Fotobioreactor Inteligente a base de Microalgas

Presentado por:

Santiago Alea Londoño

Valentina Arias Plata

John Alejandro Triana Jaramillo

Presentado a:

Luisa Fernanda Carvajal Díaz

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería (FIN)

Bogotá D.C. 2025

1. Resumen.

La contaminación del aire es un problema ambiental y de salud pública el cual afecta gravemente a la ciudades, causando enfermedades respiratorias, cardiovasculares y miles de muertes anuales. Con base a lo anterior, resulta fundamental desarrollar tecnologías sostenibles que ayuden a mejorar la calidad del aire, especialmente en espacios interiores y urbanos. Las microalgas ofrecen una alternativa natural y eficiente para la purificación del aire, ya que, pueden capturar dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV), a la vez que producen oxígeno. Este proyecto se enfoca en diseñar y construir un fotobiorreactor inteligente automatizado que permita optimizar y monitorear en tiempo real el procesos de purificación del aire utilizando microalgas.

El proyecto integra conocimientos de ingeniería química y mecatrónica para desarrollar un sistema funcional con sensores de calidad del aire, temperatura, y automatización para ajustar las condiciones óptimas para el cultivo de microalgas. Mediante experimentos controlados se evaluará la eficiencia del fotobiorreactor en la reducción de contaminantes atmosféricos y se optimizará las variables operativas para maximizar su rendimiento. Esta iniciativa busca aportar con la sostenibilidad urbana, la mejora de la salud pública y la generación de nuevos conocimientos interdisciplinarios.

2. Introducción.

La calidad del aire es un tema de creciente preocupación a nivel mundial y local, debido a su impacto directo en la salud pública y el medio ambiente. La contaminación atmosférica representa uno de los riesgos ambientales más graves, que afecta la vida cotidiana de millones de personas, acelerando procesos de deterioro ecológico y contribuyendo al cambio climático.

En Colombia, ninguna de las estaciones oficiales de monitoreo alcanza los niveles de calidad de aire recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En ciudades como Bogotá, Envigado y Bello, las concentraciones de material particulado fino (PM2.5) superan en algunos casos hasta seis veces los límites permitidos, Esta situación está asocia con enfermedades respiratorias y cardiovasculares que provocan miles de muertes prematuras anuales, además de generar elevados costos para el sistema de salud.

Según la OMS (2021), en 2019 aproximadamente el 68% de las muertes prematuras causadas por contaminación del aire exterior estuvieron vinculadas a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, el 14% a enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, otro 14% a infecciones agudas de las vías respiratorias bajas y el 4% a cánceres de pulmón. Aunque la exposición global al material particulado fino (PM2.5) ha disminuido levemente desde 2012, la mortalidad asociada a este contaminante ha aumentado en un 23% desde 2011 (State Global Air, 2023). Esto se explica porque las regulaciones más estrictas han sido efectivas principalmente en regiones desarrolladas, mientras que en América Latina, con normativas menos rigurosas, la contaminación continúa teniendo graves impactos en la salud pública.

Entre los gases contaminantes, el dióxido de carbono (CO_2) se destaca como uno de los principales contribuyentes al cambio climático. Desde la revolución industrial, los niveles

atmosféricos de dióxido de carbono (CO_2) han aumentado significativamente, alterando los ciclos naturales de la tierra y acelerando fenómenos como el calentamiento global y el derretimiento de los casquetes polares (BBVA,2025; NASA, 2025). El uso intensivo de combustibles fósiles es la causa principal, con países como Estados Unidos, Australia, China e India liderando las emisiones debido a sus altos niveles de industrialización y consumo energético (Ritchie et al., 2024).

Además de su efecto climático, el dióxido de carbono (CO_2) puede desplazar oxígeno en ambientes cerrados, generando malestares en las personas y sirviendo como un parámetro representativo para medir la calidad del aire interior. La exposición a altos niveles de dióxido de carbono (CO_2) y a la contaminación relacionada está vinculada indirectamente con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros impactos sociales, afectando principalmente a los grupos vulnerables como niños menores de cinco años y adultos mayores (Solerpalau, 2024; OPS, 2016).

En este contexto, la persistencia de niveles elevados de contaminantes atmosféricos y la insuficiencia en el cumplimiento de recomendaciones internacionales para la calidad del aire evidencian la necesidad de desarrollar nuevas estrategias y tecnologías sostenibles que contribuyan a mitigar este grave problema sanitario y ambiental.

3. Objetivos.

3.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de fotobiorreactor inteligente a pequeña escala que utilice microalgas para purificar el aire mediante la captura de dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV).

3.2 Objetivos específicos

Seleccionar especies de microalgas adecuadas con el fin de establecer un sistema de cultivo óptimo para la captura eficiente de dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en un fotobiorreactor experimental.

Construir un prototipo funcional de fotobiorreactor inteligente, integrando sensores de calidad de aire y temperatura para monitoreo.

Evaluar la eficiencia y funcionalidad del sistema en la depuración del aire bajo condiciones controladas, mediante la monitorización de variables disponibles y el comportamiento del cultivo de microalgas.

4. Problema.

La contaminación del aire exterior es un problema ambiental y de salud pública con impactos severos a nivel mundial. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS,2021), en 2019 las muertes prematuras atribuibles a la contaminación del aire se relacionan mayoritariamente con enfermedades cardiovasculares, como cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares con un 68%, seguidas por enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias agudas con un 14% cada una y cánceres de pulmón con un 4%. Estos datos evidencian la relación directa entre la mala calidad del aire y el aumento de la mortalidad por causas que afectan principalmente los sistemas respiratorio y cardiovascular.

Aunque la exposición global al material particulado fino (PM2.5) ha mostrado una tendencia desde 2012, la mortalidad global asociada a este contaminante ha aumentado un 23% desde 2011, lo que indica que las medidas adoptadas hasta el momento son insuficientes para reducir sus consecuencias en la salud pública (State Global Air, 2023). Este material particulado, es generado principalmente por actividades industriales, emisiones vehiculares y la quema de combustibles fósiles, afectando particularmente a regiones donde las normativas ambientales son poco estrictas. América Latina es una de las regiones, la contaminación del aire persiste como un problema grave y mortal.

En Colombia, la situación es crítica. Un estudio del Instituto Nacional de Salud (INS) reportado por el Ministerio de Salud y Protección Social indica que aproximadamente 17.549 muertes anuales están asociadas a factores de riesgo ambiental relacionados con la contaminación del aire y la mala calidad del agua, representando un

8% del total de fallecimientos en el país (INS,2025). Las principales causas de mortalidad vinculadas a la contaminación atmosférica son enfermedades isquémicas del corazón, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, infecciones respiratorias agudas y cáncer de pulmón. Estas cifras reflejan la magnitud del impacto sanitario que genera la contaminación en la población colombiana.

Además, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) estima que los costos económicos por atención hospitalaria y mortalidad prematura asociadas a la contaminación del aire alcanzan los 12.2 billones de pesos anuales en Colombia, equivalentes a aproximadamente el 1.5% del producto Interno Bruto (Ministerio de Ambiente,2025).

Las principales ciudades colombianas, como Bogotá, Medellín y Cali, reportan altos niveles de contaminantes atmosféricos, con concentraciones de material particulado fino (PM2.5) superiores a los límites recomendados, constituyendo un desafío urgente para la salud pública y el medio ambiente. Los grupos vulnerables, particularmente poblaciones de bajos recursos, muestran un incremento significativo en enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica (OPS, 2016).

Por otro parte, existe una estrecha relación entre el cambio climático y la contaminación atmosférica, ya que la combustión de combustibles fósiles no solo incrementa el dióxido de carbono (CO_2) sino también otros contaminantes dañinos, lo que genera efectos sinérgicos que agravan la crisis ambiental y sanitaria (IPCC,2023).

