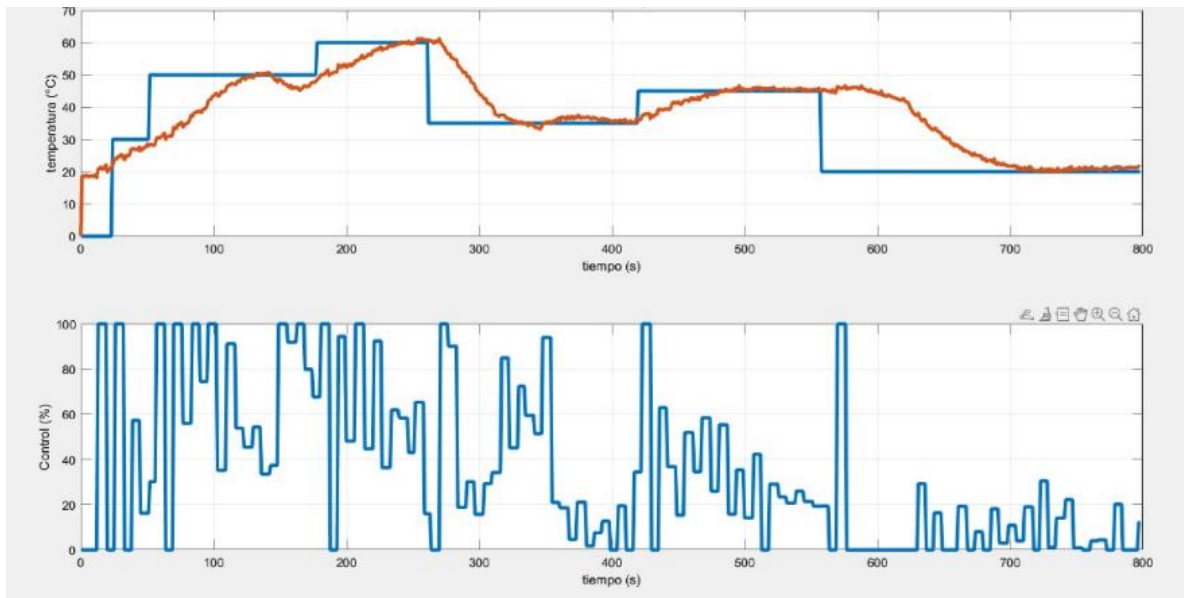


Figura 25. Respuesta del control de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 27 muestra en la parte superior el comportamiento de la temperatura respecto al tiempo, en color rojo. La línea azul representa los valores del punto de referencia que fijan la temperatura a la que debe llegar el actuador. Mostrando de esta manera que el sistema responde adecuadamente a los valores fijados para el control.

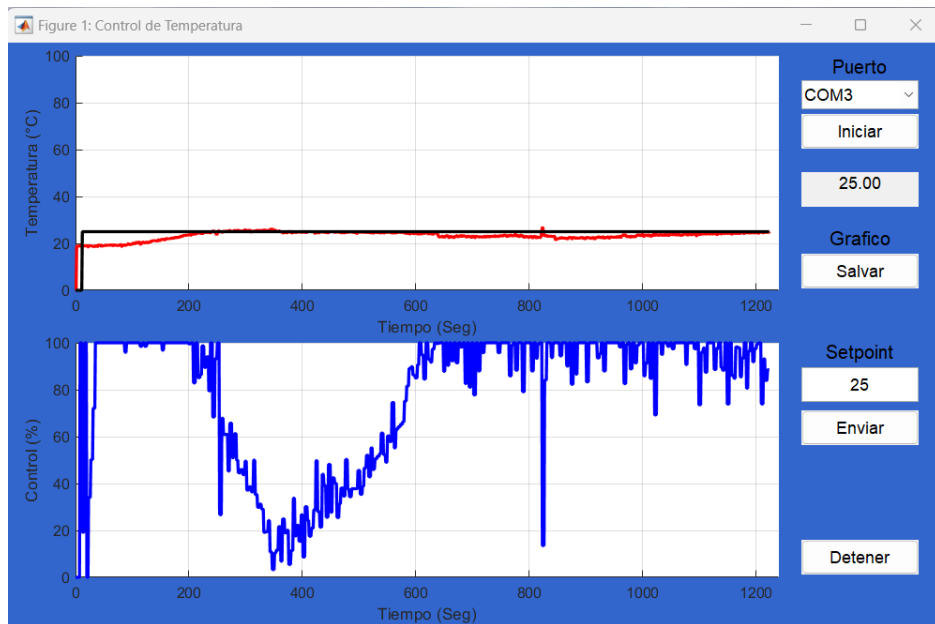


Figura 26. Interfaz de control Matlab.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 27 se evidencia en la parte superior en color negro el punto de referencia de 25 °C que se le da al sistema y así mismo la línea roja representa la curva de la temperatura, en la parte inferior la corriente que se le está suministrando a la resistencia para lograr hacer el control PID y mantener el punto de referencia. El sistema de control responde adecuadamente al punto de referencia que se le aplica al cultivo de microalgas, el comportamiento del actuador respecto al tiempo en una escala de (0-100) %. Este último respondiendo a cualquier tipo de perturbación al sistema que pueda desequilibrar la temperatura.

7.3 Resultados de la fase 3

Se desarrolla por medio del microscopio LABOMED de la universidad Uniagraria donde se realiza el análisis de la cepa *Chlorella sp* en el cual se obtiene la imagen de la microalga como se observa en la figura 28, y comparándola con un estudio realizado por (Gagneten & Marchese, 2023) se identifica que es la misma especie. Para este estudio se enfatiza en que conserve la misma estructura ya que no se realizaran pruebas para biofertilizante ya que no es necesario analizar la muestra de la microalga para descartar que contenga agentes patógenos.

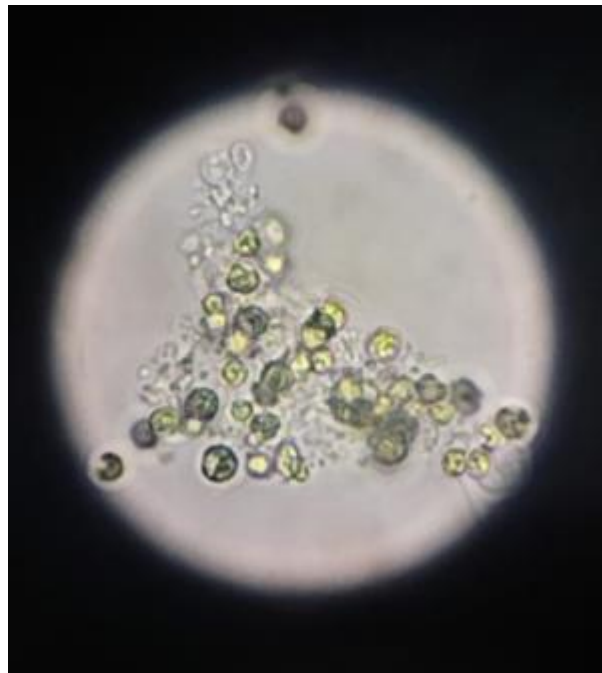


Figura 27. Reconocimiento de la microalga *Chlorella sp* en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.


