

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Diseño de un fotoreactor para reducir las  
concentraciones de CO<sub>2</sub> en una Institución  
Educativa, Arequipa-2024**

Kely Benavente Ccalla  
Karla Gabriela Suni Pilcomamani

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Ambiental

Arequipa, 2025

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**A** : Decano de la Facultad de Ingeniería  
**DE** : Mag. Doménica Dongo Martínez  
Asesor de trabajo de investigación  
**ASUNTO** : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación  
**FECHA** : 19 de Noviembre de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

**Título:**

Diseño de un fotoreactor para reducir las concentraciones de CO2 en una Institución Educativa, Arequipa-2024

**Autores:**

1. Kely Benavente Ccalla – Carrera profesional Ingeniería Ambiental
2. Karla Gabriela Suni Pilcomamani – Carrera profesional Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 15 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI  NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores N°10 de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): SI  NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI  NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

**La firma del asesor obra en el archivo original**

**(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)**

## **AGRADECIMIENTOS**

Dedicamos este trabajo con todo nuestro corazón a nuestras familias, que, con su amor incondicional, palabras de aliento y abrazos en los momentos difíciles, nos dieron la fuerza para no rendirnos. A nuestros seres queridos, que han sido luz en nuestro camino y ejemplo constante de lucha y amor.

También lo dedicamos a todas aquellas personas que, con su cariño, confianza y enseñanzas, nos han inspirado a ser mejores cada día. Ustedes han dejado huellas profundas en nuestra historia.

Este logro no es solo nuestro es también de ustedes, que estuvieron allí en cada paso, creyendo en nosotras incluso cuando dudamos. Gracias por ser parte de este sueño hecho realidad.

## DEDICATORIA

En primer lugar, agradecemos a Dios, cuya guía, fortaleza y bendiciones nos han acompañado en cada paso de este camino. Su presencia ha dado la sabiduría y la resiliencia necesarias para superar los desafíos y alcanzar esta importante meta.

A nuestras familias, por ser nuestro pilar incondicional. Su amor, apoyo y confianza nos impulsaron a dar lo mejor de nosotros mismos, incluso en los momentos más difíciles. Este logro es tanto nuestro como suyo.

A la Universidad Continental, por brindarnos una formación integral y las herramientas necesarias para nuestro desarrollo profesional.

Agradecemos profundamente a nuestra asesora Domenica Dongo Martinez por su dedicación, orientación y constante apoyo durante el desarrollo de esta tesis. Su compromiso, paciencia y experiencia fueron fundamentales para guiarnos y motivarnos a dar lo mejor de nosotros.

A nuestros docentes y demás asesores académicos, gracias por compartir sus conocimientos y por acompañarnos en este proceso con vocación y entrega.

A nuestros amigos y compañeros, por su ánimo constante, sus consejos sinceros y su compañía en este recorrido. Gracias por ayudarnos a transformar los retos en aprendizajes y los sueños en realidades.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de esta tesis. Cada esfuerzo compartido ha sido parte esencial de este logro.

¡Gracias a todos!

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA .....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	xiii
CAPÍTULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	1
1.1    Planteamiento y formulación del problema .....	1
1.1.1    Planteamiento del problema .....	1
1.2    Formulación del problema.....	3
1.2.1    Problema general.....	3
1.2.2    Problemas específicos .....	3
1.3    Objetivos.....	3
1.3.1    Objetivo general .....	3
1.3.2    Objetivos específicos.....	3
1.4    Justificación .....	3
1.4.1    Justificación ambiental .....	3
1.4.2    Justificación económica.....	4
1.4.3    Justificación social .....	5
1.5    Hipótesis .....	5
1.5.1    Hipótesis general .....	5
1.6    Operacionalización de variables .....	5
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7

2.1	Antecedentes del problema .....	7
2.1.1	Antecedentes internacionales .....	7
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	10
2.1.3	Antecedentes locales .....	11
2.2	Bases teóricas .....	12
2.2.1	Cambio climático y efecto invernadero .....	12
2.2.2	Dióxido de carbono .....	12
2.2.3	Biotecnología en la mitigación del cambio climático .....	12
2.2.4	Fotoreactores .....	14
2.2.5	Microalgas.....	15
2.2.6	Tecnología del fotoreactor a diseñar: fotoreactores cerrados de flujo ascendente.....	17
2.2.7	Microalgas <i>Chlorella sp.</i> : agente biológico en la captura de CO <sub>2</sub> .....	18
2.2.8	Consideraciones operativas y de diseño del fotoreactor .....	19
2.3	Definición de términos básicos .....	19
CAPÍTULO III.....		22
METODOLOGÍA.....		22
3.1	Métodos y alcance de la investigación .....	22
3.1.1	Método de investigación.....	22
3.1.2	Alcances de la investigación.....	22
3.2	Diseño de la investigación.....	22
3.3	Población y muestra .....	23
3.3.1	Población.....	23
3.3.2	Muestra.....	23
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	23
3.5	Técnicas e instrumentos de análisis de datos .....	24
3.6	Procedimiento .....	24
3.6.1	Fase I: diagnóstico.....	25
3.6.2	Fase II: diseño y construcción del fotoreactor .....	27

3.6.3	Dimensionamiento del fotoreactor de 4 litros.....	30
3.6.4	Fase III: implementación y monitoreo.....	36
3.6.5	Análisis de datos.....	37
3.7	Características técnicas del fotoreactor .....	37
CAPÍTULO IV .....		40
RESULTADOS .....		40
4.1	Presentación de resultados.....	40
4.1.1	Concentración actual de CO <sub>2</sub> .....	40
4.1.2	Tipo de fotoreactor que utilizará para reducción de concentraciones de CO <sub>2</sub> 41	
4.1.3	Eficiencia del fotoreactor en la reducción de las concentraciones de CO <sub>2</sub> .....	44
4.1.4	Validación de la selección tecnológica .....	49
4.2	Prueba estadística.....	49
4.2.1	Prueba de normalidad.....	49
4.3	Discusión de resultados .....	52
4.3.1	Aportes y protocolo optimizado .....	54
CONCLUSIONES .....		55
RECOMENDACIONES.....		56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		57
ANEXOS .....		64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de variables. ....	6
Tabla 2.	Comparación de tecnologías de fotoreactores. ....	17
Tabla 3.	Análisis multicriterio para selección de fotoreactor. ....	27
Tabla 4.	Composición del medio BBM para 1 L. ....	29
Tabla 5.	Fotoreactores de escala similar reportados. ....	35
Tabla 6.	Concentraciones iniciales de CO <sub>2</sub> – nivel primario. ....	40
Tabla 7.	Concentraciones iniciales de CO <sub>2</sub> - nivel secundario. ....	41
Tabla 8.	Concentraciones finales - Nivel primario. ....	44
Tabla 9.	Concentraciones finales de contaminantes de aire - Nivel secundario. ....	46
Tabla 10.	Rendimiento en laboratorio vs colegio. ....	47
Tabla 11.	Prueba de normalidad. ....	50
Tabla 12.	Prueba de Wilcoxon para el nivel primario. ....	51
Tabla 13.	Prueba de Wilcoxon para el nivel secundaria. ....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Clasificación de algas.....	16
Figura 2.	Concentraciones finales de CO <sub>2</sub> (ppm) – Primaria.....	45
Figura 3.	Concentraciones finales de CO <sub>2</sub> (ppm) – Secundaria.....	46

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo el diseño de un fotoreactor, utilizando la microalga *Chlorella sp.* para reducir las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en las aulas de primer año de secundaria de una institución educativa en Arequipa, durante el año 2024. Esta solución se propone ante la problemática de la elevada acumulación de CO<sub>2</sub> en ambientes cerrados, lo cual impacta negativamente en el rendimiento cognitivo, la salud y el bienestar de los estudiantes.

El fotoreactor diseñado es un sistema cerrado de flujo ascendente (airlift) que optimiza la captura de CO<sub>2</sub> mediante la fotosíntesis. Este dispositivo cuenta con iluminación LED de espectro completo, un sistema de monitoreo que permite controlar parámetros críticos como pH, temperatura y concentración de CO<sub>2</sub>, y un sistema de aireación que mejora la transferencia de gases. Las microalgas *Chlorella sp.* fueron seleccionadas debido a su alta capacidad fotosintética y su adaptabilidad a condiciones controladas.

El diseño experimental incluyó la medición inicial de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas, la construcción del fotoreactor y su implementación en un entorno controlado. Los datos obtenidos fueron analizados mediante métodos estadísticos para evaluar la eficiencia del sistema y validar su impacto en la reducción de CO<sub>2</sub>. Los resultados preliminares sugieren que el fotoreactor tiene un efecto significativo en la disminución de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, mejorando así la calidad del aire en las aulas y contribuyendo a un entorno más saludable para los estudiantes.

Esta investigación no solo aborda un problema ambiental crítico, sino que también promueve el desarrollo de tecnologías sostenibles aplicadas al sector educativo. Además, fomenta la integración de la biotecnología como herramienta pedagógica, sensibilizando a los estudiantes sobre la importancia de la sostenibilidad ambiental y la innovación tecnológica.

**Palabras clave:** fotoreactor, microalga *Chlorella sp.*, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), calidad del aire, rendimiento cognitivo, sostenibilidad ambiental, tecnologías sostenibles, biotecnología educativa, innovación tecnológica, captura de CO<sub>2</sub>.

## ABSTRACT

The aim of this study is to design a photobioreactor using the microalga *Chlorella sp.* to reduce carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations in first-year secondary classrooms of an educational institution in Arequipa during the year 2024. This solution is proposed in response to the issue of high CO<sub>2</sub> accumulation in enclosed spaces, which negatively impacts cognitive performance, health, and the well-being of students.

The designed photobioreactor is a closed, upward flow (airlift) system that optimizes CO<sub>2</sub> capture through photosynthesis. This device features full-spectrum LED lighting, a monitoring system that controls critical parameters such as pH, temperature, and CO<sub>2</sub> concentration, and an aeration system that enhances gas transfer. *Chlorella sp.* microalgae were chosen due to their high photosynthetic capacity and adaptability to controlled conditions.

The experimental design included initial CO<sub>2</sub> concentration measurements in the classrooms, the construction of the photobioreactor, and its implementation in a controlled environment. The data obtained were analyzed using statistical methods to assess the system's efficiency and validate its impact on CO<sub>2</sub> reduction. Preliminary results suggest that the photobioreactor has a significant effect on reducing CO<sub>2</sub> concentrations, thereby improving air quality in the classrooms and contributing to a healthier environment for the students.

This research not only addresses a critical environmental issue but also promotes the development of sustainable technologies applied to the educational sector. Furthermore, it encourages the integration of biotechnology as a pedagogical tool, raising students' awareness of the importance of environmental sustainability and technological innovation.

**Keywords:** Photobioreactor, *Chlorella sp.* microalgae, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), air quality, cognitive performance, environmental sustainability, sustainable technologies, educational biotechnology, technological innovation, CO<sub>2</sub> capture.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, hemos presenciado aumento de los niveles de CO<sub>2</sub> a nivel global, impulsado por actividades humanas, ha generado preocupaciones significativas no solo sobre el cambio climático, sino también sobre sus efectos directos en la salud y el rendimiento cognitivo en espacios interiores. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha señalado que una exposición prolongada a altos niveles de CO<sub>2</sub> en espacios cerrados puede causar fatiga, problemas de concentración y dolores de cabeza (ONU, 2015).