La creciente urbanización y expansión industrial en Colombia y Latinoamérica han exacerbado la concentración de contaminantes en zonas metropolitanas, afectando la

salud, la calidad de vida, productividad laboral y generando costos sociales asociados a la atención médica y pérdidas económicas. Las soluciones tradicionales hasta ahora implementadas presentan limitaciones para atender la complejidad del problema, lo que evidencia la necesidad de nuevas acciones y enfoques para mitigar la contaminación del aire.

5. Justificación.

Actualmente, la contaminación del aire representa una de las problemáticas más importantes a nivel mundial, afectando gravemente la salud humana y el bienestar ambiental. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 90% de la población mundial respira aire contaminado, y se estima que alrededor de 7 millones de muertes prematuras al año son causadas por esta problemática. Por ello, resulta urgente desarrollar tecnologías que contribuyan a la descontaminación del aire, tanto en sectores urbanos como industriales.

La tecnología para descontaminar el aire ha avanzado notablemente, desde dispositivos pequeños y domésticos que eliminan partículas finas,olores, compuestos volátiles, bacterias, hongos y virus, hasta estructuras de gran escala como las “Smog Free Tower” instaladas en Países Bajos y China, capaces de purificar hasta 30,000 m^3 de aire. Sin embargo, muchas de estas tecnologías carecen de sistemas integrados de monitoreo que optimicen las condiciones ambientales y las variables claves del proceso.

En la búsqueda de ciudades sostenibles, las microalgas juegan un rol fundamental debido a su impacto ambiental positivo. Su capacidad para realizar fotosíntesis de forma eficiente les permite captar dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV), liberando oxígeno y requiriendo pocos recursos para su cultivo (Torres Velazco, 2024).

El monitoreo en tiempo real es esencial para obtener datos primarios que reflejen el impacto ambiental real de los sistemas de descontaminación basados en microalgas. Proyectos en Bogotá como ZUMA (Zonas Urbanas por un Mejor Aire) implementan

acciones como plantación de árboles, pavimentación de vías y promoción de tecnologías limpias en el transporte público, pero no cuentan con procesos de monitoreo posteriores para medir su verdadera efectividad (SDA, 2025).

Por otra parte, la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) se limita a registrar datos sin intervenir activamente para mejorar la calidad del aire (SDA, s.f.). Con solo 20 estaciones en la ciudad, muchas áreas quedan sin cobertura específica, lo que representa una oportunidad para generar valor y aportar datos de calidad que beneficien a la sociedad.

Estas acciones se enmarcan en el Plan Aire 2030, que busca alinear a Bogotá con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el *ODS 3. Salud y Bienestar* y el *ODS 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles.* (SDA, 2021). Esto demuestra que el interés por un aire limpio es un compromiso público, y proyectos como el que aquí se propone contribuyen a estas metas, beneficiando a comunidades afectadas por agentes contaminantes como el dióxido de carbono (CO2) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) presentes en el aire.

Este proyecto plantea el desarrollo de un fotobiorreactor inteligente monitoreado, que permita hacer seguimiento a las condiciones internas del cultivo mediante sensores conectados a una plataforma de visualización y alertas. Esto facilita reunir información necesaria para optimizar la eficiencia del sistema, evaluar su impacto en la calidad del aire y generar datos que sirvan para futuras investigaciones.

De esta manera, el proyecto aporta a la mejora de la calidad de vida comunitaria mediante reducción de agentes contaminantes del aire, principalmente dióxido de

carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV), complementando con un monitoreo continuo que proporciona datos valiosos para informar a la sociedad sobre el estado ambiental y las posibles vías de mejora en la zona.

6. Marco Teórico

6.1 La Biotecnología

La biotecnología es la rama de la ciencia que se dedica a utilizar organismos vivos, sistemas biológicos o derivados de estos para crear, modificar o mejorar productos que beneficien al ser humano y al medio ambiente. Esta área multidisciplinaria implementa conocimientos y procesos de áreas como la química, la medicina, la biología, la ingeniería y la genética, para aplicar estos procesos en la vida diaria y solucionar problemas, industriales, agrícolas, médicos y ambientales (Wikipedia, 2003; IQS, 2024; FUSADES, 2020; Iberdrola, 2021)..

La importancia de esta rama de la ciencia radica en la capacidad de ofrecer soluciones innovadoras que contribuyen a las mejoras de la salud, el cuidado del planeta y aumentar la productividad en las ramas industriales, todo esto mientras se hace uso responsable y sostenible de los recursos biológicos que existen (Repsol, 2023; AseBio, 2024; Anales RANM, 2020)..

Esta área tiene una amplia y larga historia que se vincula a procesos ancestrales como la fermentación para la elaboración de bebidas o alimentos, pero hasta el día de hoy los avances en la ingeniería genética y la tecnología moderna nos permiten obtener aplicaciones más precisas y eficientes en los diferentes sectores ya mencionados (UNAM, 2024; Porqué Biotecnología, s.f.; Argentine Biotechnology Network, 2024)..

6.2 Definición de un biorreactor

Un biorreactor es un dispositivo diseñado para permitir el crecimiento de microorganismos y células vivas, todo en un entorno controlado, realizando actividades como fermentación o el cultivo celular. Son utilizados para producir, enzimas, vitaminas, medicamentos, entre otros. Para generar un ambiente óptimo es necesario regular diferentes aspectos, como el oxígeno, el agua, PH, nutrientes y la temperatura interna del reactor, permitiendo a los microorganismo que están ejecutando sus procesos biológicos puedan hacerlo enfocándose solamente en eso. (Regonesi, 2023)

Los biorreactores, se conforman de una puerta de entrada, por donde ingresan los nutrientes necesarios para permitir un proceso correcto; una entrada de aire, necesario para completar los procesos de los microorganismos presentes; la salida del biorreactor, que se abre para permitir extraer la biomasa resultante del crecimiento, este proceso debe ser certero, entendiendo que se debe mantener la relación de nutrientes, aire y microorganismos estable para los procesos correctos; el sistema debe mantenerse a una temperatura estandarizada, por lo que se hace uso de un sistema de aislamiento de temperatura; para poder brindar estas condiciones, es útil conocer el estado de las variables, por eso es indispensable un sistema de monitoreo funcional, que registre y envíe datos de interés en tiempo real (Microbenotes, 2025; Facellitate, 2024; Tecnal, 2015)..

Los biorreactores de microalgas además de producir la biomasa, son aprovechables por su cualidad fotosintética, pues transforman el dióxido de carbono en oxígeno, alimentándose del carbón para ese proceso. Las microalgas son responsables de la producción de al menos el 50% del oxígeno de la tierra, esto da cuenta de su gran importancia y aprovechamiento; los reactores de microalgas permiten utilizar estos

microorganismos en entornos cerrados (Valenciano, 2023). Así pues, es posible hacer uso de estos en entornos hogareños, purificar el aire y dar mejor calidad de vida, e incluso hacer uso de los beneficios nutricionales de la biomasa resultante. Para esto es necesario mantener condiciones adecuadas dentro del biorreactor, es por ello que un sistema de monitoreo y control es importante, pues en condiciones ideales, el crecimiento de las algas será mejor y la producción del biorreactor será por lo tanto mayor. Es posible hacer modelos caseros, teniendo cuidado en la construcción y en garantizar un buen ambiente. (Polo, 2025).

Dependiendo de la microalga utilizada es posible obtener diferentes beneficios en cuanto a la biomasa, para esto es importante conocer la especie y sepa qué se utiliza en el biorreactor, siendo que hay ciertos tipos que no son nutricionalmente aprovechables. Además la variación de las variables del entorno permiten producir en mayor medida uno o más nutrientes o enzimas. (Fernandez, 2014).

6.3 Historia de los biorreactores

Para hablar de los biorreactores debemos remontarnos a una época entre los 2000 y los 3000 a.C. cuando los griegos y romanos usaban las ollas de barro para crear ambientes anaeróbicos controlados para realizar procesos de fermentación del vino, vinagre y la cerveza (Palladino, 2024; Timetoast, s.f.; Wikipedia, 2005).