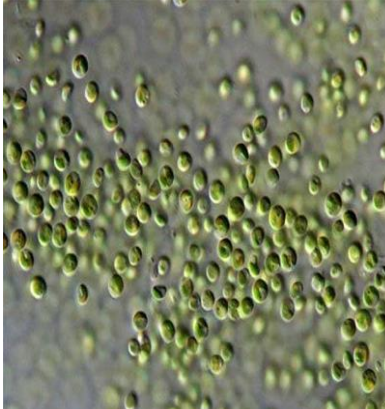
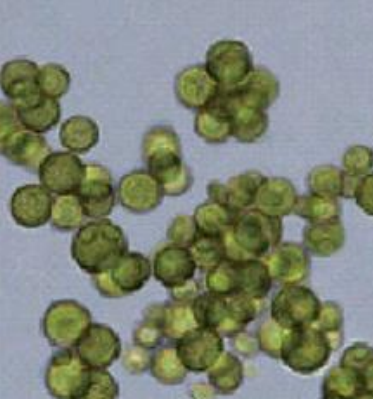
Microalga <i>Spirulina</i>	Microalga <i>Annochloropsis</i>	Microalga <i>Chlorella</i>
		
(Zabala Blanco & Suarez Hurtado, 2023)	(Low Guerra, 2012)	(Muñoz Peñuela & Ram, n.d.)

Tabla 10. Comparación de especies de microalgas en microscopio.
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar un análisis sobre las diferentes especies de microalga a través de un microscopio como se identifica en la tabla 9 la especie *Chlorella sp* tiene una similitud con la microalga *Chlorella sp* en laboratorio. Por medio de este análisis se puede afirmar que la cepa la cual se estuvo aplicando el estudio es *Chlorella sp* cumpliendo de esta manera los rangos de temperatura e implementación como alternativa de biofertilizante.

Los datos obtenidos a través de las pruebas realizadas en el laboratorio en el cual se tomaron inicialmente 6 muestras de 16 ml cada tres días por cada medio de cultivo y se almacenan a 3 °C antes de ser llevadas a laboratorio y se divide en dos pruebas de 15 días.

En el laboratorio se limpian las Petri con etanol y deben ser llevadas al horno durante 20 minutos a 60 °C, posteriormente se pasan al desecador por un tiempo de 10 minutos y se toma su peso en seco por medio de una balanza analítica (Cala A. et al., 2011).

Se toman tres muestras de 5 ml por cada día de muestreo y se llevan a la centrifuga por 25 minutos a 9500 RPM posteriormente se saca 4ml de agua y el restante se coloca en las Petri previamente limpiadas, las cuales se llevan al horno por un tiempo de una hora y media a una temperatura de 50 °C, al sacarlas del horno se dejan 10 minutos en el desecador y se vuelven a pesar en la balanza para tomar una diferencia de peso y tener el peso de las microalgas en donde se obtiene como

resultado la gráfica 5. En el anexo 1 se puede evidenciar a detalle fotográficamente los procesos realizados en el laboratorio de la universidad.

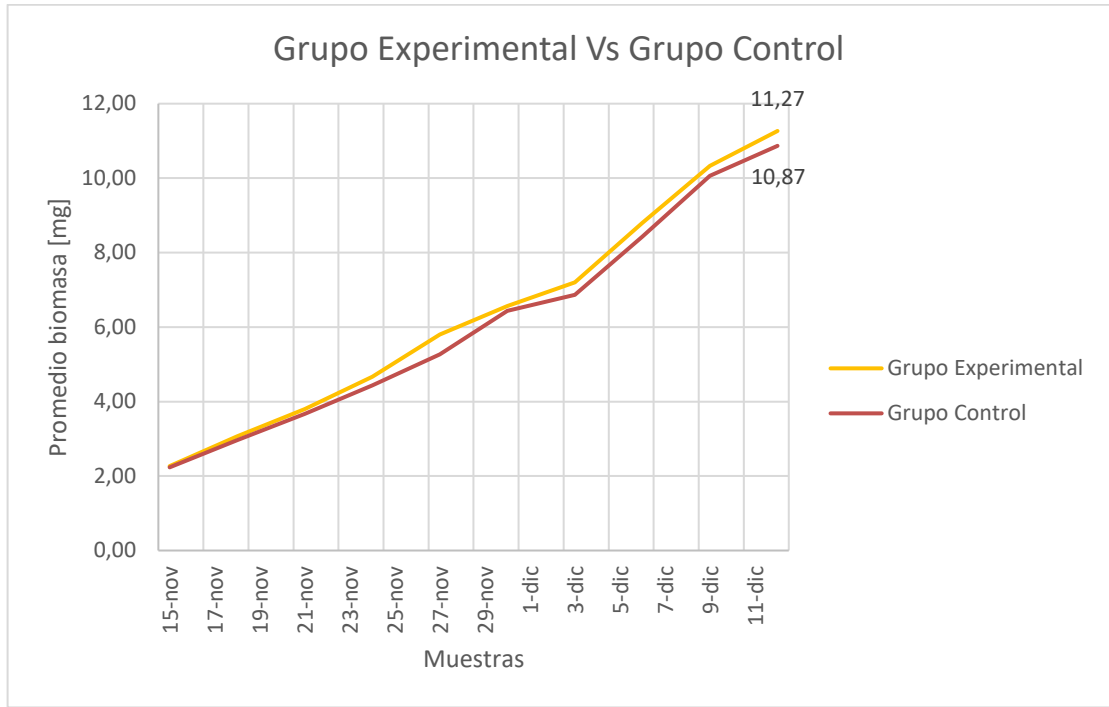


Figura 28. Resultados de crecimiento de la microalga *Chorella sp* por análisis de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