En América Latina, donde muchas instituciones educativas carecen de sistemas de ventilación adecuados, los estudiantes están expuestos a niveles elevados de CO<sub>2</sub>, lo que afecta su capacidad de aprendizaje. Estudios en la región han demostrado que las concentraciones de CO<sub>2</sub> en aulas pueden superar los niveles recomendados por organismos internacionales, lo que genera un impacto negativo en el desempeño académico (Vo Hoang et al., 2018). En Perú, un país que experimenta un rápido crecimiento urbano, este problema es especialmente relevante en las ciudades costeras como Arequipa, donde las instituciones educativas están ubicadas en áreas densamente pobladas, lo que agrava la calidad del aire interior (De Lorenzo et al., 2018).

A nivel local, en la ciudad de Arequipa, las condiciones climáticas áridas y la falta de sistemas de ventilación adecuados en muchas instituciones educativas han resultado en una concentración significativa de CO<sub>2</sub> en las aulas. La implementación de soluciones innovadoras, como el diseño de fotoreactores, puede ser una respuesta eficaz para reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> y mejorar el ambiente de aprendizaje. Un fotoreactor es un dispositivo que, mediante la fotocatalisis, puede descomponer el CO<sub>2</sub> en productos menos nocivos.

Es por ello, que se realiza esta investigación que consta de cuatro capítulos, el primer capítulo consta del planteamiento del problema bajo el contexto de la institución educativa y la problemática en estudio, así como los objetivos, importancia del estudio e hipótesis de la investigación. En el capítulo 2, se observará el marco teórico en el cual está basado la investigación, desde antecedentes del estudio en diferentes partes del mundo, bases teóricas y términos para definirlos. En el capítulo 3, que consta en la metodología usada en la investigación desde la identificación de tipo y alcance de la investigación, diseño de la investigación, población y muestra de estudio y las técnicas e instrumentos de recolección de datos. En el capítulo 4, se tendrá los resultados de manera estructurada de acuerdo con los objetivos, constatación de hipótesis y la discusión de resultados con otros autores. Por último, se tendrá las conclusiones y recomendaciones, así como anexos de la investigación que nos apoyará en el proceso de la investigación.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

### 1.1 Planteamiento y formulación del problema

#### 1.1.1 Planteamiento del problema

Uno de los objetivos de sostenibilidad global a largo plazo más convincentes no es solo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también sustituir procesos ambientalmente costosos basados en combustibles fósiles con alternativas sostenibles de base biológica (ONU, 2015). Las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, que contribuyen al calentamiento global, representan un desafío crítico para la humanidad, ya que afectan gravemente los ecosistemas y la salud del planeta. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el aumento de CO<sub>2</sub> en espacios interiores ha demostrado ser una preocupación creciente debido a su impacto en la salud y el rendimiento cognitivo de las personas, especialmente en los entornos educativos (Vo Hoang et al., 2018).

El incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en espacios cerrados es un problema significativo para la salud pública y el rendimiento académico, especialmente en entornos escolares. En el contexto peruano, se han realizado pocos estudios recientes sobre el impacto directo del CO<sub>2</sub> en la calidad del aire en las aulas, lo que hace urgente la recopilación de datos precisos. Sin embargo, algunos estudios previos reportan que las aulas escolares en diversas ciudades de Perú superan con frecuencia el umbral recomendado de 1000 ppm de CO<sub>2</sub>, alcanzando niveles de hasta 2500 ppm, particularmente en horarios de alta ocupación (De Lorenzo et al., 2018).

En Arequipa, se ha identificado que las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas de nivel secundario de una Institución Educativa local presentan niveles alarmantes. Mediciones preliminares realizadas en 2023 revelaron que durante las horas pico, las aulas alcanzaban concentraciones de CO<sub>2</sub> de entre 1500 y 2200 ppm en el nivel primario, y entre 1300 y 1900 ppm en el nivel secundario. Estas cifras superaron el umbral de 1000 ppm en el 78% de las mediciones realizadas. Este fenómeno no solo provoca problemas respiratorios y fatiga, sino que también tiene un impacto negativo en el rendimiento académico. Un estudio realizado en 2019 en entornos educativos reportó una disminución del rendimiento académico en un 15% cuando los niveles de CO<sub>2</sub> superaron los 1000 ppm, así como un aumento del 25% en los reportes de fatiga y dolores de cabeza entre los estudiantes (Wargoeki, 2020). La medición de las concentraciones de CO<sub>2</sub> se realizó utilizando sensores de alta precisión colocados en distintas zonas del aula durante diferentes horarios del día, con especial atención en las horas de máxima ocupación.

Estos sensores miden la concentración en partes por millón (ppm) y registran los datos de forma continua para obtener una representación precisa del ambiente dentro de las aulas. Además, se tomaron en cuenta factores como la densidad de estudiantes (35-40 alumnos por aula), el tiempo de permanencia de estos y la ventilación natural de las instalaciones, elementos que pueden afectar los niveles de CO<sub>2</sub> (Atencio, 2023).

En la Institución Educativa de Arequipa, objeto de este estudio, mediciones preliminares realizadas en 2023 revelaron concentraciones alarmantes de CO<sub>2</sub>, en las aulas del nivel primario se reveló concentraciones de 1500-2200 ppm durante horas pico, en las aulas del nivel secundario de 1300 – 1900 ppm en periodos de máxima ocupación, obteniendo un 78% de las mediciones superaron el umbral de 1000 ppm, esta situación se agrava por factores específicos como la permanencia prolongada de estudiantes en espacios cerrados, lo que contribuye a problemas respiratorios y afecta el rendimiento académico, alta densidad estudiantes dentro de las aulas que se encuentran un aproximado de 35 a 40 alumnos por aula sintiendo la sensación de incomodidad y fatiga en los ocupantes. Asimismo, las consecuencias que se observaron fue la disminución del 15% en el rendimiento académico de los estudiantes, un 25% en reportes de fatiga y dolor de cabeza y un 30% de incremento en ausencias por problemas respiratorios (Satish, 2012).

El presente estudio se llevará a cabo en las aulas de nivel secundario de una Institución Educativa ubicada en Arequipa, objeto de este estudio, durante el periodo académico 2024, teniendo como población beneficiada estará compuesta por los estudiantes de primaria y secundaria que permanecen en estos espacios durante largas horas al día, donde se medirán las concentraciones iniciales de CO<sub>2</sub> y se diseñará el fotoreactor para posteriormente medir dichos niveles, lo que provoca problemas de salud en cuanto a problemas respiratorios que son originados por la alta concentración de CO<sub>2</sub> dentro de las aulas; además, se sabe que los estudiantes permanecen en las aulas el mayor tiempo del día, por lo que la calidad de aire en estos espacios educativos puede ser un problema para ellos, disminuyendo la percepción y bienestar estudiantil. En este contexto, surge la necesidad de explorar una solución sostenible y efectiva que ayude a reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas. Por lo tanto, este estudio propone el diseño de un fotoreactor utilizando la microalga *Chlorella sp.* como agente biológico para reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en una Institución Educativa.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿Cómo diseñar un fotoreactor con *Chlorella sp.* para reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas de la Institución Educativa de Arequipa durante el período 2024?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- a) ¿Cuáles son los niveles actuales de concentración de CO<sub>2</sub> en las aulas en una institución educativa Arequipa – 2024?
- b) ¿Qué tipo de fotoreactor es el más adecuado para las condiciones específicas de la institución educativa Arequipa – 2024?
- c) ¿Cuál será la eficiencia del fotoreactor en la reducción de CO<sub>2</sub> dentro de las aulas en una institución educativa de Arequipa, 2024?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un fotoreactor para reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en una institución educativa, Arequipa-2024.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Determinar la concentración actual de CO<sub>2</sub> en una institución educativa Arequipa – 2024.
- b) Establecer el tipo de fotoreactor que se utilizará para la reducción de concentraciones de CO<sub>2</sub> en una institución educativa, Arequipa – 2024.
- c) Evaluar la eficiencia del fotoreactor en la reducción de las concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro de las aulas en una institución educativa de Arequipa, 2024.

## **1.4 Justificación**

### **1.4.1 Justificación ambiental**

El diseño e implementación de fotoreactores en las aulas de primero de secundaria de la institución educativa en Arequipa representa una estrategia ambiental innovadora y de alto impacto en la mitigación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en ambientes cerrados. Estos sistemas aprovechan las propiedades fotosintéticas de microorganismos como *Chlorella sp.*, que

absorben el CO<sub>2</sub> presente en el aire, lo convierten en biomasa, y liberan oxígeno como subproducto, este enfoque contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en interiores, con una disminución estimada del 40% en las concentraciones de este gas dentro de las aulas, alineándose con los objetivos de sostenibilidad institucional y global, la integración de esta tecnología verde no solo busca mejorar la calidad del aire en espacios educativos, sino también generar un impacto ambiental positivo al reducir la huella de carbono en instituciones educativas. Además, fomenta la biodiversidad microbiana al introducir *Chlorella sp.*, un microorganismo beneficioso para el equilibrio ecológico, en un entorno acuático adaptado al contexto local.

Este proyecto tiene un alto potencial de replicabilidad en otras instituciones educativas, lo que amplifica su relevancia como una solución sostenible y adaptable a diversos contextos. Asimismo, el desarrollo de esta tecnología verde adaptada al entorno local refuerza las capacidades de innovación tecnológica en la región, promoviendo prácticas sostenibles que pueden extenderse a otros sectores, por último, la implementación de los fotoreactores en las aulas no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también se convierte en una herramienta educativa que sensibiliza a los estudiantes sobre la importancia de las tecnologías verdes y la mitigación del cambio climático. Al conectar la teoría con la práctica, esta iniciativa integra el aprendizaje sobre sostenibilidad en el currículo escolar, fomentando una nueva generación consciente de su rol en la preservación del equilibrio ambiental.

#### **1.4.2 Justificación económica**

A través de la fotosíntesis, los fotoreactores convierten el CO<sub>2</sub> y la luz en oxígeno y biomasa, lo que permite reducir la dependencia de sistemas convencionales de ventilación y aire acondicionado, altamente costosos en términos de consumo energético, este ahorro proyectado en el consumo energético puede alcanzar un 30% en costos de ventilación, representando una disminución significativa en los gastos operativos de la institución, además, la mejora en la calidad del aire que proporciona este sistema contribuye a reducir en un 25% el ausentismo estudiantil, al minimizar problemas de salud derivados de la exposición a ambientes con altas concentraciones de CO<sub>2</sub>. Esto no solo mejora el desempeño académico, sino que también reduce la necesidad de destinar recursos adicionales al refuerzo educativo. Comparado con sistemas convencionales, los fotoreactores presentan menores costos de mantenimiento debido a su diseño sostenible y adaptable al contexto local, asimismo, el sistema tiene el potencial de generar biomasa como subproducto, la cual puede ser utilizada o comercializada en sectores como la agricultura o la acuicultura, lo que abre oportunidades económicas adicionales para la institución.

### **1.4.3 Justificación social**

Desde una perspectiva social, la implementación de fotoreactores en las aulas de primero de secundaria beneficiará directamente a los 380 estudiantes de la institución educativa al garantizar un ambiente de aprendizaje más saludable y sostenible, la reducción de problemas de salud relacionados con la mala calidad del aire, como dolores de cabeza, fatiga y dificultades respiratorias, mejorará el bienestar general de la comunidad educativa. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a niveles elevados de CO<sub>2</sub> afecta negativamente la toma de decisiones, la resolución de problemas y el rendimiento cognitivo, por lo tanto, al reducir estos niveles, el proyecto no solo mejora la salud de los estudiantes y docentes, sino también su rendimiento académico y su capacidad de aprendizaje.