En la década de 1900 se cultivaron microorganismos en condiciones aeróbicas para producir metabolitos. De esta manera nacen los biorreactores aeróbicos. Lograr las condiciones necesarias para lograr estos procesos representaba sus retos, pues mantener la cantidad de mezclas y aireación necesaria necesitaba de indumentaria más compleja (Palladino, 2024; Timetoast, s.f.; Facellitate, 2024; Microbenotes, 2025)..

Mientras se reconocía la importancia de condiciones libres de microorganismos y contaminación, Strauch y Schmidt patentaron un sistema en el que introducen tubos con agua y vapores para la esterilización (Getinge, 2023; FFCP, s.f.).

Debido a la segunda guerra mundial se generó una gran demanda de medicamentos, lo que llevó al rápido desarrollo del biorreactor. El enfoque se centraba en desarrollar un reactor de mayor tamaño y eficiencia, ya que al ser de mayor tamaño permitía producir mayor cantidad de medicamentos en una sola pasada (Palladino, 2024; Timetoast, s.f.; Studocu, 2024).

En 1994, De Beeze y Liebmann utilizaron un fermentador de 20 litros para la producción de levadura. Este consistía de un tanque cilíndrico con tuberías que conducían aire perforando el tanque. Posteriormente se implementaron impulsores que aumentaban la velocidad de la mezcla y dispersaban las burbujas de aire, aumentando así la eficiencia de la aireación (Timetoast, s.f.; Slideshare, 2022).

Gracias a la rápida innovación, entre 1950 y 1960, se disponía de los primeros fermentadores comerciales, no solo de uno sino de varios recipientes. Además, se introdujo un fermentador de planta piloto de 40 litros (Palladino, 2024; Timetoast, s.f.; Studocu, 2024).

Posteriormente en 1970 el éxito de la tecnología de recombinación genética marcó el comienzo de la biotecnología moderna. En 1878, investigadores de Genetech introdujeron un fragmento de ADN humano en una cepa de E. Coli. Luego, en 1982, la insulina llegó al mercado con el nombre de Humulin (ASEBIO, 2025).

Hasta 1990, los biorreactores se construían específicamente para el cultivo de bacterias. Después, se comenzó a usar para el cultivo de células de mamíferos, luego para el de insectos y algas (ASEBIO, 2025).

En 2002, se desarrolló un método de producción para la vacuna contra la rabia, esto implementando un biorreactor de 30 litros, el cual produjo un millón de dosis de la vacuna. De esta manera se demostró la importancia y el impacto que los biorreactores tenían en el mundo (ASEBIO, 2025).

Actualmente se está popularizando el uso de biorreactores desechables debido a su facilidad de uso y la implementación de monitoreo en línea y los dispositivos de muestreo automático (ASEBIO, 2025).

6.4 Tipos de biorreactor

Los biorreactores son equipos importantes en la industria, existen diversos tipos que se adaptan a los diversos usos. Sin embargo, es importante conocer las ventajas y desventajas que también tienen cada uno de estos para usarlos de manera correcta.

- ***Biorreactores de tanque agitado:*** Se caracterizan por los agitadores que contienen dentro del tanque, lo que permite la agitación constante de la mezcla. Estos tienen una amplia gama de usos, desde la fermentación de compuestos para el uso farmacéutico y alimenticio, hasta la producción de productos químicos. Con estos se tiene un control más preciso de las condiciones de reacción, pero pueden presentar desafíos por el consumo energético y la homogeneidad de la mezcla (Grupo Acura, 2024).

- ***Biorreactores de membrana:*** Estos están diseñados con una membrana semipermeable que permite la separación y concentración de los productos que se desean producir. Es especialmente útil en aplicaciones de separación en la industria alimentaria y química. Con este se puede obtener productos puros y se pueden recuperar productos valiosos. Sin embargo, sus dificultades radican en la posible obstrucción de las membranas, lo cual requiere mantenimiento constante a estos (Grupo Acura, 2024).
- ***Biorreactores de lecho fijo:*** Estos son especialmente buenos para el crecimiento de microorganismos. La operación de estos requiere sustratos por medio de partículas sólidas, estos permiten la interacción de microorganismos movilizados. Se utilizan para la producción de enzimas y el tratamiento de aguas residuales. Estos tienen buena estabilidad en el sistema, pero están limitados en la transferencia de masa (Grupo Acura, 2024).
- ***Biorreactores de lecho fluidizado:*** Estos funcionan mediante el flujo de gas o líquido por medio de partículas sólidas. Estos se aplican en la biotecnología y química. Estos tienen una gran ventaja en cuanto a la transferencia de masa, lo que permite una reacción eficiente. Se debe tener en cuenta la selección del tamaño de la partícula adecuada y la densidad del lecho (Grupo Acura, 2024).
- ***Biorreactores anaerobios*:** Estos son importantes en el tratamiento de aguas residuales y la producción de biogás. Estos funcionan con la ausencia de oxígeno y descomponen la materia orgánica. Son sensibles a las fluctuaciones en su alimentación y debido a esto, pueden crear subproductos no deseados (Grupo Acura, 2024).

6.5 Usos

Los biorreactores son utilizados principalmente para la obtención de nutrientes, vitaminas o enzimas a partir de la biomasa; el conjunto de materia orgánica, producto de procesos de transformación física, provienen de elementos animales y vegetales, lo que significa una gran variedad de elementos que son aprovechables. La biomasa se utiliza principalmente para la producción de combustibles ecológicos; sin embargo, un uso importante de la biomasa que proviene de las microalgas es la obtención de elementos que son de grán beneficio para la alimentación humana; recursos como probióticos, vitaminas, o enzimas; esto es aprovechable para la reducción de brechas de hambre, con la ventaja de que no compite por el uso del suelo (Tecnal, s.f.).

6.6 Principios de uso

El uso de un fotobiorreactor se basa en la creación de un ambiente controlado que permite el crecimiento de microorganismos fotosintéticos, mediante la exposición de luz y el suministro de nutrientes necesarios (BBVA, 2024).

Los fotobiorreactores son sistemas cerrados que permiten mantener las condiciones del medio de crecimiento controladas, parámetros como la temperatura, el pH, suministro de CO2, niveles de oxígeno y concentración de nutrientes, son algunas de las condiciones que se controlan para optimizar la fotosíntesis de los microorganismos. La principal fuente de energía que impulsa este proceso es la energía, esto se realiza mediante superficies transparentes que permiten el paso de la luz o sistemas luminosos que se encuentren dentro del sistema aislado (BBVA, 2024).

El diseño del fotobiorreactor está orientado a maximizar la disponibilidad de luz que se maneja en el ambiente controlado, el objetivo es permitir el paso de la luz para evitar las exposiciones prolongadas a periodos de luz, lo que permite aumentar la eficiencia de la fotosíntesis y de la producción de biomasa (BBVA, 2024).

El sistema de circulación de aire permite mantener en constante movimiento el CO2 que se ingresa al sistema y expulsa el oxígeno que se produce durante la reacción, esto evita la inhibición de las células por acumulación, todo esto se realiza mediante circulación interna de bombas, paletas o impulsos neumáticos (BBVA, 2024).

Al ser un sistema cerrado, permite el control y monitoreo de los parámetros que se necesitan para mantener el cultivo y aumentar la eficiencia. Esto permite generar biomasa y productos de alto valor en tiempos menores que sistemas abiertos (BBVA, 2024).

6.7 Control ambiental

En los fotobiorreactores el control ambiental y el monitoreo es de vital importancia, mantener las condiciones adecuadas del cultivo puede hacer la diferencia entre la producción de biomasa, oxígeno y otros productos de interés para los que esté destinado el sistema (Fernández et al., 2022).