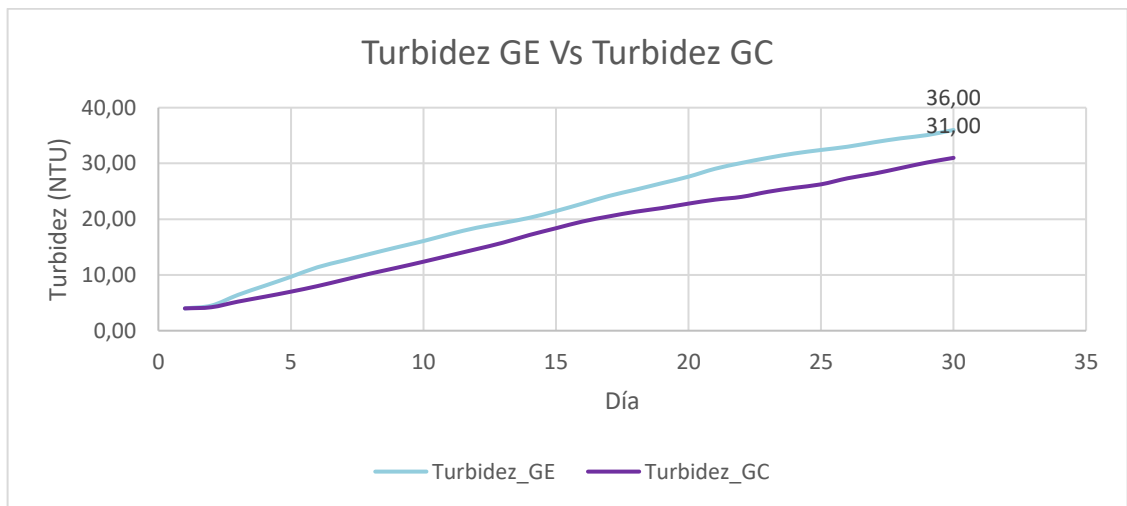


Figura 29. Resultados del crecimiento por medio de la turbidez en los dos medios de cultivo de microalga *Chlorella sp*

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 29 se evidencia la reproducción de la microalga del grupo experimental y el grupo control a través de las pruebas realizadas en el laboratorio. En la figura 30 los resultados obtenidos por medio de los sensores de turbidez ubicados en el grupo control y el grupo experimental. En ambas figuras, el grupo experimental cuenta con el control de temperatura a 25 °C mientras que el grupo control no cuenta con este sistema.

En los resultados de las pruebas de laboratorio de la figura 29 se tienen mejores resultados mostrando mayor cantidad de biomasa en 0,4 mg mientras que en la figura 30 por turbidez se tiene una diferencia de 5 NTU. En los dos casos indica que la implementación del control de temperatura hace un aporte a la reproducción de las microalgas, los resultados en la figura 27 pueden variar según el tipo de sensor que sea usado y de igual forma la calibración de la balanza analítica implementada para los pesos de la prueba de laboratorio.

En los resultados de la figura 31 se observa la estabilidad del sistema del grupo experimental el cual logra mantener la temperatura en los 25 °C durante el tiempo, dicho valor corresponde al valor ideal para la reproducción idónea de la microalga, por otro lado, se muestra la diferencia del grupo control el cual muestra la variación de acuerdo con las condiciones ambientales del lugar donde se llevó a cabo el estudio.

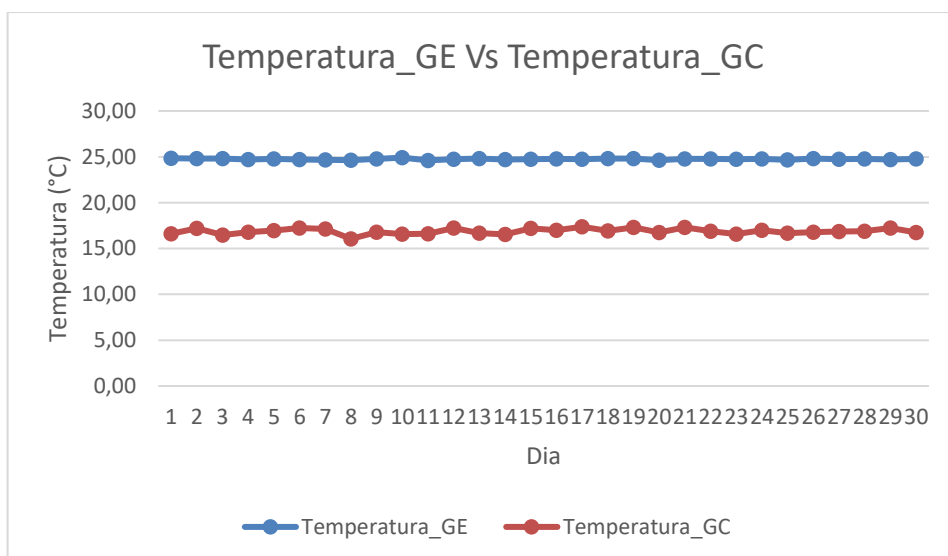


Figura 30. Comportamiento de la temperatura de los ambientes de microalga *Chlorella sp.*
Fuente: Elaboración propia.

La luminosidad de los medios de cultivo se evidencia por medio de la figura 32 ya que es la misma para el grupo experimental como el grupo control, de esta forma se analiza que ambas estuvieron expuestas a la misma intensidad durante el tiempo de estudio. Esta medición se puede ver afectada por la precisión que presente el sensor.

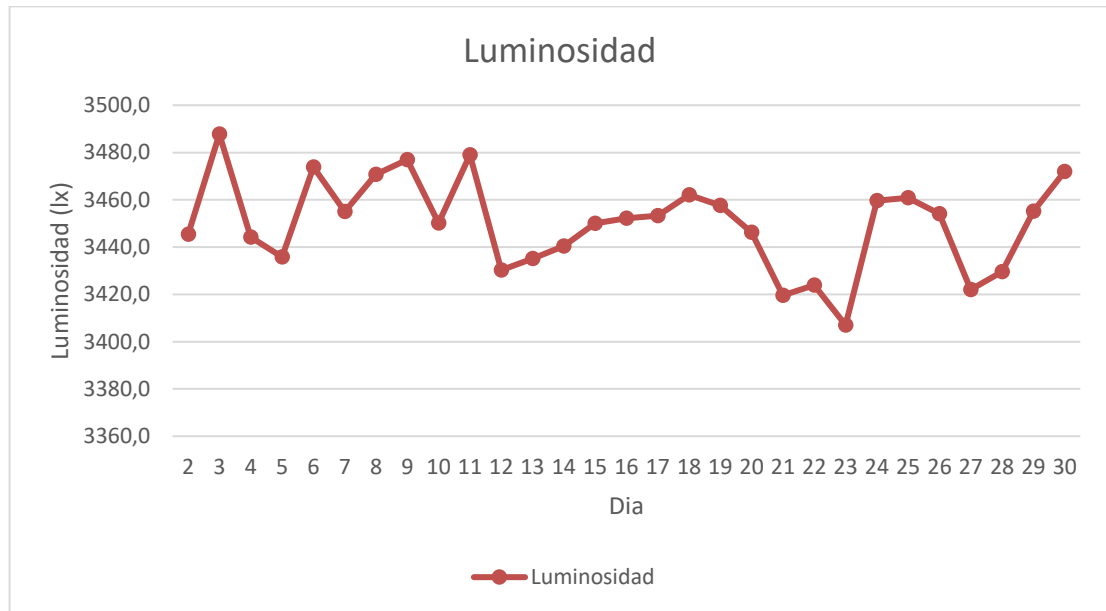


Figura 31. Luminosidad recibida en los medios de cultivos.
Fuente: Elaboración propia.