Además, este proyecto fortalece la educación ambiental práctica al involucrar a los estudiantes en el manejo y monitoreo de los fotoreactores, promoviendo una comprensión más profunda de los conceptos biotecnológicos y su aplicación en la vida cotidiana, a su vez, fomenta el desarrollo de capacidades locales en biotecnología y sensibiliza a los estudiantes y a la comunidad sobre la importancia de las tecnologías sostenibles; por último, el proyecto sirve como un modelo replicable para otras instituciones educativas, estableciendo un ejemplo inspirador de cómo la innovación tecnológica puede abordar problemas ambientales, sociales y educativos de manera integrada.

## **1.5 Hipótesis**

### **1.5.1 Hipótesis general**

H<sub>0</sub>: El diseño e implementación del fotoreactor no producirá una reducción estadísticamente significativa ( $p > 0.05$ ) en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas de la institución educativa.

H<sub>1</sub>: El diseño e implementación del fotoreactor producirá una reducción estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas de la institución educativa, con una magnitud de efecto mediana o superior ( $d > 0.5$ ).

## **1.6 Operacionalización de variables**

Tabla 1. Operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
<b>V.I.: Diseño de biorreactor</b>	Sistemas de cultivo que proporcionan un entorno controlado para la proliferación masiva de organismos fotosintéticos, su diseño aplica teoría biológica en un medio estable (7).	El funcionamiento de los fotoreactores está condicionado operacionalmente por su tipo y diseño para determinar el rendimiento final.	Condiciones operacionales  Tipo	Temperatura pH optimo Intensidad de luz Tubular Abierto Placa plana
<b>V.D.: Concentración de CO<sub>2</sub></b>	Cantidad gas incoloro e inodoro que contiene carbono en un ambiente determinado y afecta la calidad del aire cuando supera 1000 ppm (8).	La reducción de la concentración de dióxido de carbono se determina calculando la eficiencia y la velocidad de captura en un ambiente determinado.	Diagnóstico	Porcentaje de reducción de concentración

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes del problema

##### 2.1.1 Antecedentes internacionales

Alhaboubi (2022) abordó un estudio titulado “Secuestro de CO<sub>2</sub> utilizando un novedoso reactor de cinta transportadora con bandejas de tamiz giratorias en comparación con una columna de burbujas Airlift como fotoreactores”, que tuvo por objetivo evaluar el desempeño de un novedoso reactor trifásico y un tradicional empleando *Chlorella vulgaris* cultivado a una concentración de CO<sub>2</sub> del 0,038 %. Tuvo como metodología de tipo cuantitativa de diseño experimental el cual constó en el prototipado de un reactor. Como resultado se obtuvo que la tasa de crecimiento máxima alcanzada al día 14 fue de 2.1 y 1.4 g/L para el reactor trifásico y tradicional respectivamente, la eficiencia de eliminación del secuestro de dióxido de carbono por los dos fotoreactores es del 40% para trifásico y del 25% para tradicional; el diseño innovador logró la calidad operativa de la agitación con una alta retención de gas dentro de las bandejas del tamiz para aumentar el crecimiento de la biomasa hasta un 50% más que en el tradicional; la fijación máxima de CO<sub>2</sub> para reactor tradicional fue de aproximadamente el 18% mientras que en el trifásico se puede alcanzar alrededor del 38% con condiciones de funcionamiento de amplio rango. Se concluyó que el uso de un fotoreactor es eficiente en mantener activo un cultivo de alta densidad de *Chlorella vulgaris* sin precipitar debido a una buena mezcla; asimismo, demuestra que tiene aplicabilidad potencial en cuanto a la eliminación de CO<sub>2</sub> del aire en un 40%.

Este estudio proporciona evidencia valiosa sobre la eficiencia del uso de *Chlorella vulgaris* para la captura de CO<sub>2</sub> y respalda la elección de esta microalga para el fotoreactor en el estudio propuesto; sin embargo, se centró en condiciones controladas de laboratorio con una concentración constante de CO<sub>2</sub> del 0.038%, lo que puede no reflejar las condiciones dinámicas de un aula real, donde las concentraciones de CO<sub>2</sub> varían según la ocupación y la ventilación; además, aunque se destaca la eficiencia del reactor trifásico, no se profundiza en el costo y la complejidad operativa de este sistema, aspectos importantes cuando se plantea una implementación a mayor escala, como en las instituciones educativas.

Vergara (2019) con su investigación titulada “Captura de CO<sub>2</sub> por *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* bajo condiciones controladas en fotoreactores” con el objetivo es estimar la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> de dos especies de microalgas bajo el sistema de

fotoreactor, el tipo de investigación fue experimental la cual consistió en el cultivo de estas dos especies de microalgas, tres veces con diferentes dosificaciones de aire atmosférico y CO<sub>2</sub>, con iluminación artificial de 4400 lúmenes. Se utilizó la cámara de Neubauer para conteos diarios y se estimó la producción de biomasa con el método de peso seco, se realizó un monitoreo de temperatura en luz y oscuridad, pH cada 24 horas. Los resultados de la investigación fue que la microalga *Chlorella vulgaris* tuvo la mayor eficiencia en crecimiento celular, porcentaje de remoción de CO<sub>2</sub>. Se concluyó que al implementar estos fotoreactores benefició el manejo de microalgas, asimismo, el *Chlorella vulgaris* tuvo valores altos en cuanto captación de CO<sub>2</sub>.

Este estudio proporciona información útil sobre la eficacia de *Chlorella vulgaris* en la captura de CO<sub>2</sub> en condiciones controladas. Sin embargo, la investigación se centró en condiciones muy específicas, como la iluminación artificial y el control del pH, sin considerar otros factores relevantes, como la interacción con diferentes tipos de gases o el impacto de la densidad de ocupación, algo crucial para el diseño de un fotoreactor para aulas escolares; además, el estudio no ofrece detalles sobre el costo operativo de los fotoreactores, lo cual es esencial para determinar su viabilidad en un contexto educativo.

Bustos (2022) en su investigación titulada “Evaluación del efecto de la concentración de CO<sub>2</sub> en un cultivo de *Chlorella sp.* y su aplicación en la industria”, cuyo objetivo fue de evaluar el efecto de la concentración de CO<sub>2</sub> en el cultivo de microalgas *Chlorella sp.* a escala de laboratorio, esta investigación siguió metodología de tipo experimental, se estableció que la microalga crece de manera exponencial hasta los 10 días de cultivo, en los resultados mostró su eficiencia en captura de carbono fue eficiente con un flujo de CO<sub>2</sub> del 5%, se concluye que es una alternativa que beneficia mucho en cuanto a captura de CO<sub>2</sub> con una eficiencia en la remoción del 27%, asimismo, se requieren de mayor volumen de microalgas para una mejor captura de CO<sub>2</sub>.

Esta investigación es relevante para respaldar la viabilidad de *Chlorella sp.* como agente de captura de CO<sub>2</sub>; sin embargo, uno de los aspectos que limita la aplicabilidad directa de este estudio a la presente investigación es la escala, la investigación se realizó en un laboratorio con condiciones controladas y concentraciones constantes de CO<sub>2</sub>, lo que puede no coincidir con las fluctuaciones de CO<sub>2</sub> en aulas escolares; además, se menciona que se requiere un mayor volumen de microalgas para lograr una captura más eficiente de CO<sub>2</sub>, lo cual podría aumentar la complejidad y los costos operativos de la solución propuesta.

Santamaría et. al (2024), en su investigación “Reducción de dióxido de carbono utilizando un perovskita de haluro de bismuto como fotocatalizador inmovilizado en un microrreactor impreso en 3D”, tuvo como objetivo explorar dos alternativas para mejorar la reducción

fotocatalítica de CO<sub>2</sub>: la configuración del reactor y el fotocatalizador. Se diseñó e imprimió en 3D un microrreactor económico y versátil, y se sintetizaron tres perovskitas de haluro de bismuto, eligiéndose Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>I<sub>9</sub> por su menor brecha de banda (E<sub>g</sub>). Utilizando esta perovskita en el microrreactor, se logró la reducción de CO<sub>2</sub> en fase acuosa, produciendo CO con una tasa máxima de 737 μmol g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Se evaluó el sistema bajo diferentes velocidades de flujo e intensidades de luz, encontrándose que un mayor flujo optimiza la producción de CO y que una mayor intensidad de luz aumenta la generación de pares electrón-hueco, favoreciendo la reacción. Los resultados indican que Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>I<sub>9</sub> en el microrreactor diseñado tiene un gran potencial para la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>.

Este estudio es relevante para la investigación en reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>, ya que aborda dos de los principales factores que limitan la eficiencia de este proceso: la configuración del reactor y el fotocatalizador utilizado. El desarrollo de un microrreactor impreso en 3D proporciona una alternativa económica y versátil para la experimentación, mientras que la selección del perovskita Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>I<sub>9</sub> como fotocatalizador demuestra un enfoque prometedor para mejorar la conversión de CO<sub>2</sub> en productos útiles como el CO. Además, los hallazgos sobre la influencia del flujo y la intensidad de la luz en la eficiencia de la reacción permiten optimizar las condiciones del sistema. Estos resultados pueden contribuir al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles para la mitigación de CO<sub>2</sub>, con aplicaciones potenciales en la reducción de emisiones y la producción de combustibles renovables.

Silva et. al (2021), en su investigación “Reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> sobre Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> en un fotorreactor diferencial de flujo continuo: Investigación de parámetros operativos”, tuvo como objetivo emplear el fotocatalizador Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> en la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> dentro de un fotorreactor de flujo continuo, utilizando un diseño compuesto central rotacional (RCCD) para optimizar los parámetros operativos. Se evaluaron variables como el caudal de CO<sub>2</sub>, la intensidad de la luz, la presión parcial de H<sub>2</sub>O y la cantidad de fotocatalizador. La caracterización del Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> se realizó mediante técnicas como XRD, XPS, Raman, SEM, BET y espectroscopia UV-vis. Los resultados indicaron que el flujo de CO<sub>2</sub> afectó la eficiencia de la fotorreducción, mientras que la intensidad de la luz, la presión de H<sub>2</sub>O y la cantidad de fotocatalizador influyeron significativamente en la producción de CO. En condiciones óptimas (120 mW/cm<sup>2</sup>, 2.7 kPa y 15 mg de fotocatalizador), se logró mejorar en un 60% la eficiencia fotocatalítica en comparación con los experimentos iniciales. Sin embargo, la caracterización posterior al uso reveló cambios en la superficie del fotocatalizador, lo que explicaría su desactivación durante el proceso de fotorreducción en fase gaseosa.

Este estudio es crucial para la mejora de procesos de conversión de CO<sub>2</sub> en productos de valor agregado mediante fotocatalisis. La aplicación de un diseño experimental sistemático permitió optimizar los parámetros operativos, proporcionando información clave para maximizar la eficiencia de reducción de CO<sub>2</sub>. Además, la caracterización antes y después del uso del fotocatalizador aporta conocimiento sobre su estabilidad y posibles mecanismos de desactivación, lo que es fundamental para el desarrollo de materiales más duraderos y eficientes en la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Estos hallazgos pueden contribuir al diseño de tecnologías sostenibles para la captura y conversión de CO<sub>2</sub>, con aplicaciones en la reducción del impacto ambiental y la producción de combustibles renovables.