En estos sistemas, el ambiente se debe regular de manera precisa. Se conocen y controlan variables como la temperatura, el pH, los nutrientes y sobre todo la iluminación. Controlar estos datos ayuda a evitar fluctuaciones innecesarias en el sistema y ayuda a tener un sistema más preciso, favoreciendo el proceso de fotosíntesis. Además, al ser un sistema cerrado, se reduce la evaporación, la contaminación y la fuga de gases (Fernández et al., 2022).

Sensores conectados a sistemas de adquisición de datos permiten obtener información en tiempo real de las condiciones del sistema, de esta manera se puede ajustar de forma automática o manual la condiciones, ayudando a reducir los fallos, y permitiendo obtener datos del estado del microorganismo que se quiere cultivar (Fernández et al., 2022).

6.8 Aplicaciones y Usos de los fotobiorreactores

Las aplicaciones y usos de los fotobiorreactores son amplias y diversas, se destacan el cultivo controlado y eficiente de microorganismos fotosintéticos con múltiples fines industriales, ambientales y biotecnológicos.

- ***Producción de biomasa y compuestos de alto valor:*** Los fotobiorreactores permiten cultivar microalgas de alta calidad, al ser sistemas cerrados, permiten que el microorganismo se reproduzca libre de contaminación, permitiendo la producción de biomasa rica en proteínas, vitaminas y pigmentos naturales. Estos productos son usados como complementos alimenticios, farmacéuticos, cosméticos y colorantes naturales (Grupo Acura, 2024).
- ***Producción de biocombustibles:*** Se utilizan en la producción de biocombustibles a partir de lípidos extraídos de las microalgas, contribuyen a reducir la dependencia a los combustibles fósiles y las emisiones de efecto invernadero. La gran calidad y la alta productividad que ofrecen estos sistemas vuelven de este proceso uno de los más viables (Grupo Acura, 2024).
- ***Tratamiento y biorremediación ambiental:*** Los fotobiorreactores integran microorganismos en sistemas como los de membrana que permiten eliminar nutrientes y

contaminantes en las aguas residuales, contribuyendo a la depuración de la misma y a la captura de CO_2 mediante la fotosíntesis (Grupo Acura, 2024).

- ***Investigación y desarrollo biotecnológico:*** Estos sistemas son escenciales en el estudio y entendimiento de los procesos de metabolismo de microorganismos fotosintéticos, en la optimización de condiciones del cultivo, el desarrollo de nuevos productos y en la exploración de nuevos descubrimientos biotecnológicos (Grupo Acura, 2024).

En resumen, los fotobiorreactores son herramientas versátiles, con aplicaciones claves en diferentes ramas de la ciencia, representando tecnologías sostenibles para la producción y el aprovechamiento de recursos biológicos (Grupo Acura, 2024).

7. Análisis de Requerimientos

El desarrollo del proyecto presenta una serie de requerimientos de materiales que son importantes conocer para la construcción del modelo del fotobiorreactor y el sistema de monitoreo de variables.

7.1 PCB

En cualquier montaje electrónico es necesario tener una placa PCB, un circuito de placa impresa, para alojar todos los componentes que se usan, tener una ruta de conexiones y poder identificar fallas en la conexión de sensores; además, permite el transporte del sistema de manera segura.

7.2 Sensor de pH

Para conocer los niveles de pH en el fotobiorreactor es necesario un sensor de pH. Para el proyecto se postula utilizar un sensor Ph-4502c, este es un medidor de pH con una solución buffer incluida, que permite calibrar el sensor con una buena calidad.

7.3 Sensor de CO2

La medición de niveles de CO2 en el ambiente es importante para saber que diferencia de calidad del aire hay antes y después de pasar por el fotobiorreactor. Para el proyecto el sensor a utilizar es Cjmcu-811, que detecta la calidad del aire en el ambiente, y calcula el dióxido de carbono equivalente en el aire.

7.4 Sensor de temperatura

Otra variable importante en el crecimiento de las microalgas es la temperatura, que afecta directamente a los microorganismos del sistema. Para el proyecto se hace uso del Sensor DHT-11, que arroja el dato de temperatura en el ambiente.

7.5 Sensor de humedad ambiental

La humedad ambiental también es un factor de interés, pues permite conocer el estado del ambiente para la producción de biomasa y crecimiento de microalgas. Para este apartado también se hace uso del sensor DHT-11, que da información sobre la humedad relativa en el entorno.

7.6 Microcontrolador

Para el procesamiento, recolección y envío de datos se plantea utilizar un microcontrolador ESP32, aprovechando su capacidad de comunicación con los sensores, y la conectividad a internet que ofrece, permitiendo enviar datos a una página web.

7.7 Cultivo de microalgas

El elemento principal del fotobiorreactor son las microalgas, quienes se encargan de hacer el proceso de fotosíntesis, consumen el carbono y liberan oxígeno al ambiente. El cultivo y cuidado de estos microorganismos es crucial para el desarrollo del proyecto.

7.8 Computador con software de programación

Para la configuración de la sensorización se requiere un computador que permita programar la placa ESP32 con el software Arduino IDE.

8. Análisis de Restricciones

El proyecto puede presentar diferentes restricciones, para ello es necesario conocer los riesgos que puede tener el proyecto, y así poder minimizar, costos, tiempo o impacto social. Para ello, se postula un análisis PESTEL, identificando los factores principales.

8.1 Político

El análisis político se realiza en relación a la legislación colombiana. En este campo se encuentra que, el gobierno colombiano promueve el uso de Fuentes de Energía No Convencionales, entre los cuales se encuentra la biomasa, según la Ley 2036 de 2020. (Función Pública, 2020). El proyecto puede dar pie a un sistema de generación en zonas rurales, siendo hábil para optar por financiamiento público.

8.2 Económico

El proyecto requiere la adquisición de sensores que pueden suponer un costo elevado, por lo que el aporte económico puede ser significativo. Sin embargo, estos costos caen en un presupuesto aceptado y los gastos son justificados para el desarrollo del fotobiorreactor. En proyectos de biorreactores más avanzados se puede llegar a percibir ganancia, dado el aprovechamiento de la biomasa.

8.3 Social

El principal beneficio social del proyecto es la purificación del agua, siendo esto de gran importancia para la reducción de enfermedades respiratorias derivados de la alta concentración de dióxido de carbono. Sumado a esto, el biorreactor es de grán valor educacional, pues permite

dar conocimiento y proximidad a estas tecnologías limpias. Evidentemente, el aprovechamiento de biomasa tanto como combustible como base de suplementación alimentaria es de grán impacto social. (Amariles, 2025).

8.4 Tecnológico

En el aspecto tecnológico se tiene el mayor reto para el proyecto, pues se debe tener un sistema de monitoreo confiable y que arroje datos de interés para el correcto funcionamiento del fotobiorreactor. En este aspecto es importante tener un sistema con conectividad a internet, que incluya sensores especializados para la obtención de información, y una página web que muestre los datos recolectados.

8.5 Ambiental

El impacto ambiental del proyecto es positivo, dado el enfoque principal del proyecto, que es limpiar el aire del entorno, aprovechando las facultades fototróficas de las microalgas. Por ello es de grán importancia en zonas urbanas y altamente concurridas. Además la producción de combustible limpio genera un efecto positivo en el medio ambiente, reduciendo la huella de carbono.

8.6 Legal

En Colombia hay un vacío de regulaciones y legislación específica sobre la construcción y uso de fotobiorreactores, por lo cual no hay posibilidad de acogerse a una ley puntual. Sin embargo, es importante cumplir normativas de sanidad y gestión de residuos, de manera que no se infrinjan leyes afines, como el decreto 2811 de 1974, que vela por el cuidado de parques naturales y el decreto 4741 de 2005 que estipula la normativa de gestión de residuos biológicos.

9. Metodología

El desarrollo del fotobiorreactor inteligente a base de microalgas se realizará en el laboratorio siguiendo un protocolo estructurado que integre la construcción del sistema, la preparación y manejo del cultivo y el monitoreo continuo de la variables necesarias para cumplir con los objetivos específicos planteados, aprovechando los recursos señalados en el análisis de requerimientos.