Respondiendo la hipótesis de trabajo plasmada en la fase 3: El control de temperatura permitirá optimizar las condiciones idóneas de crecimiento y reproducción de las diferentes especies de microalga, mejorará la eficiencia y desarrollo de la especie para convertirse en una alternativa viable como biofertilizante para el sector agro.

Se ejecuto un análisis estadístico t-Student asumiendo varianzas desiguales para determinar si el control de temperatura en el recipiente del grupo experimental mejoro significativamente la reproducción de la microalga, teniendo en cuenta que:

H₀ (hipótesis nula): No hay diferencia significativa en la turbidez del cultivo de microalgas entre el grupo experimental y el grupo control.

H₁ (hipótesis alternativa): existe una diferencia significativa en la turbidez del cultivo de microalgas entre el grupo experimental y el grupo control.

$$H_0 : \mu_{25^\circ C} = \mu_{ambiente}$$

$$H_1 : \mu_{25^\circ C} \neq \mu_{ambiente}$$

	<i>Turbidez_GE</i>	<i>Turbidez_GC</i>
Media	22,24177396	18,19170243
Varianza	89,05177679	66,32422905
Observaciones	699	699
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1367	
Estadístico t	8,590319264	
P(T<=t) una cola	1,16418E-17	
Valor crítico de t (una cola)	1,645969068	
P(T<=t) dos colas	2,32836E-17	
Valor crítico de t (dos colas)	1,961700881	

Tabla 11. Resultados prueba t-student.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados que se pueden analizar de la tabla 10, la prueba t de Student para medias de dos muestras asumiendo varianzas desiguales, se concluye que:

El valor absoluto del estadístico t calculado (8.5903) es mayor que el valor crítico de t (1.6459 para una cola y 1.9617 para dos colas), se puede deducir que hay diferencia significativa entre las medias de los dos grupos en términos de la variable turbidez.

- Diferencia significativa entre las medias: existe una diferencia significativa entre las medias de turbidez entre los dos grupos de microalga *Chlorella sp.* Esta diferencia demuestra que el grupo experimental tiene una turbidez significativamente mayor en comparación con el grupo control.
- Impacto del control de temperatura: la prueba indica que el control de temperatura tiene un efecto positivo en la reproducción del organismo

modelo usado en este estudio, es decir que mantener la temperatura constante de 25 °C propicia un mayor crecimiento.

Se concreta finalmente que el control de temperatura efectivamente optimiza las condiciones de reproducción de la microalga *Chlorella sp*, como se refleja en la mayor turbidez del cultivo en comparación con las condiciones de temperatura ambiente. Por lo tanto, esta conclusión respalda la hipótesis de trabajo planteada.

8 CONCLUSIONES

1. Efecto del control de temperatura en la reproducción de la microalga:
 - Los resultados de las figuras 29 y 30 evidencian un crecimiento exponencial en la reproducción de la microalga *Chlorella sp* en ambos métodos durante 30 días donde se observa un mayor crecimiento en el recipiente de estudio del grupo experimental con control de temperatura, confirmando la hipótesis de que la temperatura es un factor crucial para el desarrollo de la microalga.
 - El control de temperatura permitió mantener un ambiente óptimo para la *Chlorella sp*, impulsando su tasa de reproducción.

2. Impacto de las variables ambientales en el crecimiento de la microalga:
 - El monitoreo y adquisición de datos de las variables ambientales permitieron identificar los factores que afectan el crecimiento de la microalga *Chlorella sp*. Entre las variables más importantes se encuentran: temperatura, pH, luminosidad, turbidez, nutrientes, concentración de CO₂ y flujo de oxígeno.
 - La adquisición de datos fue efectiva, permitiendo el análisis de los parámetros del monitoreo. Para el usuario final es posible realizar un monitoreo constante de las condiciones en las que se encuentre el cultivo de las microalgas dando la posibilidad de intervenir oportunamente de forma manual o automatizada en la variación de alguna de sus variables.
 - La evaluación llevada a cabo en el estudio brindó información relevante sobre el crecimiento de la microalga como la implementación de la temperatura de forma constante.
 - La información obtenida es útil para optimizar las condiciones de cultivo y maximizar la producción de la microalga *Chlorella sp*.

3. Potencial de la microalga *Chlorella sp* para la producción sostenible en la Sabana de Bogotá:

- El estudio demuestra el potencial de reproducción de la microalga *Chlorella sp* para la producción sostenible en la Sabana de Bogotá.
- Se plantea como un trabajo futuro evaluar la capacidad de los nutrientes de la microalga *Chlorella* para mitigar el uso de agroquímicos en la Sabana de Bogotá, lo que contribuiría a una producción más sostenible. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para evaluar su comportamiento en condiciones de campo donde se determinará la eficacia como biofertilizante en diferentes cultivos y suelos.

4. Precauciones con el sensor de turbidez:

- Se debe tener precaución con la instalación del sensor de turbidez para evitar errores en la medición por la luz interna debido a que sus valores pueden variar por la luz exterior por ende se recomienda realizar la instalación de sensores de mejor calidad y una adaptación para que estos factores no intervengan en el proceso de medición.
- Se requiere conocer la parametrización adecuada del sensor para su correcto funcionamiento realizando una correcta calibración del sensor con los buffers patrón y conociendo por ficha técnica la desviación del sensor.

9 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Se plantean algunos indicadores adicionales para realizar en un trabajo futuro debido al tiempo en que se debe emplear cada estudio como lo es:

Productividad – refiere a la cantidad de biomasa producida por alguna unidad de tiempo.

Tasa de crecimiento – refiere a la velocidad en la que la microalga se reproduce.

Calidad de biomasa – refiere a la composición química de la microalga en cuanto a su contenido de proteínas, lípidos, carbohidratos y pigmentos etc.