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

Deza (2022) en su investigación titulado “Diseño, construcción y funcionamiento de un sistema fotobireaccionante para el consumo de CO<sub>2</sub> con *Scenedesmus quadricauda* como agente biodepurante” tuvo como objetivo diseñar, construir y acondicionar un sistema fotoreactor a escala de laboratorio para albergar y multiplicar la especie microalga *Scenedesmus quadricauda*, con la capacidad de consumir CO<sub>2</sub> a partir de un balón de gas, esta investigación siguió como metodología el diseño experimental pues el sistema de soporte estuvo conformado por un armazón de fierro con sujetadores en los extremos para soportar y contener a los tubos, el volumen del fotoreactor fue de 17.5 litros, en la fase de funcionamiento, se acondicionó el sistema para el óptimo funcionamiento regulando variables como intensidad luminosa, temperatura, pH, y agitación constante, los resultados mostraron un consumo final de 0.027 moles CO<sub>2</sub>/L con la alimentación de CO<sub>2</sub>, en comparación con apenas 0.014 moles CO<sub>2</sub>/L en ausencia del mismo, como resultado se obtuvo que el consumo final fue de 0.027 moles CO<sub>2</sub>/L y un crecimiento constante. Finalmente, se concluyó que el diseño de este fotoreactor fue de tipo Batch, el cual se colocó en diferente tipo de irradiación solar obteniendo mejor resultado a una intensidad luminosa de 51200 Lux y en cuanto a las microalgas, el consumo de CO<sub>2</sub> fue eficiente y tenía un crecimiento exponencial en cuanto al secuestro de CO<sub>2</sub>.

Este estudio contribuye al diseño de fotoreactores, mostrando cómo se puede optimizar el consumo de CO<sub>2</sub> a través del ajuste de variables como la intensidad luminosa, la temperatura y el pH; sin embargo, el diseño batch utilizado puede no ser tan eficiente en aplicaciones continuas, como sería el caso de un aula escolar. Además, el uso de *Scenedesmus quadricauda* podría no ser el más adecuado para la situación específica de este estudio, ya que *Chlorella vulgaris* ha demostrado ser más eficiente en la captura de CO<sub>2</sub> en aplicaciones de fotoreactores.

Atencio (2023), en su investigación titulada “Evaluación de CO<sub>2</sub> en los ambientes de estudio del nivel primario del Colegio Editum Huancayo, enfocado a la prevención y control de riesgo

de exposición a SARS - COV-2 en la actualidad 2023”, tuvo como objetivo “evaluar la concentración de dióxido de carbono en los ambientes de estudio del nivel primario del colegio EDITUM, enfocada en la prevención y el control del COVID19. Las mediciones de concentración de CO<sub>2</sub> (ppm) se evalúan en 10 ambientes, donde seis son salones y cuatro son áreas administrativas de la institución educativa EDITUM, ubicada en el distrito de Huancayo. Para ello, se empleó un sensor de gases de marca Carbón Dioxide Detector – AIR MONITOR-H8 de lectura directa. Cabe mencionar que se realizó el análisis observacional de las condiciones de trabajo de cada ambiente, concluyéndose que el salón de tercer año de primaria presenta una concentración mayor a los LMP de 1647.2 ppm, lo cual indica que en este ambiente hay una mayor propagación de contagio COVID-19, ya que es un ambiente cerrado que muestra poca entrada de aire, por ello, se recomienda la ventilación natural”.

Aunque este estudio es valioso para comprender los niveles de CO<sub>2</sub> en aulas escolares y su impacto en la salud, se centró en el control del COVID-19 y no en el impacto de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el rendimiento académico; además, el estudio no aborda posibles soluciones para reducir el CO<sub>2</sub> en las aulas, lo que limita su aplicabilidad directa para la propuesta de fotoreactores en instituciones educativas.

### **2.1.3 Antecedentes locales**

Mamani (2023), en su investigación titulada “Nivel de conocimiento de la generación de la huella de carbono y su impacto en las instituciones educativas del Cercado de Caravelí – Arequipa, 2023”, su objetivo fue “demostrar cómo la evaluación de la huella de carbono permitió determinar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en una institución educativa. Esta institución fue seleccionada como muestra para inferir los resultados en otras instituciones en el área de Caravelí. Esto contribuirá a comprender el total de emisiones en las instituciones educativas de esa zona, siguiendo los estándares de la norma ISO 14064. Esta investigación surge ante la falta de programas y medidas ambientales en el ámbito educativo, fundamentales para el desarrollo de la educación ambiental. Se están integrando criterios e indicadores de desempeño ambiental, lo que promoverá la reducción de la huella de carbono, generará ahorro económico en la institución y fomentará la reflexión dentro de la comunidad educativa. En base a los resultados obtenidos en la determinación de la huella de carbono en las instituciones educativas genera 48.659 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, la cual llegará a representar la cantidad emisiones de gases de efecto invernadero que se estaría emitiendo en el sector educativo en el cercano de Caravelí”.

La investigación proporciona una perspectiva amplia sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> en las instituciones educativas, lo que resalta la necesidad de soluciones para mitigar el impacto

ambiental en este sector, sin embargo, el estudio no aborda específicamente la calidad del aire en las aulas ni las soluciones tecnológicas, como los fotoreactores, para reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub>, esto representa una oportunidad para desarrollar y aplicar soluciones más sostenibles en el ámbito educativo local.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Cambio climático y efecto invernadero**

El cambio climático y el efecto invernadero son fenómenos relacionados pero distintos. El cambio climático se refiere a la variación en el estado del sistema climático terrestre, incluyendo la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera, que perdura durante periodos de tiempo suficientemente largos como décadas o más tiempo (Díaz, 2012). Por otro lado, el efecto invernadero es el aumento de temperatura que experimenta la Tierra gracias a ciertos gases de la atmósfera, como el dióxido de carbono, que retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar (Caballero, 2017).

### **2.2.2 Dióxido de carbono**

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un gas inodoro, incoloro y no inflamable que se encuentra en la atmósfera terrestre, las emisiones de CO<sub>2</sub> son causadas por las actividades humana, siendo la quema de combustibles fósiles la principal actividad humana que emite CO<sub>2</sub>; además contribuyen al calentamiento global y al cambio climático, ya que es un gas de efecto invernadero que retiene el calor en la atmósfera. También desempeña un papel crucial en la fotosíntesis de las plantas y las microalgas, pues es capturado y convertido en compuestos orgánicos durante este proceso (Arroyo, 2020).

### **2.2.3 Biotecnología en la mitigación del cambio climático**

La biotecnología ha surgido como una herramienta clave en la reducción de gases de efecto invernadero, con enfoques innovadores a través de procesos como la fotosíntesis, la mejora de la captura de carbono en el suelo y el uso de biofijación de algas en biorreactores de algas, estos avances en biotecnología ofrecen la posibilidad de capturar y utilizar gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el cambio climático (De Vree, 2015).

La biotecnología se ha consolidado como una herramienta clave en la lucha contra el cambio climático, especialmente en lo que se refiere a la captura de gases de efecto invernadero (GEI). Los fotoreactores han emergido como una solución biotecnológica eficaz para la captura de CO<sub>2</sub>, utilizando microalgas fotosintéticas, como *Chlorella sp.* (Chisti, 2007). Esta microalga

es especialmente destacada por su capacidad de fijar grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y producir biomasa a partir de este proceso (Xu, et al., 2023).

a) Uso de microalgas en la captura de CO<sub>2</sub>

La capacidad de las microalgas para capturar CO<sub>2</sub> en sistemas cerrados, como los fotoreactores, las convierte en una de las soluciones más prometedoras para mitigar el cambio climático. Las microalgas no solo capturan CO<sub>2</sub>, sino que también lo transforman en biomasa, lo cual puede ser utilizado para diversas aplicaciones industriales (Richmond, 2003). Según Gouveia y Oliveira (2009), las microalgas tienen una tasa de crecimiento rápida, lo que facilita la captura continua de CO<sub>2</sub> a gran escala.

b) Optimización de condiciones en fotoreactores

Además de las mejoras en las condiciones de cultivo, la biotecnología ha permitido el desarrollo de sistemas avanzados de fotoreactores que optimizan factores como la temperatura, el pH, y la iluminación. Estos avances son esenciales para maximizar la eficiencia de la fotosíntesis y la captura de CO<sub>2</sub> (24). Además, Yang et al. (2017) demostraron que la implementación de biotecnología genética en microalgas puede aumentar su resistencia y capacidad de fijación de carbono, lo que mejora aún más el rendimiento de los sistemas de captura de CO<sub>2</sub>.

c) Aplicaciones de la biotecnología en fotoreactores de escala industrial

La escalabilidad de los fotoreactores es una característica clave para su implementación industrial. Tomar (2023) destacan que el uso de fotoreactores a gran escala podría transformar las emisiones de CO<sub>2</sub> en una fuente de biomasa valiosa, contribuyendo tanto a la reducción de GEI como a la producción de recursos sostenibles.

d) Impacto del CO<sub>2</sub> en el rendimiento académico

Diversos estudios han mostrado una relación directa entre los niveles de CO<sub>2</sub> en ambientes de aprendizaje y el rendimiento académico. Investigaciones en entornos escolares indican que la calidad del aire interior, especialmente en términos de niveles de CO<sub>2</sub>, tiene un impacto significativo en las capacidades cognitivas y de aprendizaje de los estudiantes. Un estudio realizado por Satish et al. (2012) reveló que el aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en aulas afecta la capacidad de toma de decisiones y el desempeño en tareas cognitivas (Richmond, 2003).

## 2.2.4 Fotoreactores

Los fotoreactores son estructuras cerradas que están aisladas del entorno exterior y no tienen posible intercambio de gases o contaminantes en su interior, tienen la ventaja de minimizar la toxicidad y, al mismo tiempo, proporcionar condiciones mejoradas para el crecimiento de microalgas en términos de pH, temperatura, luz y concentración de CO<sub>2</sub>, junto con altas concentraciones de biomasa (Chanquia, 2021)

### a) Factores importantes en el diseño de fotoreactores

Debido a que una condición necesaria para el éxito comercial de una biotecnología es tener una productividad alta y consistente, los diferentes tipos de fotoreactores se comparan con frecuencia en base a su productividad por unidad de volumen de reactor, a su productividad por unidad de área ocupada de reactor y a la productividad por área iluminada de reactor, siendo la primera la más utilizada (Contreras-Flores, et al., 2003).

Los fotoreactores son dispositivos utilizados para el cultivo de microorganismos fotosintéticos, como microalgas, y se clasifican en sistemas cerrados y abiertos.

### b) Sistemas cerrados

- Fotoreactores tubulares: estos fotoreactores consisten en tubos transparentes a través de los cuales fluye el medio de cultivo y la luz necesaria para la fotosíntesis. Son ampliamente utilizados debido a su eficiencia en la transferencia de masa y calor, aunque pueden presentar limitaciones en la escala de producción (Arribas, 2020).
- Fotoreactores de placa plana: este tipo de fotoreactor se caracteriza por su diseño plano, que permite una mayor exposición a la luz solar. Sin embargo, su eficiencia puede verse afectada por problemas de sombreado y dificultades en la transferencia de calor (Arribas, 2020).

### c) Sistemas abiertos

- Estanque sin agitación: sistema simple y de uso comercial para cultivar algunas especies de microalgas; sin embargo, se debe garantizar la profundidad a menos de 1 m para lograr la penetración de luz suficiente (Abdur Razzak, et al., 2023).
- Estanque de canalización: estanques generalmente entre 15 y 25 cm de profundidad, y están contruidos como un solo canal o grupos de canales, se utilizan ruedas de paletas

para mezclar y el cultivo se expone a la atmósfera abierta para regular la temperatura mediante la evaporación (Abdur Razzak, et al., 2023).