9.1 Construcción y montaje del fotobiorreactor

Se seleccionará un recipiente de cultivo transparente, como un matraz Erlenmeyer de 1 litro o una botella de vidrio con tapa perforada, los cuales serán esterilizados junto con los tubos de silicona, el imán para la agitación magnetica y demás componentes de desinfección química con estaño al 70%.

El reactor se montará instalando pasamuros en la tapa para la entrada de aire y cables de sensores, acomodando el imán en el fondo para garantizar la adecuada aireación y mezcla del cultivo, y conectando una línea de salida de gases.

9.2 Integración y calibración de sensores y sistemas de control

Se instalarán y calibrarán los siguientes sensores para la medición continua de variables ambientales y de cultivo:

- Sensor de pH (pH-4502c), para controlar la acidez del medio.
- Sensor de CO2 Css811 Cjmcu-81(rango 0-5000 ppm), para medir la concentración de dióxido de carbono (CO2) y VOC en la salida del reactor.
- Sensor de temperatura Ds18b20 para rangos en grado Celsius.

Estos sensores se integran a un microcontrolador ESP32, programado para la recolección, procesamiento y transmisión de datos hacia una plataforma web para la visualización, almacenamiento y generación de alertas, permitiendo así el monitoreo remoto en tiempo real.

9.3 Preparación del medio y cultivo de microalgas

Se prepara el medio de cultivo apropiado según la especie seleccionada, empleando agua destilada y soluciones madre, para luego esterilizar el conjunto bajo condiciones asépticas.

Una vez montado y esterilizado el fotobiorreactor, se inocula un volumen de inóculo equivalente al 5-10% del volumen total, proveniente de cultivos en fase exponencial, asegurando la viabilidad y salud del microorganismo utilizado.

Parámetros iniciales tales como temperatura (20-28ºC) y flujo de aire (0.05-0.3vvm) serán configurados para optimizar el crecimiento algal.

9.4 Operación y monitoreo del sistema

El funcionamiento del fotobiorreactor incluirá monitoreo continuo de las variables claves (pH, temperatura, dióxido de carbono (CO2), compuestos orgánicos volátiles (COV)y oxígeno disuelto) con registros automatizados cada una a 5 minutos.

Se implementará un control automático mediante el microcontrolador para ajustar el flujo del aire, en función de las condiciones del cultivo y del ambiente, buscando maximizar el rendimiento fotosintético y evitar condiciones desfavorables como fotoinhibición o excesivo calentamiento.

9.5 Evaluación experimental del desempeño

Se establecen líneas base midiendo las concentraciones de dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en el aire ambiente.

Posteriormente, se realizan ensayos con el cultivo para registrar y analizar la reducción de contaminantes en la entrada y salida del reactor.

9.6 Muestreos complementarios y análisis de datos

Los datos recopilados serán analizados estadísticamente para validar la eficacia del fotobiorreactor en la captura del dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV), así como para optimizar condiciones y contribuir a futuros desarrollos científicos.

10. Análisis financiero

10.1 Gastos fijos

Tabla 1. Relación de gastos fijos.

Item	Unidades	Precio
Cepa Micro alga Chlorella	1	$ 89.900
Sensor Dioxido de carbono y VOC	1	$ 56.000
Sensor de temperatura Ds18b20	1	$ 11.000
Vaquela virgen lisa	1	$ 4.500
Microcontrolador (ESP32)	1	$ 30.000
Sensor de pH	1	$ 110.000

Fuente: Elaboración Propia.

10.2 Gastos variables

Tabla 2. muestra el total de los gastos variables.

Concepto	Cantidad	Precio unitario (COP)	Gasto total (COP)
Reposición sensores	5	9.000	45.000
Mantenimiento	-	30.000	30.000
Insumo y otros costos	-	37.254	37.254
Total gastos variables	-		112.254

Fuente: Elaboración Propia.

10.3 presentación datos financieros

Tabla 3. muestra el resumen de ingresos, gastos, flujo neto y VPN del proyecto.

Concepto	Valor (COP)	Explicación
Ingresos anuales	200.000	Estimación de ingresos por beneficios obtenidos
Gastos anuales	112.254	Costo variable anual incluyendo mantenimiento y reposición de sensores
Gasto fijo / inversión inicial	461.271	Costos iniciales de sensores, microcontrolador, etc
Flujo neto anual	87.746	Diferencia entre ingresos y gastos anuales
VPN	-167.150	Suma de flujos descontados al valor presente con tasa del 15%
Punto de equilibrio	> 5 años	Tiempo en el que el flujo neto años positivo.

Fuente: Elaboración Propia.

11. Resultados

11.1 Prototipo inteligente a pequeña escala.

El desarrollo del prototipo de fotobiorreactor inteligente se realizó con éxito mediante la integración de microalgas chlorella vulgaris, sensores especializados para monitorear variables ambientales y un sistema de control automatizado basado en un microcontrolador ESP32. El sistema permitió la captura y reducción efectiva de dióxido de carbono (CO2) y compuestos orgánicos volátiles (COV) bajo condiciones controladas, evidenciando el potencial del fotobiorreactor para mejorar la calidad del aire en entornos interiores.

11.2 Cultivo y manejo de microalgas.

Se seleccionó la cepa chlorella vulgaris por su capacidad reconocida para realizar la fotosíntesis eficiente y su resistencia a las condiciones experimentales planteadas. La preparación y esterilización del medio BG-11 permitió establecer un ambiente óptimo para el cultivo, con parámetros tales como, pH y temperatura cuidadosamente ajustados para maximizar la captura de CO2 y COV. El cultivo se mantuvo en fase exponencial durante los periodos establecidos, garantizando una masa activa capaz de realizar la función descontaminante esperada.

11.3 Construcción y configuración del prototipo.

El montaje del prototipo incluye el diseño y fabricación de la placa electrónica integrada con sensores de CO2, pH, temperatura y calidad del aire, garantizando la captura continua de datos. El sistema de monitoreo en tiempo real permite visualizar y registrar las variables críticas del proceso mediante una plataforma web y registros en tarjeta SD. La implementación de controles automáticos de aireación mostró un adecuado mantenimiento de condiciones óptimas para el cultivo, contribuyendo a la eficiencia del fotobiorreactor.

11.4 Sistema de medición de variables.

El prototipo desarrollado para la medición de las variables de interés es una integración de diferentes sensores con un microcontrolador ESP-32 WROOM-DA-MODULE. Estos sensores serían los responsables de medir variables de temperatura, dióxido de carbono y pH; a partir de los siguientes sensores.

- ***Sensor de CO2 y TVOC, Css811 Cjmcu-81:*** Este sensor se encarga de captar el dióxido de carbono en partes por millón (ppm) y los compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC) en partes por billón (ppb). Se comunica mediante I2C (Inter-Integrated Circuit) y permite enviar los datos a la placa, y dar a conocer estas dos variables.
- ***Sensor de temperatura, Ds18b20 sumergible:*** Este sensor se encarga de medir la temperatura dentro del fotobiorreactor, este modelo permite que el sensor esté en contacto con el cultivo de microalgas, dando datos del mismo y no solamente del ambiente. El sensor arroja valores en la escala de grados Celsius y en la escala de grados Fahrenheit.
- ***Sensor de pH, Ph-4502c:*** Este sensor permite medir el pH de una solución y comunicar los datos mediante una entrada BNC, a un módulo que se comunica con la ESP-32 por medio de un pin Análogo. El sensor mide los valores en un rango del 0-14 según la escala del pH.
- ***Módulo SD SPI:*** Para la toma de datos se hace uso de una tarjeta SD, con la finalidad de tener un registro en tiempo real de los datos. Mediante librerías se escriben los datos en la SD, en un documento CSV, permitiendo su posterior análisis.