- Investigar el efecto de otras variables ambientales en el crecimiento de la microalga *Chlorella sp* en la Sabana de Bogotá, como la salinidad, diferentes rangos de temperatura y la composición del agua.
- Desarrollar estrategias para optimizar el control de las variables ambientales en el cultivo de la microalga *Chlorella sp* en la Sabana de Bogotá.
- Evaluar el potencial de la microalga *Chlorella sp* para la producción de otros productos de alto valor, como bioproductos y nutracéuticos.
- Se sugiere implementar sensores de mayor precisión para la toma de datos.
- Se recomienda ampliar el control a otras variables como el CO₂ y el flujo de oxígeno.
- En general, el estudio ha demostrado que el control de la temperatura y el monitoreo de las variables ambientales son factores importantes para el crecimiento de la microalga *Chlorella sp*. Esta información es útil para optimizar la producción de la microalga y aumentar su potencial para la producción sostenible de biomasa y otros productos de alto valor en la Sabana de Bogotá.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Adam, E. (2020). *Instrumentación y control de procesos*. www.unl.edu.ar/editorial
- Agustín Jiménez, A. (2020). *Sistemas de Control Borroso Sistemas de Control Borroso Control Inteligente Control Inteligente*.
- Andrés Ríos M, Juan Palacio P, Diana Girardo R, David Villegas G, & Santiago Cubillos J. (2019). *Una mirada desde la Ingeniería Agroindustrial DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE*. <https://doi.org/10.18566/978-958-764-752-5>
- Angulo Rios, L. (2017). *Cátalogo de genes del metabolismo de lípidos de microalgas oleaginosas amazónicas promisorias para la producción sostenible de biodisel*.
- Arian. (2024). *PT100, su operación, instalación y tablas*.
- Borowitzka, M. (2005). *Topic 8: Algal Culture and Biotechnology*.
- Borowitzka, M., & Moheimani, N. (2013a). *Algae for Biofuels and Energy*.
- Borowitzka, M., & Moheimani, N. (2013b). *Algae for Biofuels and Energy*.
- By ALLDATASHEETCOM, P. (2009). *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC BH1750FVI*. www.rohm.com
- Cala A., S. L., Yáñez Angarita, E. Eduardo., & Jesús A., G. N. (2011). *Manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio*. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite - CENIPALMA.
- Casignia V, B. A. (2016). *Diseño e implementación de un controlador neuro-difuso para un motor de corriente continua*.
- Castaño Giraldo, S. A. (2021). *Método de Cohen y Coon de sintonía para controles PID. Control automático educación*. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/cohen-coon/>
- Castell, G. S., Ngo De La Cruz, J., Pérez Rodrigo, C., & Aranceta, J. (2015). Escalas de evaluación de la inseguridad alimentaria en el hogar. *Rev Esp Nutr Comunitaria*, 21, 270–276. <https://doi.org/10.14642/RENC.2015.21.sup1.5074>
- Castro Bustamante, J. (2018). *Diseño de una planta piloto para el crecimiento de microalgas heterótrofas*.
- Chacón Lee, T. L. (2010). *Efecto de la aplicación de soluciones de Chlorella vulgaris y scenedesmus obliquus sobre el contenido de compuesto funcionales en germinados de brócoli*.
- Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.12.002>
- Collahuazo Reinoso, Y., & Araujo Abad, S. (2019). Producción de biofertilizantes a partir de microalgas. *CEDAMAZ Revista Del Centro de Estudio y Desarrollo de La Amazonia*, 10(02), 75–80.

- Conislla, M., Arias, J., & Rodríguez Sáenz, D. (2023). *Aumenta 137% el valor de las importaciones de fertilizantes químicos de América Latina y el Caribe en 2022*. <https://blog.iica.int/blog/aumenta-137-valor-las-importaciones-fertilizantes-quimicos-america-latina-caribe-en-2022>
- Contreras Flores, C., Peña Castro, J., Flores Coter, L., & Cañizares Villanueva, L. (2003). *Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas*. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000800004&script=sci_arttext
- Corredor C, J. C., & Gonzalez T, O. A. (2012). *Diseño de un controlor adaptativo basado en los parámetros de sintonización de Ziegler y Nichols para plantas de primer orden*.
- Cruz López, C. (2018). *Sistema automatizado de control de variables fisicoquímicas en un prototipo para favorecer la apropiación social del cultivo de spirulina spp*.
- DFRobot. (2023). *Turbidity sensor*.
- DFRobot. (2024). *Turbidity sensor*.
- Ebrecht, L., & Wolfenson, A. (2016). *Calibración de un sensor de turbidez en un reactor*.
- Electronicas afg. (2024). *Sensor de temperatura termocupla con Max6675* . https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-472255521-sensor-de-temperatura-termocupla-max6675-arduino-_JM?matt_tool=42035816&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14634237770&matt_ad_group_id=158151082475&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=686481802702&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=121830048&matt_product_id=MCO472255521&matt_product_partition_id=2266488685416&matt_target_id=pla-2266488685416&cq_src=google_ads&cq_cmp=14634237770&cq_net=g&cq_plt=gp&cq_med=pla&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwncWvBhD_ARIsAEb2HW9eAvPh7u0wfEThr2nlqhKQgoQbUY3RwWQRM2GpRe-T9DrMF2HOOIMaAk7oEALw_wcB
- Electronics. (2024). *pH-4502C sensor de pH liquido con electrodo*.
- Fajardo, C., Gonzalo Martinez, R., Blasco, J., Mancera, J. M., Thomas, B., & De Donato, M. (2022). Nanotechnology in aquaculture: Applications, perspectives and regulatory challenges. In *Aquaculture and Fisheries* (Vol. 7, Issue 2, pp. 185–200). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.12.006>
- Fao. (2006). *Cultivo de bivalvos en criadero*. <https://www.fao.org/3/y5720s/y5720s07.htm>
- Fao. (2019). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*.

- FAO. (2022). *Funcionamiento del criadero: cultivo de algas*.
<https://www.fao.org/3/y5720s/y5720s07.htm>
- Fernández García, L. G., Castillo Ibarra, J. R., & Rodríguez Ruiz, C. A. (2006). *Aplicación de un control clásico a un sistema multiárea*.
- ferretronica. (2024). *Sensor de turbidez del agua analogo tipo optico*.
<https://ferretronica.com/products/modulo-sensor-de-turbidez-del-agua-analogo-tipo-optico>
- Ferron, L., Garcia V, Villalba, A., iriarte, A., Pattini, A., & Lesino, G. (2011). Utilización de sistemas pasivos de iluminación natural en salas de propagación agámica de plantas. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.
<http://www.jaloxa.eu/webhdr/>
- Fertilab. (2022). *La Compactación del Suelo*.
<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/153-Compactacion-del-suelo.pdf>
- Folleto informativo turbidez. (2023).
https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3150sp.pdf
- Gagneten, A. M., & Marchese, M. R. (2023). *Ambientes acuáticos de la provincia de Santa Fe protocolos de monitoreo con perspectiva socioecológica*.
- García, E., & Flego, F. (2022). *Agricultura de Precisión*.
- García Romeral, J., Pavía gómez, M., García Sanz, T., Chirivella Martorell, J., & Serrano Aroca, A. (2017). *Principios de biotecnología y bioingeniería en el cultivo de microalgas: importancia, problemas tecnológicos, tipos y sistemas de cultivos, crecimiento, factores limitantes, selección, aislamiento, escalado y caracterización bioquímica*.
- Gardi C, A. M. B. S. C. J. C. C. E. A. J. A. K. P. M. M. L. M. O. S. P. V. M. V. R. (2014). *Atlas de suelos de América latina y el Caribe*.
<https://doi.org/10.2788/37334>
- Garzón Parra, V. (2019). *Diseño e implementación de sistemas de control para distribución de luz para cultivos en ambientes controlados*. chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/44986/u830384.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González Céspedes, A. (2015). *¿Qué son las microalgas? interés y uso*.
<https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>
- Gorrini, F. A., Biagiola, S., Figueroa, J. L., & Wouwer, A. Vande. (2021). *Estimación y Control Dinámico para Cultivos de Microalgas con un Esquema EKF-NMPC*.