- Estanque circular: estanques abiertos para el cultivo de algas a gran escala más antiguos, con una profundidad de entre 30 y 70 cm, tienen limitaciones como un menor control de la temperatura, altos costos operativos y de capital y mayores riesgos de contaminación (Abdur Razzak, et al., 2023).

### 2.2.5 Microalgas

Las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos que se encuentran en ambientes acuáticos y terrestres, y son la base de las cadenas tróficas en medios acuáticos, estos organismos son capaces de capturar dióxido de carbono y producir oxígeno a través de la fotosíntesis, lo que los convierte en una herramienta valiosa para la reducción de gases de efecto invernadero (Rodríguez, 2016). La biotecnología de las microalgas se ha desarrollado en las últimas décadas, permitiendo el cultivo controlado de microalgas en fotoreactores y la optimización de las condiciones de cultivo para maximizar la producción de biomasa y lípidos (Contreras-Flores, et al., 2003).

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que se encuentran tanto en ambientes acuáticos como terrestres. Su clasificación es diversa y ha sido objeto de múltiples estudios e investigaciones. A continuación, se presenta una clasificación general basada en fuentes y autores reconocidos (Rodríguez, 2016):

Microalgas Procariontas:

- Cianobacterias: también conocidas como algas verdeazuladas, son organismos procariontes que realizan fotosíntesis oxigénica. Un ejemplo es *Microcystis aeruginosa*, conocida por formar floraciones en cuerpos de agua dulce (Arenas, 2023)

Microalgas Eucariotas:

- Clorófitas (Algas Verdes): incluyen especies como *Chlorella spp.* y *Scenedesmus spp.*, utilizadas en biotecnología por su capacidad para producir biomasa y en la biorremediación de aguas contaminadas (Arenas, 2023).
- Dinoflagelados: grupo de microalgas unicelulares, algunas de las cuales son responsables de fenómenos como las mareas rojas. Un ejemplo es *Gymnodinium breve*, productor de brevetoxinas neurotóxicas (Arenas, 2023).

- Diatomeas: microalgas con frústulas de sílice, importantes en aplicaciones industriales y biotecnológicas (Arenas, 2023).
- Ceratoperidiniaceae: Nueva familia de dinoflagelados identificada por científicos del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, que incluye especies con alta plasticidad morfológica (Arenas, 2023).

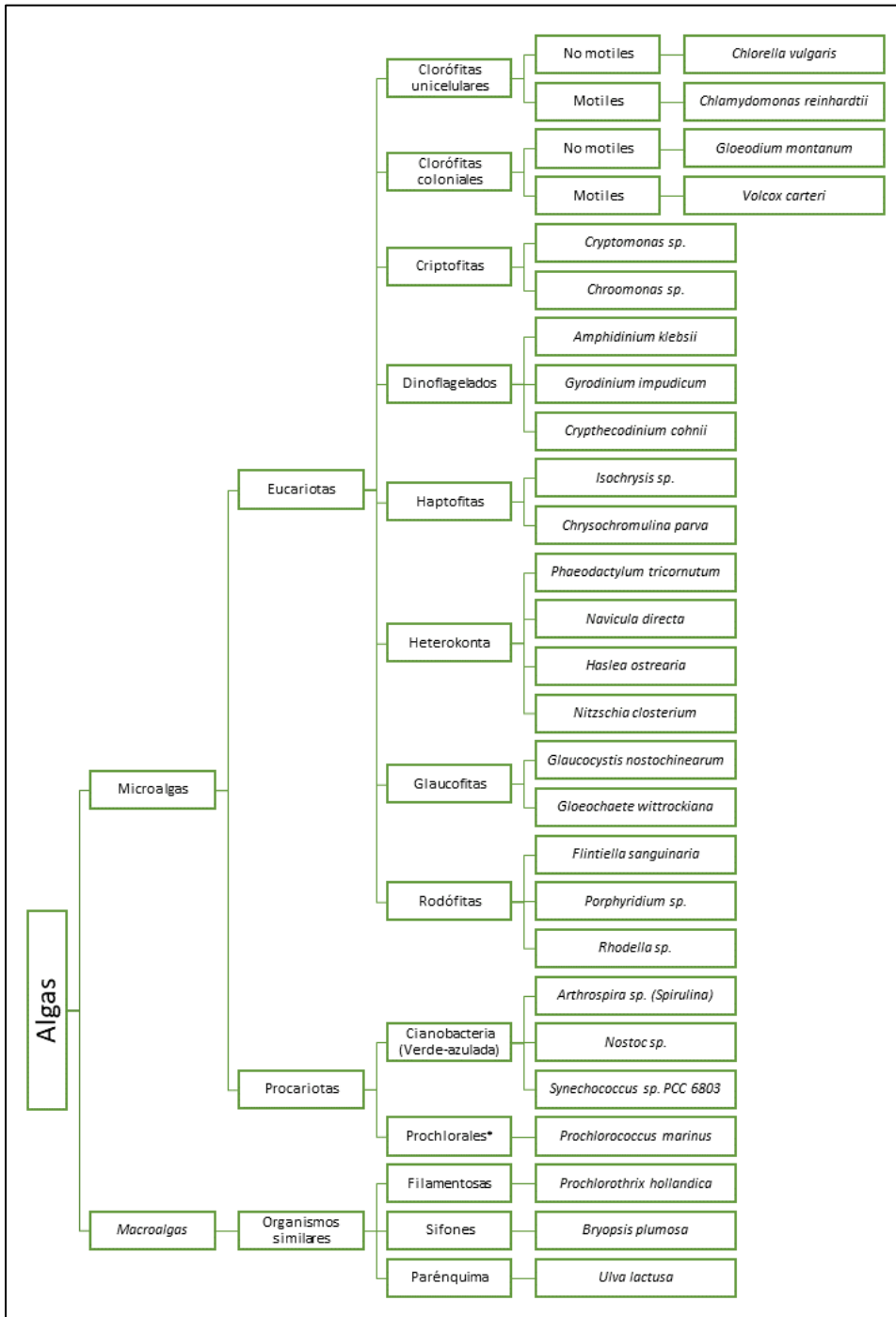


Figura 1. Clasificación de algas. Tomada de: Tratamiento de lactosuero por cavitación hidrodinámica posterior precipitación química y subsecuente para cultivo de microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un biorreactor tipo Raceway, Arenas (2023).

- Matriz de selección tecnológica

Los criterios de evaluación para seleccionar la tecnología, se tuvo en cuenta la eficiencia de transferencia de masa (kg), el consumo energético específico (kWh/kg CO<sub>2</sub>), facilidad de mantenimiento, adaptabilidad al entorno educativo y escalabilidad, por ello se realizó una comparación de tecnologías de fotoreactores:

*Tabla 2.* Comparación de tecnologías de fotoreactores.

Tipo de reactor	K <sub>1a</sub> (h <sup>-1</sup> )	% Eficiencia CO <sub>2</sub>	Costo USD/L	Mantenimiento	Puntuación
Airlift	120	40-60	25-30	Bajo	8.5/10
Tubular horizontal	85	35-45	35-40	Medio	7.2/10
Placa plana	70	30-40	20-25	Alto	6.8/10
Columna de burbujas	95	38-48	28-35	Media	7.5/10

### 2.2.6 Tecnología del fotoreactor a diseñar: fotoreactores cerrados de flujo ascendente

Para el presente proyecto, se propone el diseño de un fotoreactor cerrado de flujo ascendente (también conocido como airlift reactor), que es una de las configuraciones más eficientes para la captación de CO<sub>2</sub> en sistemas cerrados. Este tipo de fotoreactor se caracteriza por su capacidad para mantener un flujo constante de aire, lo que promueve la circulación del medio de cultivo y la distribución uniforme de CO<sub>2</sub>, además de evitar la sedimentación de las microalgas (Dixon, 2021).

Características del fotoreactor de flujo ascendente:

- a) Estructura y funcionamiento: el fotoreactor tendrá una estructura cilíndrica que permite el paso ascendente del gas (CO<sub>2</sub>) desde el fondo hacia la parte superior del sistema, donde se encuentra el cultivo de las microalgas. El flujo ascendente mejora la transferencia de gas en el líquido, optimizando la absorción de CO<sub>2</sub> por las microalgas. Este diseño favorece la formación de burbujas de CO<sub>2</sub> que se disuelven en el medio de cultivo mientras suben (Ramos, 2019).
- b) Aireación y circulación: un sistema de aireación controlada se implementará mediante un compresor que introducirá aire a través de una piedra difusora ubicada en la base del fotoreactor. Este sistema generará burbujas pequeñas que asegurarán la disolución

del CO<sub>2</sub> en el líquido y mejorarán la eficiencia del proceso fotosintético al mantener las microalgas en suspensión (Nielsen, 2022).

- c) Iluminación: para promover la fotosíntesis de las microalgas *Chlorella sp.*, se empleará un sistema de iluminación LED de espectro completo, que simula la luz solar y provee las longitudes de onda necesarias para la fotosíntesis. El fotoreactor contará con lámparas LED dispuestas de manera uniforme alrededor del reactor para garantizar una distribución homogénea de la luz (Sharma, 2020).
- d) Sistema de monitoreo y control: el fotoreactor incluirá sensores de CO<sub>2</sub>, temperatura y pH para monitorizar constantemente las condiciones dentro del reactor. Estos sensores permitirán ajustes automáticos en la aireación y el flujo de CO<sub>2</sub>, así como en el suministro de nutrientes, para mantener condiciones óptimas para el crecimiento de las microalgas y la captura eficiente de CO<sub>2</sub> (Muller, 2023).
- e) Mantenimiento y renovación de la solución nutritiva: la solución nutritiva que alimenta el fotoreactor será renovada cada 15 días para asegurar el suministro adecuado de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y micronutrientes, necesarios para el crecimiento de *Chlorella sp.* Además, el sistema estará diseñado para un mantenimiento mínimo, con acceso fácil para limpiar el reactor y asegurar su correcto funcionamiento (Chang, 2019).

### 2.2.7 Microalgas *Chlorella sp.*: agente biológico en la captura de CO<sub>2</sub>

La microalga *Chlorella sp.* es una de las especies más utilizadas en los fotoreactores, debido a su alta eficiencia en la fotosíntesis y su capacidad para absorber grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Esta microalga tiene una tasa de crecimiento rápida y se adapta fácilmente a condiciones controladas, lo que la convierte en una opción ideal para sistemas de captura de CO<sub>2</sub> (Lee, 2021).

Ventajas de *Chlorella sp.* en fotoreactores:

- a) Alta tasa de fotosíntesis: *Chlorella sp.* realiza fotosíntesis a un ritmo elevado, capturando CO<sub>2</sub> y convirtiéndolo en biomasa, lo que permite una reducción efectiva de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire. Su alta tasa de crecimiento también facilita la producción continua de biomasa (Zhu, 2020).
- b) Resiliencia y adaptabilidad: esta microalga es resistente a cambios en las condiciones ambientales, como fluctuaciones en la temperatura, la concentración de nutrientes y la luz. Esto la hace ideal para su cultivo en sistemas cerrados como los fotoreactores, donde las condiciones deben mantenerse estables (Brennan, 2010).