11.4.1 Código de la ESP-32

```
#include "Adafruit_CCS811.h"
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>


/*
Ph 3.3V - 27 - Po
CO2 3.3V - I2C - V,Gnd,SCL,SDA,WAK(gnd)
Temperatura 3.3V - 4 - Amarillo


SDA 21
SCL 22
*/


// Determinaciones de los sensores
Adafruit_CCS811 ccs;
const int oneWireBus = 4;
OneWire oneWire(oneWireBus);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
const int chipSelect = 5;


// Conexión Wifi
```

```
const char* ssid = "SAL";

const char* password = "800195Sal-";


// Determinar variables

float ppm;

float TVOC;

int pH_Value;

float Voltage;

float temperatureC;

float temperatureF;




void setup()

{

  Serial.begin(115200);

  pinMode(pH_Value, INPUT);

  ccs.begin();

  sensors.begin();


  WiFi.begin(ssid, password);

  unsigned long startAttemptTime = millis();


  // Esperar máximo 10 segundos por conexión

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - startAttemptTime <
10000) {

    delay(1000);

    Serial.println("Conectando a WiFi...");
```

```
  }


  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.println("Conectado a WiFi!");
  } else {
    Serial.println("No se pudo conectar a WiFi. Continuando sin
conexión.");
  }


  Serial.println("Inicializando tarjeta SD...");
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Error al inicializar la tarjeta SD");
    return;
  }
  Serial.println("Tarjeta SD inicializada correctamente");


  File dataFile = SD.open("/datos_proyecto.csv", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {


      dataFile.println("Tiempo,pH,ppm,TVOC,temperatura");


    dataFile.close();
    Serial.println("Encabezado escrito en datos.csv");
  } else {
    Serial.println("No se pudo abrir datos.csv");
  }
}
```

```
void loop()
{
  int chipID = 1;

  // pH
  pH_Value = analogRead(27);
  Voltage = pH_Value * (3.3 / 4095.0);

  // CO2
  if(ccs.available()){
    if(!ccs.readData()){
      ppm = ccs.geteCO2();
      TVOC = ccs.getTVOC();
    } else {
      Serial.println("ERROR al leer CO2!");
    }
  }

  // Temperatura
  sensors.requestTemperatures();
  temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0);
  temperatureF = sensors.getTempFByIndex(0);

  // Envío por WiFi si está conectado
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
```

```
    String url =
"http://10.234.236.138/Proyecto_de_grado/PHP/datos.php?voltage=" +
String(Voltage) +
                  "&ppm=" + String(ppm) + "&tvoc=" + String(TVOC) +
"&temperatura=" + String(temperatureC) +
                  "&chipID=" + String(chipID);
    http.begin(url);
    int httpCode = http.GET();

    if (httpCode > 0) {
      String respuesta = http.getString();
      Serial.println("Respuesta del servidor: " + respuesta);
    } else {
      Serial.println("Error en la solicitud HTTP");
    }

    http.end();
  } else {
    Serial.println("Sin conexión WiFi. Datos no enviados.");
  }

  // Guardar en SD siempre
  File dataFile = SD.open("/datos_proyecto.csv", FILE_APPEND);
if (dataFile) {
  dataFile.print(millis()); dataFile.print(",");
  dataFile.print(Voltage); dataFile.print(",");
  dataFile.print(ppm); dataFile.print(",");
  dataFile.print(TVOC); dataFile.print(",");
```

```
  dataFile.println(temperatureC);
  dataFile.close();
  Serial.println("Fila escrita en datos_proyecto.csv");
} else {
  Serial.println("No se pudo abrir datos.csv");
}



  // Imprimir en consola
  Serial.print("pH: "); Serial.println(Voltage);
  Serial.print(temperatureC); Serial.println("°C");
  Serial.print(temperatureF); Serial.println("°F");
  Serial.print("CO2: "); Serial.print(ppm); Serial.print(" ppm, TVOC: ");
Serial.println(TVOC);
  Serial.println(" ");


  delay(5000);
}
```

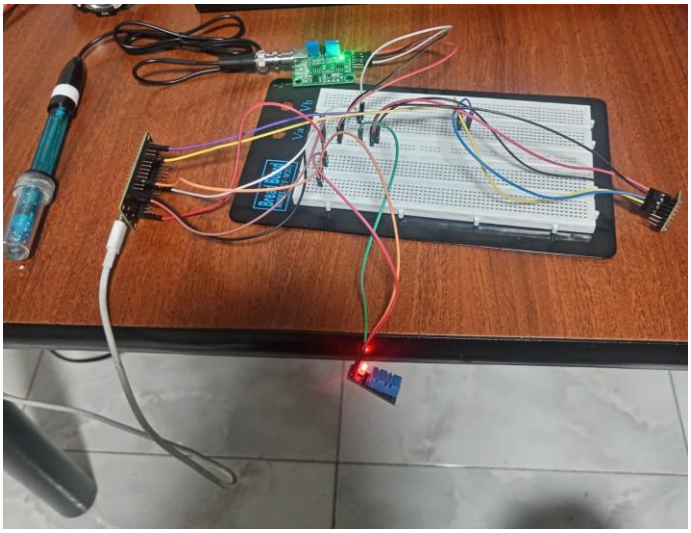
El código toma datos de los sensores cada 5 segundos, permitiendo recibir la mayor cantidad de información proveniente de los sensores. A su vez, los datos se almacenan en una tarjeta SD para tener registro histórico de la medición. Sin embargo, este diseño presenta el reto, que con cada reinicio de la placa, la información de la SD se resetea, por lo que hay que tener cuidado de no desenergizar el prototipo para evitar perder datos en el proceso; además, es importante reiniciar la placa cuando se reinserte para que pueda tomar nuevos datos.

Imagen 1. Montaje inicial con sensores de pH y temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 2. Montaje con Sensores de pH, CO2 y temperatura



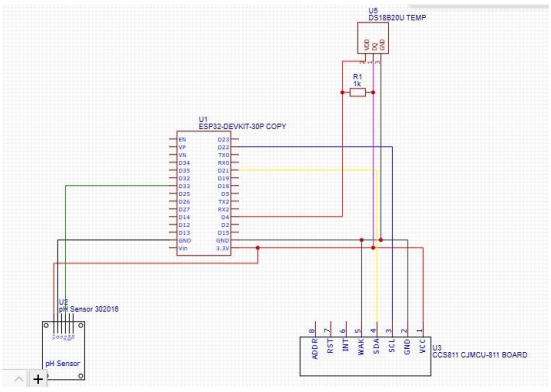
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3. Resultados de los sensores en el monitor serial.

```
Humedad: 41.20% Temperatura: 27.00°C
pH: 3.30
CO2: 414ppm, TVOC: 2

Humedad: 41.10% Temperatura: 26.90°C
pH: 3.30
CO2: 524ppm, TVOC: 18

Humedad: 41.10% Temperatura: 26.90°C
pH: 3.30
CO2: 650ppm, TVOC: 38

Humedad: 41.00% Temperatura: 26.90°C
pH: 3.30
CO2: 611ppm, TVOC: 32

Humedad: 41.00% Temperatura: 26.90°C
pH: 3.30
CO2: 844ppm, TVOC: 67
```

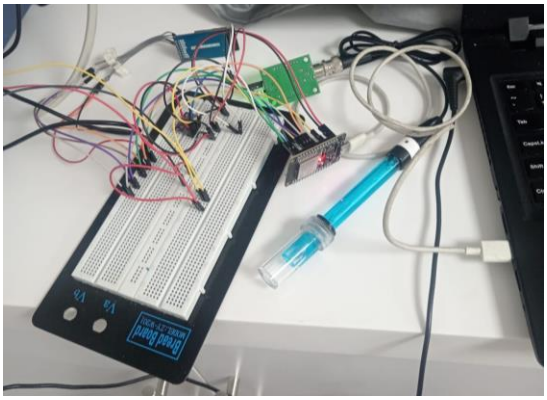
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4. Esquemático con los sensores finales.



Fuente: Elaboración propia.