- Gualotuña Logacho, S. A. (2021). *Estrategia de control robusto descentralizado para una micro-red aislada con generación distribuida acoplada para mejorar la estabilidad de voltaje.*
- Guemisa. (2023). *Turbidez.* <https://www.guemisa.com/articulos/turbidez.pdf>
- Gutiérrez Barragán, L. (2017). *Diseño de un fotobiorreactor para la producción de biomasa a partir de la luz solar.*
- Guzmán, J. L., Acién, F. G., & Berenguel, M. (2021a). Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 18(1), 1–18. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2020.13604>
- Guzmán, J. L., Acién, F. G., & Berenguel, M. (2021b). Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 18, 1–18. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2020.13604>
- Guzmán, J. L., Acién, F. G., & Berenguel, M. (2021c). Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 18(1), 1–18. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2020.13604>
- Henriquez Novoa, J. A., & Martinez Rodriguez, W. J. (2019). *Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración.*
- Hernández Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. In *Revista de Biología Marina y Oceanografía* (Vol. 49, Issue 2, pp. 157–173). Universidad de Valparaíso. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. In *Revista de Biología Marina y Oceanografía* (Vol. 49, Issue 2, pp. 157–173). Universidad de Valparaíso. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Herrera Sanchez, E. (2020). *Cultivo de microalga Chlorella sp en un fotobiorreactor para la obtención de biodiesel.*
- Huang, B., Liu, J., Sun, Y., & Chen, F. (2016). Production of microalgal biostimulants by a sequential two-step cultivation and utilization for promoting growth of rice plants. *Bioresource Technology*, 209–296.
- Iberdola. (2020, May 4). *La contaminación del suelo, sus efectos sobre nuestro futuro y qué podemos hacer para reducirla.*
- ICA. (2003). *Instituto Colombiano Agropecuario.*
- ICA. (2004). *Instituto Colombiano Agropecuario.*

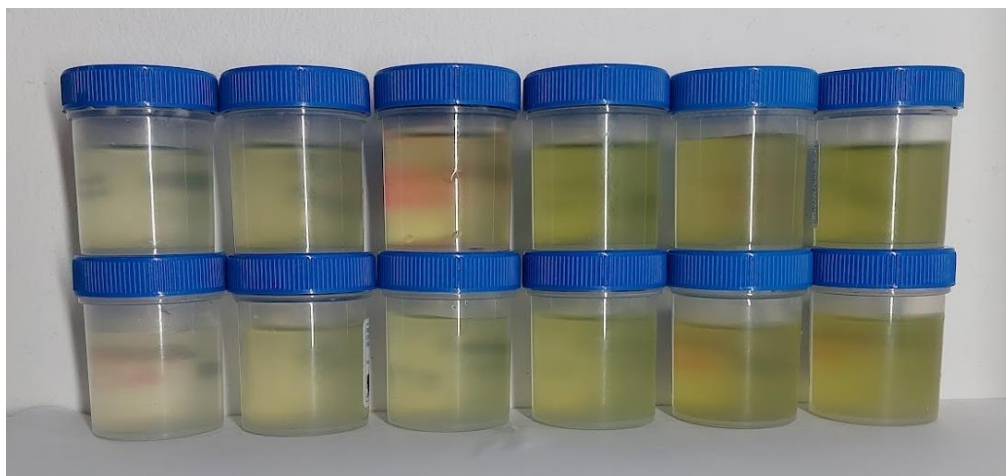
- ICA. (2011). *Resolución* 698.
<https://www.ica.gov.co/getattachment/Normatividad/Normas-Ica/Resoluciones-Oficinas-Nacionales/2020/2020R68370/Resolucion-698-de-2011.pdf.aspx?lang=es-CO>
- IFA. (2022). *Fertilizer*.
- Innovatronics. (2024). *Sensor intensidad de luz para arduino Bh1750*.
https://www.innovatronics.com.co/MCO-467554600-sensor-intensidad-de-luz-para-arduino-bh1750-_JM
- Jiménez, A. (2024). *La concepcion del cambio tecnologico en la agricultura*.
- Labprocess. (2020). *Guía del proceso de calibración de pHmetro*.
<https://www.labprocess.es/guia-del-proceso-de-calibracion-de-phmetro>
- Lawrence, J. (2005). *Viral contamination of algal cultures*.
- Lee, Y.-K. (2001). *Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential*. 307–315.
- Lombo, L. M. D. (2021). *Anáñisis de los impactos ambientales ocasionados por el uso de los fertilizantes nitrogenados, en el cultivo de la papa en el municipio de Zipaquirá*.
- López Sánchez, J. (2023). *Control automático de nivel del separador de gas de planta productora Shushufindi*.
- López Solana, J. (2022). *Aplicación de microalgas como biofertilizante en cultivo de albahaca*.
- López-Padrón, I., Martínez-González, L., Pérez-Domínguez, G., Reyes-Guerrero, Y., Núñez-Vázquez, M., & Cabrera-Rodríguez, J. A. (2020). Las algas y sus usos en la agricultura. Una visión actualizada. In *Cultivos Tropicales* (Vol. 41, Issue 2). <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Low Guerra, C. (2012). *Evaluación de la vida útil de floculados de Nannochloropsis oculata a distintas temperaturas de conservación*.
- Lugo De Ossa, C. A. (2022). *Evaluación de algunos factores abióticos que favorecen la producción de biomasa y de ácidos grasos totales en la microalga nativa Chlorella sp en cultivo heterotrófico*.
- Ma, X. N., Chen, T. P., Yang, B., Liu, J., & Chen, F. (2016). Lipid production from Nannochloropsis. *Marine Drugs*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/md14040061>
- Martin Calcagno, F. M. (2021). *Herramienta para la optimizacion de los usos del suelo en predios pequeños y medianos productores rurales*.
- Marzęda-Młynarska, K. (2019). La gobernanza de la seguridad alimentaria en América Latina: desde la cooperación Norte-Sur hacia la cooperación Sur-Sur. *Anuario Latinoamericano – Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales*, 7, 131. <https://doi.org/10.17951/al.2019.7.131-151>

- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 1, pp. 217–232). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Mendoza, A., Cabrera Londoño, N., Berdugo Barandica, N., Roldán Mckinley, J., & Yime Rodríguez, E. (2018). Implementación de control PID de nivel en laboratorio usando PLC Siemens S7-300. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 159–178. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018015>
- Mérida Ramírez, L. G. (2020). Agrobiología: Una visión general y us aplicaciones. In *Agrobiología*. Mérida Publishers. <https://doi.org/10.4322/mp.2020.001>
- Molina Grima, E., Belarbi, E.-H., Ación Fernández, F. G., Robles Medina, A., & Chisti, Y. (2003). *Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics*. www.elsevier.com/locate/biotechadv
- Muñoz B, B., Díaz G, L., Yáñez C, J., & Hernández P, J. (2020). *Sistema de control PID con sintonización por respuesta en frecuencia basado en microcontrolador*.
- Muñoz Peñuela, M., & Ram. (n.d.). *Effect of culture medium on growth and protein content of Chlorella vulgaris*.
- Murcia, L. J., & Parra, M. A. (2018). *Producción de proteínas a partir de la microalga chlorella vulgaris enriqueciendo el medio del cultivo con fuentes de nitrógeno*.
- Murillo, J., Alonso, A., García, L., León, I., García, E., Gil, B., & Ríos, L. (2020). *Métodos de investigación de enfoque experimental*.
- Nieves, M., Voltolina, D., López Ruiz, J., Cisneros, M., & Piña, P. (2015). *Cultivo de microalgas marinas con medios enriquecidos con productos de naturaleza zeolítica*.
- Omaña-Silvestre, J. M., Quintero-Ramírez, J. M., & Omaña-Silvestre, J. C. (2019). Análisis técnico-económico de la erosión del suelo y su impacto en el bienestar de productores. *Revista de Desarrollo Urbano y Sustentable*, 1–12. <https://doi.org/10.35429/jusd.2019.15.5.1.12>
- ONAC. (2019). *Guía para la calibración de termómetros digitales con sensor tipo PRT, termistor y termopar en baños líquidos y hornos de bloque metálico*.
- Online browsing platform. (2021). *Laboratorios clínicos - Requisitos de seguridad*. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:15190:ed-2:v1:es>
- Orlando, D., & Poveda, P. (2019). *La tecnificación como herramienta para incrementar la productividad agropecuaria en Colombia*.
- Ortiz Villota, M. T., Romero Morales, M. A., & Meza Rodríguez, L. D. (2018). La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de

- Ubaque, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9(1), 163–176. <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n1.2018.8153>
- Pedraza Cuesta, M., & Prada Garavito, M. (2018). *Evaluación de la biofijación de CO₂ y producción de biomasa a partir de las mricroalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio.*
- Pedraza, G. (2023). *Cultivo de Spirulina maxima para suplementación proteica.*
- Perfetti, J. J., & Becerra, A. (2013). *Políticas para el desarrollo: de la agricultura en Colombia* (Vol. 1).
- picmicros. (2024). *Sensor ph análogo proyectos arduino.* https://picmicros.mercadoshops.com.co/MCO-499318310-sensor-ph-analogo-proyectos-arduino-_JM
- Ponce de Leon, J. (1967). *Función de transferencia y sus aplicaciones.*
- Rodríguez Castillo, G., Amarelo Santos, C., Guerrero Barrantes, M., & Delgado dos Reis, A. (2016). Estudio de las características morfológicas y fisiológicas de Chlorella protothecoides orientado hacia la producción de lípidos para biocombustible. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(6), 3. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i6.2897>
- Rodríguez-Castillo, G., Amarelo-Santos, C., Guerrero-Barrantes, M., & Delgado dos Reis, A. (2016). Estudio de las características morfológicas y fisiológicas de Chlorella protothecoides orientado hacia la producción de lípidos para biocombustible. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(6), 3. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i6.2897>
- Ruiz Martínez, A. (2011). *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente.*
- Sacedo Mora, J., & García Diego, F. (2015). *Desarrollo y calibración de un sensor de luz direccional mediante fotodiodos.*
- Sendoya, D. F. (2012). *¿Qué es el Control PrediCtivo y hacia dónde se proyeCta? What is the predictive control and to where it is planning?*
- Stewart W. (2022). *Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes.*
- Vargas Días, L. (2019). *Estado actual del estudio de las microalgas como bioestimulantes y perspectivas de su uso en la agricultura sostenible.* https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/4791/InformeFinal_Lized_AJUSTADO.pdf?sequence=1
- Vargas, T. B. (2016). Obtención de modelos de los procesos continuos utilizando el Toolbox de identificación de sistemas de Matlab. In *JUNIO* (Vol. 19, Issue 1).
- Vega Oliva, C. (2017). *Problemas ambientales y de salud derivados del uso de fertilizantes nitrogenados.*

- Vieyra Natanael, & Franco, H. (2017). *Función de transferencia y sistemas de primer orden*.
- Withers, P. J. A., Sylvester-Bradley, R., Jones, D. L., Healey, J. R., & Talboys, P. J. (2014). Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain. *Environmental Science and Technology*, 48(12), 6523–6530. <https://doi.org/10.1021/es501670j>
- Ynga, G., & Niño, A. (2019). *Manual para producción de microalgas marinas en el instituto del mar del Perú*. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/3338>
- Zabala Blanco, C., & Suarez Hurtado, O. (2023). *Identificación de fotoperiodo más eficiente para incrementar el crecimiento de la microalga (Spirulina Plantensis) a partir de un sistema cerrado a escala de laboratorio en la universidad industrial de Santander*.
- Zhou, C., Lin, K., Xu, D., Sun, C., Chen, L., Zhang, S., & Guo, Q. (2019). Computer vision and feeding behavior based intelligent feeding controller for fish in aquaculture. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 545, 98–107. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06137-1_10

11 ANEXOS



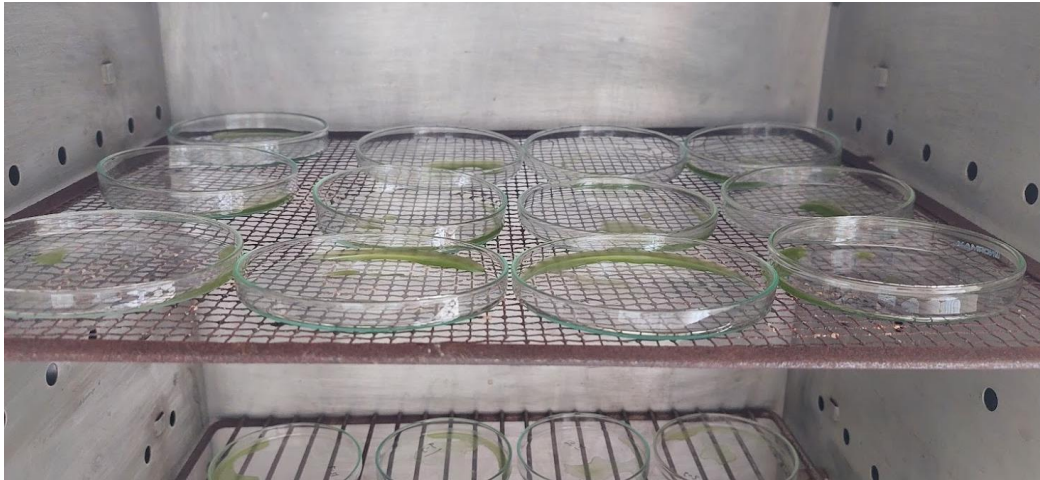
*Anexo 1. Toma fotográfica muestras de laboratorio 1
Fuente: Elaboración propia*