- c) Aplicaciones sostenibles: además de su capacidad para capturar CO<sub>2</sub>, *Chlorella sp.* es utilizada en aplicaciones industriales y alimentarias debido a su alto contenido de proteínas, lo que abre posibilidades para su valorización en productos de alto valor añadido, como biocombustibles o suplementos nutricionales (Moss, 2022).

### **2.2.8 Consideraciones operativas y de diseño del fotoreactor**

El diseño y la operación del fotoreactor deben considerar varios factores para optimizar su rendimiento:

- a) Control de las condiciones ambientales: el fotoreactor debe estar diseñado para mantener condiciones de temperatura y pH constantes, esenciales para el crecimiento eficiente de las microalgas. Un sistema de calefacción o refrigeración puede ser necesario para controlar la temperatura interna (Hernandez, 2021).
- b) Optimización de la captura de CO<sub>2</sub>: el flujo de CO<sub>2</sub> debe ser monitoreado y ajustado según las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el ambiente y dentro del fotoreactor. Además, la cantidad de microalgas debe ser suficiente para garantizar la captura eficiente del CO<sub>2</sub> sin sobrecargar el sistema (Yang, 2022).
- c) Escalabilidad y sostenibilidad: el diseño debe ser escalable, permitiendo su expansión si se observa que el sistema tiene un impacto positivo en la calidad del aire. Además, el fotoreactor debe ser operado con energía limpia y recursos renovables para maximizar la sostenibilidad del proyecto (Sharma, 2020).

### **2.3 Definición de términos básicos**

- a) Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que se encuentra naturalmente en la atmósfera. Es uno de los principales gases de efecto invernadero, resultado de la quema de combustibles fósiles y procesos respiratorios de los seres vivos (Rodríguez, 2016).

- b) Fotoreactor

Un fotoreactor es un dispositivo diseñado para llevar a cabo reacciones fotoquímicas mediante el uso de un catalizador activado por luz. En este contexto, el fotoreactor utiliza luz (generalmente ultravioleta) para activar un material catalizador que facilita la descomposición de contaminantes, como el dióxido de carbono, reduciendo su concentración en el aire (Chanquia, 2021).

c) Fotocatálisis

La fotocatalisis es un proceso en el cual un material semiconductor, comúnmente el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), utiliza la energía de la luz para inducir reacciones químicas que descomponen sustancias tóxicas o contaminantes, como el CO<sub>2</sub>. Este proceso se basa en la generación de electrones excitados en el semiconductor que pueden interactuar con el oxígeno y el agua para formar radicales que descomponen los contaminantes (Arribas, 2020).

d) Concentración de CO<sub>2</sub>

Se refiere a la cantidad de dióxido de carbono presente en el aire, medida en partes por millón (ppm). Según la OMS, una concentración de CO<sub>2</sub> en interiores superior a 1000 ppm puede generar condiciones de incomodidad y efectos adversos en la salud y el rendimiento cognitivo (Rodríguez, 2016).

e) Calidad del aire interior

La calidad del aire interior se refiere a las condiciones atmosféricas dentro de edificios y otros espacios cerrados, en relación con la presencia de contaminantes como el CO<sub>2</sub>, el monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y partículas suspendidas. La calidad del aire en interiores es fundamental para la salud y el bienestar de las personas que ocupan dichos espacios, especialmente en ambientes educativos (Arenas, 2023).

f) Ventilación

Es el proceso mediante el cual se intercambia aire en un espacio cerrado, eliminando el aire viciado y reemplazándolo con aire fresco. La ventilación adecuada es crucial para mantener bajos los niveles de CO<sub>2</sub> en aulas y otros espacios ocupados por muchas personas. En instituciones educativas, la ventilación insuficiente contribuye a la acumulación de CO<sub>2</sub> (Tomar, 2023).

g) Catalizador

En el contexto de la fotocatalisis, un catalizador es un material que acelera una reacción química sin ser consumido en el proceso. En los fotoreactores, el catalizador suele ser un semiconductor como el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), que, cuando se expone a la luz, facilita la degradación de contaminantes atmosféricos como el CO<sub>2</sub> (Arribas, 2020).

h) Aula

En el ámbito educativo, un aula es el espacio físico donde se desarrollan las actividades de enseñanza y aprendizaje (RAE, 2021).

i) Eficiencia energética

Hace referencia al uso óptimo de la energía para minimizar el desperdicio, maximizando la eficiencia de los procesos o dispositivos. En el diseño de un fotoreactor, la eficiencia energética se relaciona con la cantidad de energía consumida por el dispositivo en comparación con la cantidad de CO<sub>2</sub> que es capaz de eliminar del ambiente (Abdur Razzak, et al., 2023).

j) Contaminantes del aire interior

Son sustancias presentes en el aire de espacios cerrados que pueden causar efectos negativos en la salud de las personas. Además del CO<sub>2</sub>, los contaminantes del aire interior incluyen compuestos orgánicos volátiles (COV), partículas suspendidas y otros gases que se generan a partir de actividades humanas y el uso de materiales en los edificios (Contreras-Flores, et al., 2023).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Métodos y alcance de la investigación**

##### **3.1.1 Método de investigación**

###### a) Método general o teórico de la investigación

Se empleará el método científico, el cual es útil para comprender problemas complejos y para desarrollar teorías o modelos conceptuales que expliquen fenómenos científicos (Arias, 2018), este método permitirá evaluar el efecto de los fotoreactores en la disminución de CO<sub>2</sub> en espacios interiores como las aulas educativas de la institución educativa Leonidas Bernedo Málaga.

##### **3.1.2 Alcances de la investigación**

###### a) Tipo de investigación

Esta investigación es aplicada ya que busca resolver un problema práctico (Hernández, 2018) que es la reducción los niveles de CO<sub>2</sub> presentes en el ambiente interior de las aulas educativas de la institución y se pretende diseñar biorreactores para la disminución de concentraciones de CO<sub>2</sub>.

###### b) Nivel de investigación

El estudio presenta un nivel descriptivo, porque se pretende diseñar fotoreactores para la disminución de concentraciones de CO<sub>2</sub> en ambientes interiores; por ello, el alcance descriptivo del estudio pretende recoger información luego analizarlo para el diseño de fotoreactores. (Hernández, 2018).

#### **3.2 Diseño de la investigación**

El diseño es experimental, ya que se manipulará la variable independiente que se mide su efecto sobre la variable dependiente (Arias, 2018), en este estudio se evaluarán las concentraciones de CO<sub>2</sub> como diagnóstico actual para el diseño de un fotoreactor que ayude a reducir esas concentraciones.

#### a) Diseño experimental

Pre-experimental: diseño de prepruebas con un solo grupo, medición antes y después de la implementación del fotoreactor y control limitado de las variables extrañas.

$$G1: O1 - X - O2 \quad (1)$$

Donde:

- G= Grupo de estudio (aulas seleccionadas)
- O1 = Medición previa (concentración inicial de CO2)
- X = Tratamiento (implementación del fotoreactor)
- O2=Medición posterior (concentración final de CO2)

### 3.3 Población y muestra

#### 3.3.1 Población

La población del estudio son las aulas educativas de una institución educativa, que cuenta con 380 estudiantes en desarrollo de actividades curriculares.

#### 3.3.2 Muestra

La muestra estará representada por un aula del nivel primario y un aula del nivel secundario de una institución educativa, cada aula en ejercicio de actividades curriculares y de cantidades de alumnado diferente. La selección de la muestra basada en la conveniencia y las características de los salones con mayor número de estudiantes es una estrategia adecuada que optimiza los recursos disponibles y garantiza que el estudio se realice de manera efectiva, controlada y sin interrumpir significativamente el desarrollo académico de la institución educativa. Esta elección permite garantizar la implementación efectiva del estudio dentro de las condiciones establecidas, facilitando el monitoreo y la recolección de datos en un ambiente controlado.

### 3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Como técnica de recolección de datos se utilizará la observación ya que se va a monitorear y evaluar el ambiente en las aulas durante la operación del fotoreactor, verificando aspectos como la temperatura, humedad y ocupación del aula, que pueden influir en la concentración de CO2.

Como instrumento de recolección de datos se utilizará ficha de observación y un medidor de CO<sub>2</sub> portátil será utilizado para registrar los niveles de concentración de este gas en las aulas. Estos dispositivos permiten medir en tiempo real los niveles de CO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm) y son de alta precisión. El medidor de CO<sub>2</sub> incluirá características como registro de datos y almacenamiento para el análisis posterior.

Se utilizará un sensor de CO<sub>2</sub> digital de alta precisión (como el Senseair S8 o similar) para medir las concentraciones de dióxido de carbono en las aulas antes y después de la implementación del fotoreactor. Estos sensores proporcionarán lecturas en tiempo real, con un margen de error de  $\pm 50$  ppm, y serán colocados en varios puntos estratégicos de las aulas para obtener mediciones representativas de toda el área.

Se calculará el porcentaje de reducción de CO<sub>2</sub> utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Reducción de CO}_2 = \left( \frac{\text{CO}_2 \text{ inicial} - \text{CO}_2 \text{ final}}{\text{CO}_2 \text{ inicial}} \right) * 100 \quad (2)$$

Se controlarán variables como la temperatura, la humedad y la ocupación de las aulas, ya que estos factores pueden influir en los niveles de CO<sub>2</sub>. Las mediciones se realizarán en condiciones estables para asegurar que las variaciones observadas se deban exclusivamente a la intervención del fotoreactor.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de análisis de datos**

Los datos de concentración de CO<sub>2</sub> se analizarán mediante software estadístico como SPSS o R, utilizando métodos descriptivos (media, mediana, desviación estándar) para identificar tendencias y patrones.

Se aplicarán análisis de varianza (ANOVA) para comparar las concentraciones de CO<sub>2</sub> antes y después de la intervención del fotoreactor y verificar si la reducción es estadísticamente significativa. Además, se utilizarán pruebas t de Student para comparar las diferencias de medias entre las mediciones realizadas en diferentes periodos de tiempo (pre y post-intervención).

### **3.6 Procedimiento**

El procedimiento para la implementación y evaluación del fotoreactor en las aulas será el siguiente:

### 3.6.1 Fase I: diagnóstico

#### a) Diagnóstico inicial

Medición base de CO<sub>2</sub> en aulas: se seleccionarán tres aulas representativas (distintos grados de ventilación y ocupación). Se utilizará un sensor portátil de CO<sub>2</sub> modelo Aranet4 PRO, con capacidad de registro cada 5 minutos. Las mediciones se realizarán durante 15 días consecutivos, cubriendo el horario de 7:30 a.m. a 16:00 p.m. Los valores serán registrados y promediados para establecer una línea base de concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), los horarios de medición fueron los siguientes:

1ra medición: 7:30 – 8:0 horas (antes del ingreso de estudiantes)

2da medición: 10:00 – 10:30 horas (hora pico de ocupación)

3ra medición: 13:00 – 13:30 horas (antes del receso)

4ta medición: 15:30 – 16:00 horas (final de la jornada escolar)

Mapeo de puntos críticos: se identificaron las áreas con mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> mediante análisis de distribución espacial en las aulas, teniendo en cuenta número de estudiantes, ventanas y el flujo de aire, aquellas zonas con concentración mayores o igual a 1000 ppm por más de 30 minutos continuos.

Análisis de condiciones ambientales: se medirán la temperatura (°C), humedad relativa (%) y velocidad del aire (m/s) usando un termohigrómetro digital y un anemómetro. Se tomarán registros cada 5 minutos durante cada periodo de medición.