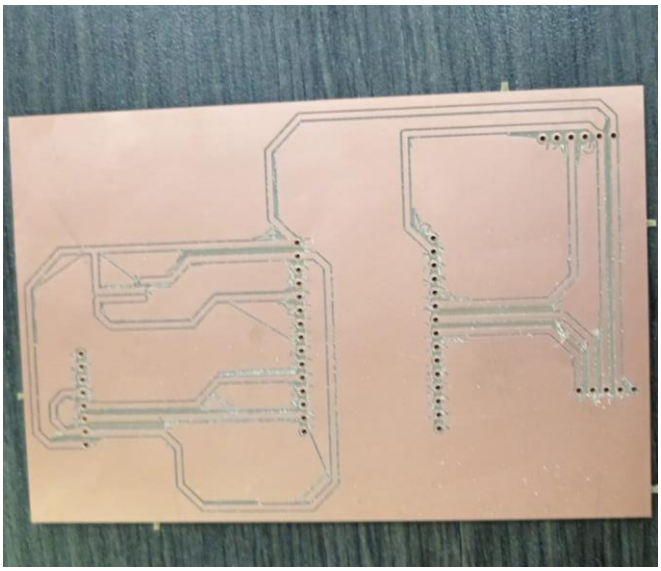
Imagen 5. Montaje con sensores finales.



Fuente: Elaboración propia.

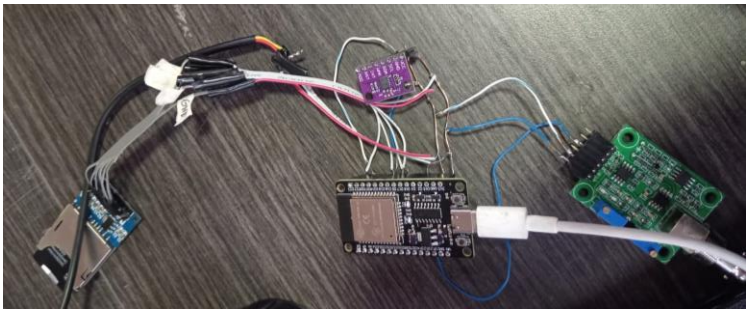
Un elemento importante en los montajes electrónicos es la PCB. La realizada para el proyecto integra los sensores utilizados. Sin embargo, debido a errores de impresión con la ruteadora CNC, y la falta de tiempo para corregirlo, se descarta el uso de esta y se opta por tener soldados los componentes mediante cables UTP.

Imagen 6. PCB.



Fuente: Elaboración propia.

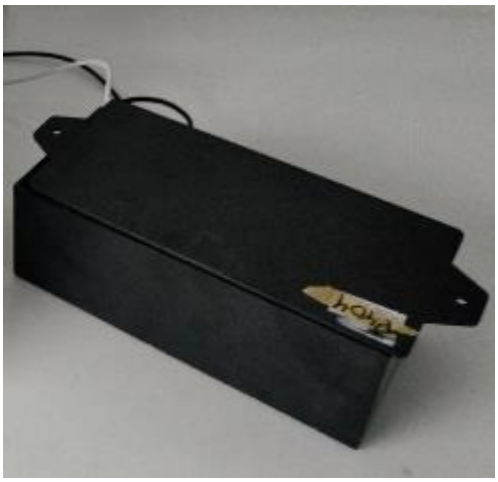
Imagen 7. Montaje final electrónico.



Fuente: Elaboración propia.

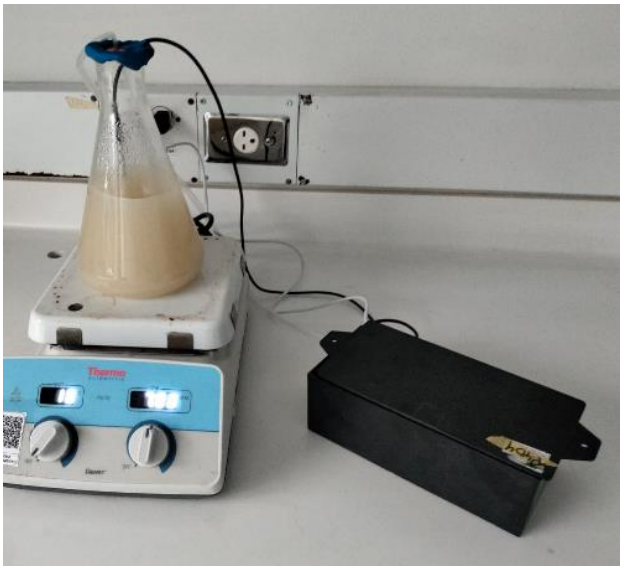
Finalmente, para dar robustez y seguridad al montaje, se incluyó una caja de proyectos que permitiera almacenar el cableado y proteger las partes de posible humedad o salpicaduras en los componentes, evitando daños y permitiendo la lectura constante.

Imagen 8. Caja de proyectos



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 9. Montaje del fotobiorreactor con sensores.

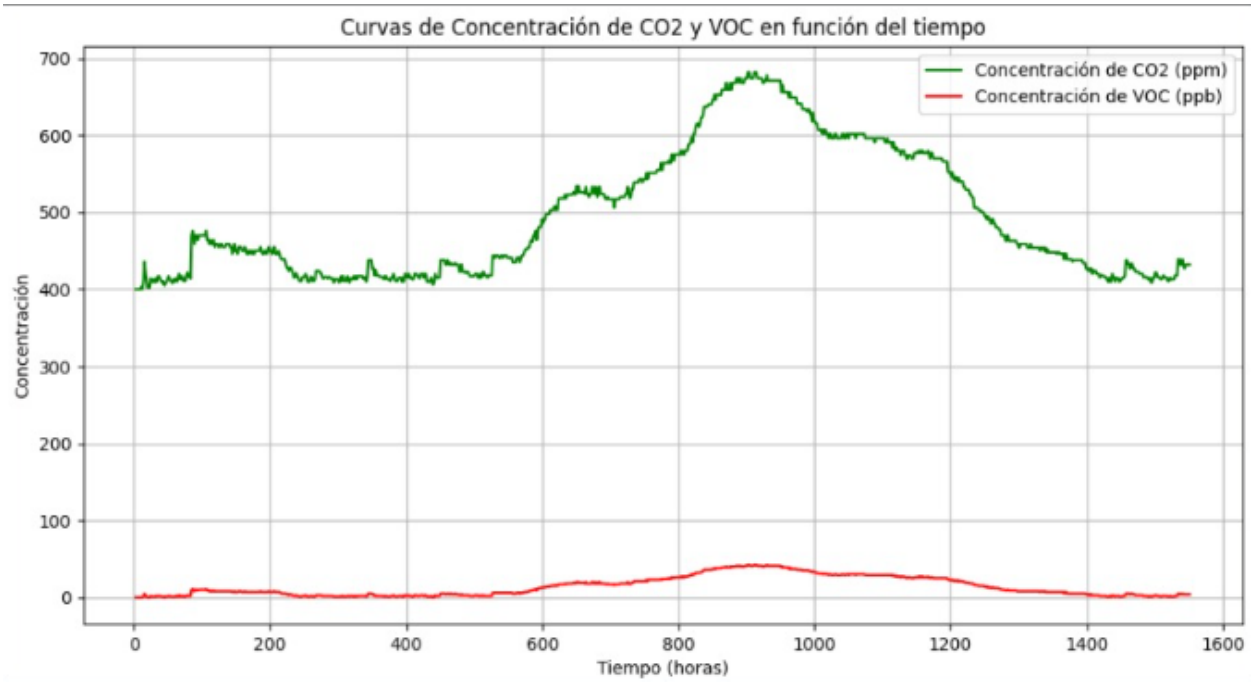


Fuente: Elaboración propia.

12. Análisis de resultados

La evaluación experimental de desempeño del fotobiorreactor consistió en la monitorización de la concentración de CO2 y COV en el aire de entrada y salida del sistema. La estabilidad de parámetros como el pH y temperatura durante el experimento refuerza la efectividad del sistema y su capacidad para mantener un ambiente propicio para la fotosíntesis y purificación del aire.