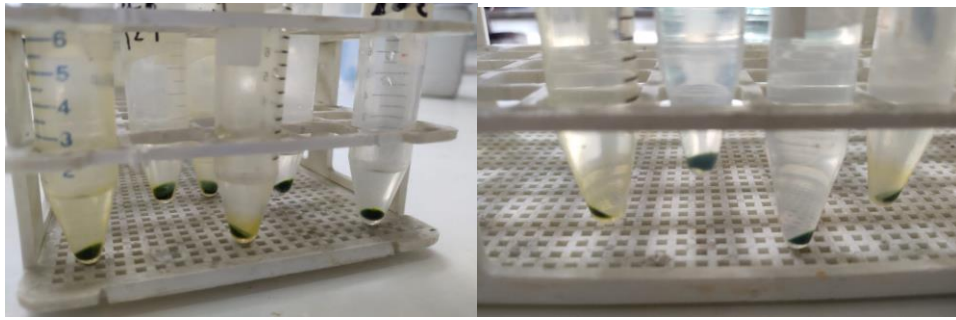
*Anexo 2. Toma fotográfica muestras de laboratorio 2
Fuente: Elaboración propia*



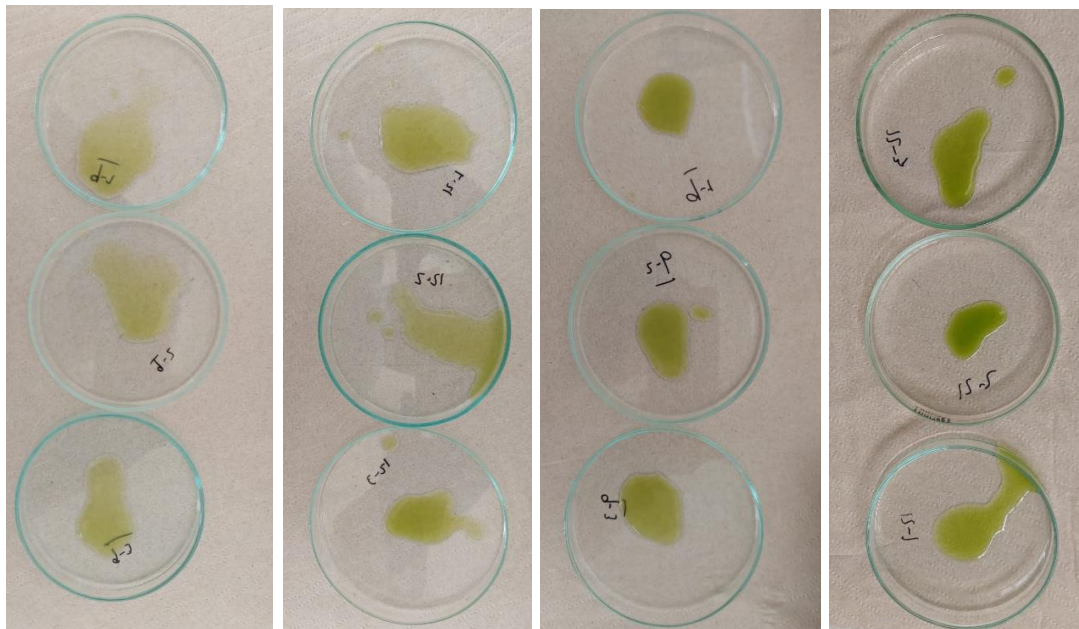
*Anexo 3. Toma fotográfica desecador muestras biomasa
Fuente: Elaboración propia*



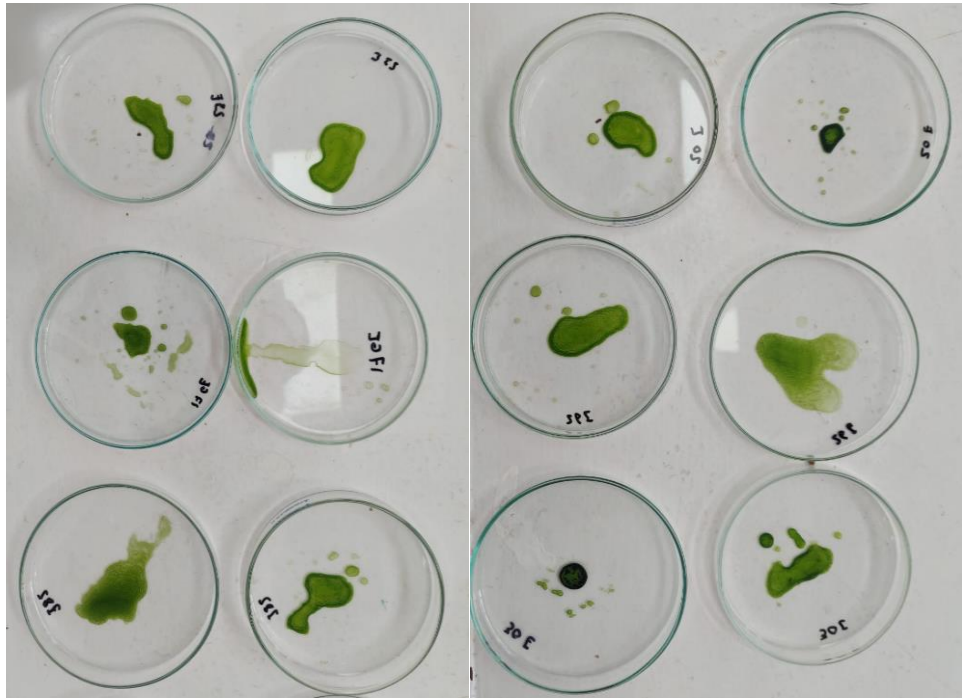
*Anexo 4. Toma fotográfica secado muestras biomasa
Fuente: Elaboración propia*



Anexo 5. Muestras biomasa *Chlorella* centrifugada
Fuente: Elaboración propia



Anexo 6. Toma de muestras placas Petri para secado de biomasa
Fuente: Elaboración propia



Anexo 7. Muestras biomasa secas
Fuente: Elaboración propia



Anexo 8. Maquinas centrifugas laboratorio UNIAGRARIA
Fuente: Elaboración propia



Anexo 9. Bascula laboratorio UNIAGRARIA
Fuente: Elaboración propia



Anexo 10. Microscopio laboratorio UNIAGRARIA
Fuente: Elaboración propia