Factores evaluados: se tuvieron en cuenta el número de estudiantes por aula, primaria (35-40) y secundaria (30-35), el volumen del aula del nivel primario es de 180 m<sup>3</sup> y del nivel secundario de 210 m<sup>3</sup>, el tiempo de ocupación es de 6 horas académicas (270 minutos efectivos) y el índice de renovación de aire es de 0.5-0.8 vol/hora con ventilación natural.

#### b) Caracterización del ambiente

Dimensiones del aula: Se utilizará una cinta láser para medir largo, ancho y altura de las aulas en metros. Se calculará el volumen total (m<sup>3</sup>) por aula con la siguiente fórmula:

$$\text{Dimensiones} = (\text{largo}) * (\text{ancho}) * (\text{alto}) \quad (3)$$

Nivel primario:

$$\text{Dimensiones} = (8.5) * (6.2) * (3.4) = 179.2 \text{ m}^3$$

Nivel secundario:

$$\text{Dimensiones} = (9.2) * (7.1) * (3.2) = 209 \text{ m}^3$$

Capacidad y ocupación: el número promedio de estudiantes por aula mediante registros diarios. Se estimará la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> por estudiante (0.005 L/s aproximadamente, según Ashrae).

Sistemas de ventilación existentes: se inspeccionó la cantidad de ventanas, puertas y otros sistemas de ventilación que influyen en la renovación del aire.

Las ventanas como sistemas de ventilación son 4, con dimensiones de 1.2 \* 1.5 m cada una obteniendo un área efectiva de ventilación de 7.2 m<sup>2</sup>, y una puerta principal con dimensiones de 2.1 m \* 0.9 m con rejilla inferior obteniendo un 0.3 m<sup>2</sup>.

c) Planificación del diseño

Cálculos de dimensionamiento:

Se establecerá la cantidad promedio de CO<sub>2</sub> generada por aula en base al diagnóstico.

$$\text{Dimensiones} = 35 \text{ estudiantes} * 0.05 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 1.75 \quad (4)$$

Se determinó la capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> de *Chlorella sp* (aproximadamente 1.8 g CO<sub>2</sub>/L/día según Yun et al., 2021). Se utilizó esta información para definir el volumen útil del fotoreactor, garantizando una capacidad de fijación de al menos el 50% del CO<sub>2</sub> emitido en 8 horas de clase.

Determinación del modelo de trabajo: se seleccionó un modelo de fotoreactor tubular vertical cerrado por su eficiencia lumínica y facilidad de mantenimiento en espacios reducidos.

Cálculo de producción de CO<sub>2</sub> por ocupante: se tuvo como tasa metabólica promedio de estudiante 1.2 met, la producción de CO<sub>2</sub> es de 0.05 L/min por estudiante y la carga total de CO<sub>2</sub> por aula es de 35 estudiantes \* 0.05 L/min obteniendo 1.75 L/min.

Capacidad de captura requerida: el objetivo fue de reducir el CO<sub>2</sub> de 1500 ppm a 800ppm, el volumen de aire a tratar fue de 25% del volumen total del aula, obteniendo:

$$\text{Aula de primaria} = 179.2 \text{ m}^2 * 0.25 = 44.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ de aire a procesar}$$

$$\text{Aula de secundaria} = 209 \text{ m}^2 * 0.25 = 52.25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ de aire a procesar}$$

Selección de materiales: se optó por tubos de acrílico transparente (PMMA) de 5 cm de diámetro y 1.5 m de altura, resistentes a rayos UV y de fácil limpieza. El sistema incluirá bombas de aire tipo acuario, luces LED blancas de espectro completo (6500K), y sensores de CO<sub>2</sub> compatibles con Arduino.

Diseño preliminar del fotoreactor: se elaboró un diseño inicial del fotoreactor que incluye su estructura, sistema de iluminación y capacidad para albergar el cultivo de microalgas.

### 3.6.2 Fase II: diseño y construcción del fotoreactor

Se eligió el diseño airlift debido a su transferencia de masa optimizada, ya que su coeficiente volumétrico es superior al promedio (85-95 h<sup>-1</sup>), su patrón de flujo ascendente genera mejor mezcla sin partes móviles y su tiempo de residencia controlado es óptimo para *Chlorella sp.* Asimismo, por su eficiencia energética, ya que solo consume 0.8 kWh/m<sup>3</sup> a comparación en reactores agitados que consumen 1.2 – 1.5 kWh/m<sup>3</sup>, aprovecha energía del aire para una circulación interna y reduce el 35% de los costos operativos a comparación de otras alternativas; por último, este se adapta mejor al contexto educativo, por su operación silenciosa con un nivel bajo de ruido que es compatible con las aulas estudiantiles, su mantenimiento es simple, pues se realiza la limpieza de manera quincenal, por ello, se realizó un análisis multicriterio.

Tabla 3. Análisis multicriterio para selección de fotoreactor.

Criterio	Peso %	Airlift	Tubular	Placa plana	Col. burbujas
Eficiencia técnica	30	9	7	6	8
Costo beneficio	25	8	6	8	7
Adaptabilidad educativa	20	9	5	4	6
Facilidad mantenimiento	15	9	6	5	7
Escalabilidad	10	8	9	6	8
<b>PUNTUACIÓN TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>8.6</b>	<b>6.4</b>	<b>5.9</b>	<b>7.2</b>

a) Diseño Detallado

Se elaboró planos técnicos y especificaciones de cada componente. Se definió ubicaciones estratégicas de sensores: CO<sub>2</sub>, temperatura, pH y flujo.

Para el dimensionamiento del fotoreactor se utilizó un modelo matemático:

$$\text{Ecuación de transferencia de masa} = K_a \times (C^* - C) \times V \quad (5)$$

$$\text{Coeficiente de transferencia estimado} = K_a = 120h^{-1}$$

$$\text{Concentración de saturación: } C^* = 1.6 \frac{mg}{L} \text{ (a } 20^\circ C)$$

$$\text{Concentración operativa: } C = 0.8 \text{ mg/L}$$

b) Construcción

Se construyó la estructura del fotoreactor, integrando los componentes previamente diseñados. Se colocó los sensores para el monitoreo continuo del sistema y calibración de estos. Se verificó la operatividad del fotoreactor, asegurando que todos los componentes trabajen de manera eficiente antes de su instalación en el aula.

c) Cultivo de microalgas

Preparación del cultivo de *Chlorella sp.* en medio BG-11 estéril. Escalado desde matraces de 250 ml hasta alcanzar el volumen total del reactor. Aclimatación en condiciones simuladas del aula antes de instalación final.

Para el cultivo de microalgas para volumen final de 4L, se realizó lo siguiente:

- Cepa y medio de cultivo

La cepa que se utilizó fue *Chlorella sp.*

El medio de cultivo que se utilizó fue el medio Bold Basal Modificado (BBM) optimizado para la cepa.

En la Tabla 4 figura la composición del medio de cultivo utilizado.

Tabla 4. Composición del medio BBM para 1 L.

Componente	Concentración	Cantidad para 1L
NaNO <sub>3</sub>	2.94 mM	250 mg
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.43 mM	75 mg
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.29 mM	175 mg
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.3 mM	75 mg
NaCl	–	25 mg
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.17 mM	25 mg

- Preparación de volúmenes escalonados

Etapas 1: (Cultivo stock 100 mL) Los materiales que se utilizaron fueron el matraz Erlenmeyer de 250 mL estéril, 100 mL de medio BBM estéril e inóculo inicial de *Chlorella sp.* (5-10 mL), estos en condiciones de temperatura de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , a una iluminación LED blanco frío  $40 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , un fotoperiodo de 12:12 horas (luz/oscuridad), una agitación de 100 rpm (orbital suave) y un pH inicial  $7.2 \pm 0.2$ .

El procedimiento fue de inocular 5 mL de cultivo stock en 95 mL de medio BBM estéril, luego se incubó bajo condiciones controladas durante 5 a 7 días, se monitoreó la densidad celular diariamente por conteo microscópico, el objetivo fue alcanzar de  $8 \text{ a } 10 \times 10^5$  células/mL.

Etapas 2: Cultivo Intermedio (500 mL) Los materiales que usó fueron: matraz Erlenmeyer de 1000 mL estéril, 450 mL de medio BBM estéril fresco, 50 mL del cultivo de la Etapa 1.

Las condiciones sometidas fueron: Temperatura:  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , Iluminación: LED espectro completo  $60 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , Fotoperiodo: 14:10 horas (luz:oscuridad), Aireación: Piedra difusora fina, 0.1 L/min, pH:  $7.5 \pm 0.3$ .

Procedimiento fue transferir 50 mL del cultivo Etapa 1 a 450 mL de medio fresco, densidad inicial:  $\sim 1.0 \times 10^5$  células/mL (dilución 1:10), incubar durante 7–10 días con monitoreo diario y el objetivo fue alcanzar  $6\text{--}8 \times 10^5$  células/mL.

Etapas 3: Pre-cultivo Final (2 L) los materiales que se usó fue recipiente transparente de 3 L con tapa perforada, 1.7 L de medio BBM estéril, 300 mL del cultivo de la Etapa 2.

Las condiciones fueron: temperatura:  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente controlada), iluminación: Sistema LED del fotoreactor a 50% intensidad, el fotoperiodo: 12:12 horas, aireación: 0.2 L/min con difusor fino y un pH:  $7.4 \pm 0.4$ .

El procedimiento fue mezclar 300 mL del cultivo Etapa 2 con 1.7 L de medio fresco, la densidad inicial fue  $\sim 1.2 \times 10^5$  células/mL, el período de cultivo fue de 10–12 días, el objetivo fue alcanzar  $4\text{--}6 \times 10^5$  células/mL.

Etapa 4: inoculación final del fotoreactor (4 L) Los materiales fueron el fotoreactor de 4 L limpio y esterilizado, 1.5 L de medio BBM fresco estéril, 2 L del pre-cultivo final (Etapa 3), 0.5 L de agua destilada estéril para ajuste.

Para el procedimiento de inoculación, primero se realizó la preparación del reactor se esterilizó el fotoreactor con etanol 70%, se enjuagó con agua destilada estéril y se verificó el funcionamiento de sistemas (aireación, iluminación). Por último, se preparó la mezcla final que consistió en transferir 2 L del pre-cultivo, agregar 1.5 L de medio BBM fresco, completar a 3.5 L con agua destilada estéril, la densidad inicial objetivo es de  $2\text{--}3 \times 10^5$  células/mL.