Gráfica 1. Curvas de concentración de CO2 y VOC en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia

La concentración de CO_2 en la sprimeras 400 horas muestra una estabilidad, indicando que el sistema y el cultivo están en fase de adaptación, luego, se observa un aumento en la hora 900 este comportamiento puede atribuirse a una transición a fase exponencial de microalgas, donde hay una alta actividad metabólica la cual supera transitoriamente la capacidad de captura de CO_2 u otra posible explicación es un incremento en la producción interna de CO_2 relacionado con la descomposición de la materia orgánica o una entrada de contaminante. Posteriormente, empieza a descender paulatinamente, la cual hace referencia a la capacidad fotosintética de captura y transformación del CO_2, alcanzando así su equilibrio.

Con respecto a los COV estos son valores mucho menores, pero, tienen una tendencia similar demostrando que el sistema también puede remover otros contaminantes gaseosos menores, no solamente captura el CO_2, sino que también contribuyen a la reducción de otros contaminantes gracias a sus procesos biológicos y al diseño integrado del fotobiorreactor.

Al tener un pH 7 y temperatura 21°C constante, crea un ambiente estable, eliminando posibles variables que podrían afectar negativamente el metabolismo y crecimiento de las algas. Esto indica que al observar las fluctuaciones en las concentraciones se deben principalmente a la dinámica del cultivo y no al medio.

13. Conclusiones

El proyecto diseñó y validó un prototipo funcional de fotobiorreactor inteligente con Chlorella vulgaris para purificar el aire mediante la captura de CO2 y compuestos orgánicos volátiles. Bajo condiciones controladas de temperatura 21°C y pH 7, el sistema mostró eficiencia y estabilidad en la descontaminación. La dinámica de concentración reflejo fases claras de actividad algal, evidenciando su capacidad fotosintética para limpiar y mejorar múltiples contaminantes del aire. Este prototipo ofrece una solución económica y sostenible para ambientes cerrados, además, representa un avance significativo en biotecnología ambiental para la mitigación de gases de efecto invernadero y contaminantes.

Adicionalmente, el sistema de monitoreo implementado, permitió ver la gran eficiencia del sistema, aportando datos cruciales no solo para el proyecto sino para futuras investigaciones y aplicaciones dentro del campo. Este sistema garantiza la captura de CO2 y compuestos orgánicos volátiles (VOC), conociendo condiciones ambientales óptimas para el cultivo de microalgas.

Se presentan oportunidades de mejora del proyecto, como la integración de un sistema de control de variables de interés; permitiendo tener las variables monitorizadas en un estado ideal sin importar las variaciones del sistema.

Bibliografía.

Nasa (2025). *Dióxido de carbono.* https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111

Communications. (2025). Dióxido de carbono (CO2): qué es y por qué su impacto es preocupante. *BBVA NOTICIAS*. https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-dioxido-de-carbono-co2-y-como-impacta-en-el-planeta/

Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *CO_2 emissions*. Our World In Data. https://ourworldindata.org/co2-emissions

Calidad del aire ambiente. (s. f.). OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente#:~:text=En%20efecto%2C%20el%2036%25%20de,atribuibles%20a%20la%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica

Cambio climático y salud. (2025). OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. https://www.paho.org/es/temas/cambio-climatico-salud#:~:text=EFECTOS%20DEL%20CAMBIO%20CLIM%C3%81TICO&text=LESIONES%2C%20ENFERMEDADES%20Y%20DEFUNCIONES%20POR,y%20mayor%20agotamiento%20por%20calor

S&Amp;P. (2025, 30 junio). ¿Es el dióxido de carbono tóxico para la salud humana? | S&P. S&P Sistemas de Ventilación. https://www.solerpalau.com/es-es/blog/dioxido-de-carbono/

Ashour, M., Mansour, A. T., Alkhamis, Y. A., & Elshobary, M. (2024). Usage of Chlorella and diverse microalgae for CO2 capture - towards a bioenergy revolution. *Frontiers In Bioengineering And Biotechnology*, *12*. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1387519

State of Global Air. (2023). *PM2.5 Pollution Sources*. Health Effects Institute. https://www.stateofglobalair.org/pollution-sources/pm25

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Grupo Acura. (11 de diciembre de 2023). *Biorreactores o fermentadores industriales: Tipos y características*. Grupo Acura. https://grupoacura.com/es/blog/biorreactores/

Torres Velasco, M. (2024, julio 25). Las microalgas, nuestras grandes aliadas para limpiar el aire interior y exterior de los edificios. The Conversation. https://theconversation.com/las-microalgas-nuestras-grandes-aliadas-para-limpiar-el-aire-interior-y-exterior-de-los-edificios-231942

Secretaría Distrital de Ambiente (s.f.). *Zuma, propuesta de POT, una herramienta clave para seguir mejorando la calidad del aire de Bogotá - Nota principal - Secretaría Distrital de Ambiente*. Tomado de: https://www.ambientebogota.gov.co/nota-principal/-

/asset_publisher/vRkc1u7VgGg4/content/zuma-propuesta-de-pot-una-herramienta-clave-para-seguir-mejorando-la-calidad-del-aire-de-bogota

Secretaría Distrital de Ambiente (s. f.). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB - Secretaría Distrital de Ambiente*. https://www.ambientebogota.gov.co/red-de-monitoreo-de-calidad-del-aire-de-bogota-rmcab

Secretaría Distrital de Ambiente (2021). *Plan Aire 2030 - Secretaría Distrital de Ambiente*. https://www.ambientebogota.gov.co/plan-aire-2030

Regonesi, G (2023).Bioreactors: a Complete Review. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/373708124_BIOREACTORS_A_Complete_Review

PharSol. (2022, 18 de febrero). *From Clay To Steel: A brief History of the Bioreactor*. PharSol Blog. Recuperado de https://pharsol.com/knowledge-hub/blog/bioreactor-history

Ley 2036 de 2020 - Gestor Normativo. (s. f.). Función Pública. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=137050

Teleantioquia. (s. f.). *Teleantioquia | Conectando futuro*. https://www.teleantioquia.co/estilo-de-vida/el-sorprendente-invento-con-microalgas-creado-en-antioquia-que-convierte-la-contaminacion-en-oxigeno-y-alimento-521774

Vargas, A (2025). *La UdeA cultiva soluciones verdes: biorreactores de microalgas que limpian el aire y producen biomasa.* UdeA Noticias. Tomado de:

https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/contenido/asnoticias/periodicoalmamater/biorreactores-microalgas-udea

Schott. (2023, enero 31). Fotobiorreactores. https://www.schott.com/es-co/experiencia/aplicaciones/fotobiorreactores

Fernández, J. (2022). Fotobiorreactores para el cultivo masivo de microalgas. Universidad de Almería. https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-7-fotobiorreactores.html

Clavijo, N., & Atencio, L. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. Interciencia, 28(8), 420-427. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442003000800004

Bibo Park. (s.f.). ¿Qué es un Fotobiorreactor Tubular? https://ibizabotanicobiotecnologico.com/fotobiorreactor-tubular/

Universidad Nacional Autónoma de México. (2025, abril 28). Diseñan nuevo fotobiorreactor que mejoraría el cultivo de microalgas. https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/1673-disenan-nuevo-fotobiorreactor-que-mejoraria-el-cultivo-de-microalgas

Universidad Rioja. (s.f.). Diseño de un fotobiorreactor Airlift a escala banco. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5085375.pdf

Tutorialspoint. (s.f.). Fotobiorreactores: una visión general. https://translate.google.com/translate?u=https%3A%2F%2Fwww.tutorialspoint.com%2Fphotobioreactors-an-overview&hl=es&sl=en&tl=es&client=srp

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. (s.f.). Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de microalgas. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/44886/TFG-I-1688.pdf