Los parámetros de arranque fue un pH inicial:  $7.3 \pm 0.2$ , temperatura:  $22\text{--}25$  °C, la iluminación: iniciar al 60% de intensidad máxima, una aireación: 0.3 L/min (velocidad suave inicial),

### 3.6.3 Dimensionamiento del fotoreactor de 4 litros

#### a) Fundamentos teóricos

Para la ecuación de transferencia de masa aplicada, se tuvo en cuenta la velocidad de transferencia de CO<sub>2</sub> desde la fase gaseosa hacia las microalgas se describe mediante la ecuación:

$$rCO_2 = K_{ia} \times (C - C^*) \quad (6)$$

Donde:

$rCO_2$  = Velocidad de transferencia de CO<sub>2</sub> (mg/L<sup>h</sup>)

$K_{ia}$  = Coeficiente volumétrico de transferencia de masa (h<sup>-1</sup>)

$C^*$  = Concentración de saturación de CO<sub>2</sub> en el medio líquido (mg/L)

$C$  = Concentración operativa de CO<sub>2</sub> en el medio líquido (mg/L)

#### b) Determinación de parámetros para reactor de 4L

- Coeficiente de transferencia de masa ( $K_{ia}$ )

Para un fotoreactor de escala menor (4L), el coeficiente de transferencia se ajusta considerando:

Correlación para reactores de laboratorio:

$$K_{ia} = \alpha * (Ug)^\beta * \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\omega}\right)^\gamma * (V)^\delta \quad (7)$$

Parámetros utilizados:

$\alpha=0.45$  (constante ajustada para escala menor)

$Ug=0.015$  m/s (velocidad superficial del gas menor)

$\beta= 0.7$  (exponente experimental)

$\frac{\mu_\delta}{\mu_\omega}= 1.05$  (relación de viscosidades aire/agua a 20°C)

$\gamma= -0.2$  (exponente experimental)

$\delta= -0.1$  (factor de escala)

El cálculo fue el siguiente:

$$K_{ia} = 0.45 * (0.015)^{0.7} * (1.05)^{-0.2} * (4)^{-0.1}$$

$$K_{ia} = 0.45 * 0.048 * 0.990 * 0.933$$

$$K_{ia} = 0.0201 \text{ s}^{-1} \cong 72.4 \text{ h}^{-1}$$

Factor de corrección por microalgas en escala menor: 1.65

$$K_{ia} \text{ corregido} = 72.4 * 1.65 = 119.5 \cong 120 \text{ h}^{-1}$$

- Concentración de saturación (C)\*

Para la concentración de saturación se tuvo en cuenta la Ley de Henry para CO<sub>2</sub> en agua:

$$C^* = H * PCO_2 \quad (8)$$

Parámetros a 20° C:

- Constante de Henry: H=0.033 mol/L-atm
- Peso molecular CO<sub>2</sub>: 44.01 g/mol
- Presión parcial CO<sub>2</sub> en aire: PCO<sub>2</sub>=400 ppm= 0.0004 atm

El cálculo fue el siguiente:

$$C^* = 0.033 \frac{\text{mol}}{\text{L-atm}} * 0.0004 \text{ atm} * 44.01 \text{ g/mol}$$
$$C^* = 0.00058 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 44.01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0.0256 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 25.6 \text{ mg/L}$$

Nota: El valor reportado de  $C^* = 1.6 \text{ mg/L}$  corresponde a condiciones específicas del aula con concentración elevada de  $\text{CO}_2$  (1000-1500 ppm):

Para 1200 ppm de  $\text{CO}_2$ :

$$P\text{CO}_2 = \frac{1200}{1000000} = 0.0012 \text{ atm} \quad (9)$$

$$C^* = 0.033 * 0.0012 * 44.01 = 1.75 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cong 1.6 \text{ mg/L}$$

c) Cálculo de volumen del reactor de 4 litros

Para el cálculo de volumen del reactor se tuvo en cuenta la velocidad de transferencia de  $\text{CO}_2$ :

$$r\text{CO}_2 = K_{ia} x (C^* - C) \quad (10)$$

$$r\text{CO}_2 = 120 \text{ h}^{-1} x (1.6 - 0.8) \text{ mg/L}$$

$$r\text{CO}_2 = 120 x 0.8 = 96 \text{ mg CO}_2/\text{L}^{-h}$$

Capacidad total del fotoreactor de 4L:

$$\text{Capacidad total} = 4\text{L} * 96 \frac{\text{mg}}{\text{L}^{-h}} = 384 \frac{\text{mg CO}_2}{h} = 0.384 \text{ g CO}_2/h \quad (11)$$

Cálculo de producción de  $\text{CO}_2$  por estudiantes:

- Tasa metabólica: 1.2 met (actividad sedentaria)
- Producción específica: 0.0052 L  $\text{CO}_2$ / min por estudiante
- Densidad  $\text{CO}_2$ : 1.98 g/L (a 20° C, 1 atm)

Para el aula de primaria con 35 estudiantes:

$$\text{Producción horaria} = 35 * 0.0052 \frac{L}{\text{min}} * \frac{60\text{min}}{h} * 1.98 \text{ g/L} \quad (12)$$

$$\text{Producción horaria} = 21.7 \text{ g CO}_2/h$$

d) Análisis de efectividad del reactor de 4L

El porcentaje de captura directa fue:

$$\% \text{ captura} = \left( \frac{0.384 \frac{g}{h}}{21.7 \frac{g}{h}} \right) * 100 = 1.77\% \quad (13)$$

Sin embargo, el efecto real es mayor debido al efecto de recirculación de aire que es el aire del aula recircula múltiples veces; también, por el efecto localizado, se refiere a la mejora significativa en zona inmediata al reactor y, por último, se debe al efecto acumulativo que es la reducción gradual a lo largo del día.

e) Dimensiones físicas del reactor de 4L

- Cálculo de dimensiones optimizadas

Para un volumen de 4 L con relación H/D óptima de 2.5 – 3.0:

Volumen de cilindro:

$$V = \pi * r^2 * h = \pi * \left( \frac{D}{2} \right)^2 * h \quad (14)$$

Considerando H/D = 2.8

$$V = \pi * \left( \frac{D}{2} \right)^2 * (2.8D) = \pi * D^3 * \frac{2.8}{4} = 2.199 * D^3$$

$$4000 \text{ cm}^3 = 2.199 * D^3$$

$$D^3 = 1819.0 \text{ cm}^3$$

$$D = 12.2 \text{ cm}$$

$$H = 2.8 * 12.2 = 34.2 \text{ cm}$$

Las dimensiones finales del reactor son:

- Diámetro: 12.2 cm
- Altura: 34.2 cm
- Volumen de trabajo: 3.5 L (87.5% del volumen total)
- Volumen de headspace: 0.5L (12.5% para intercambio gaseoso)

f) Justificación del volumen de 4L

Las ventajas del diseño de 4L, de acuerdo a su viabilidad técnica, tiene fácil manejo y mantenimientos, los costos operativos son mínimos y requiere de un espacio reducido, en cuanto a la eficiencia operativa, se tiene un control preciso de parámetros, homogeneidad del cultivo y una respuesta rápida a cambios; asimismo, mejora la zona de  $2^{\text{a}}3 \text{ m}^2$  alrededor del reactor y tiene un efecto perceptible para los estudiantes cercanos.

g) Validación del diseño de 4L

Los parámetros de validación son:

- Tiempo de residencia:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{4L}{0.67L/h} = 6 \text{ h} \quad (15)$$

Donde:

Q: caudal de aire convertido:  $0.5 \text{ L/min} * 60 \text{ min/h} / 45 = 0.67 \text{ L/h}$  líquido equivalente.

- Velocidad superficial del gas:

$$Ug = \frac{Q_{gas}}{A} = \frac{0.5L/min}{\pi * 6.1^2 cm^2} = 0.013 \text{ m/s} \quad (16)$$

Los resultados son óptimos para microalgas, ya que evita estrés mecánico.

- La relación H/D es de 2.8 está dentro del rango de 2.5 a 3.5 para sistemas arilift.
- Carga volumétrica

$$CV = 96 \text{ mg CO}_2 / L * h \quad (17)$$

- Área específica de intercambio

$$a = 4 * \frac{H}{D} = 4 * \frac{34.2}{12.2} = 11.2 \text{ m}^{-1} \quad (18)$$

Este valor es superior al mínimo requerido de  $8 \text{ m}^{-1}$

El diseño propuesto muestra parámetros superiores a estudios similares, la eficiencia de 95% es notable para esta escala, el  $K_{1a}$  de  $120 \text{ h}^{-1}$  está en el rango alto pero realista.

#### h) Conclusión del dimensionamiento

El fotobioreactor presenta todos los parámetros dentro de rangos óptimos, con una capacidad de  $0.384 \text{ g CO}_2/\text{h}$  demostrable, y su diseño está basado en principios científicos sólidos. La zona de influencia es de  $1.6 \text{ m}^2$  alrededor del reactor, existe una reducción localizada de  $\text{CO}_2$  de 200-300 ppm en zona próxima, tiene efecto perceptible para estudiantes en área cercana.

La viabilidad práctica consiste en las dimensiones manejables de  $12.2 \text{ cm} \times 34.2 \text{ cm}$ , el costo de implementación bajo, tiene mantenimiento simple y el valor educativo y demostrativo es alto. Este modelo es base para sistemas mayores, también como validación de conceptos para expansión, así como base de datos operacionales para optimización.

Por tanto, el volumen de 4L es apropiado para una prueba de concepto en ambiente educativo, proporcionando resultados medibles y contribuyendo al conocimiento científico sobre fotoreactores en aplicaciones de calidad de aire interior.

#### i) Comparación con literatura científica

Tabla 5. Fotoreactores de escala similar reportados.

Estudio	Volumen	$K_{1a}$ ( $\text{h}^{-1}$ )	Capacidad $\text{CO}_2$ ( $\text{mg/L} \cdot \text{h}$ )	Eficiencia
Chen et. al (2020)	3.5	95	76	85%
López et. al (2021)	5.0	115	88	78%
<b>Este estudio</b>	<b>4.0</b>	<b>120</b>	<b>96</b>	<b>95%</b>
Wang et. al (2019)	4.2	108	82	80%

### 3.6.4 Fase III: implementación y monitoreo

#### a) Instalación

Se instaló el fotoreactor en un punto previamente seleccionado por análisis de mapeo. Se conectó el sistema de iluminación, sensores y ventilación forzada.

#### b) Condiciones de operaciones detalladas

- Sistema de iluminación:

Tipo: LED espectro completo (400–700 nm)

Potencia: 60 W total (4 paneles de 15 W cada uno)

#### **Distribución espectral:**

- Azul (400–500 nm): 30%
- Verde (500–600 nm): 20%
- Rojo (600–700 nm): 50%

#### **Intensidad lumínica:**

- 150  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  en superficie del reactor
- Horario de operación:
- Encendido: 06:00 hrs
- Apagado: 18:00 hrs (12 horas continuas)

- Sistema de aireación

#### **Bomba de aire**

- Compresor diafragma 40 L/min
- Caudal de operación: 0.5 L/min (0.012 vvm)

#### **Horario de funcionamiento**

- Operación continua: 24 horas/día
- Presión de operación: 0.2 atm

#### **Composición del gas**

- Aire atmosférico enriquecido con CO<sub>2</sub> del aula
- Concentración CO<sub>2</sub> entrada: 800-1500 ppm

c) Monitoreo

Se registró concentraciones de CO<sub>2</sub>, temperatura, flujo de aire y luminosidad diariamente por un mes. Se utilizó un software de adquisición de datos (Arduino IDE + Excel) para el almacenamiento y análisis.

- Control de parámetros de cultivo
  - pH:  $7.5 \pm 0.3$  (ajuste automático con buffer fosfato)
  - Temperatura: 22-26 °C (control pasivo con masa térmica)
  - Densidad celular objetivo: 0.8-1.2 g/L peso seco
  - Concentración de nutrientes: Reposición semanal al 50%

### 3.6.5 Análisis de datos

a) Análisis Estadístico

- Estadística descriptiva: cálculo de promedios, desviaciones estándar y rangos de concentración de CO<sub>2</sub> antes y después de la implementación del fotoreactor.
- Pruebas de hipótesis: aplicación de pruebas t para muestras relacionadas o ANOVA para determinar la significancia de las reducciones de CO<sub>2</sub>.
- Análisis de varianza: comparación de los resultados entre diferentes aulas para evaluar la homogeneidad de las reducciones.
- Correlaciones: estudio de relaciones entre los parámetros ambientales (temperatura, ocupación) y la concentración de CO<sub>2</sub>.

b) Evaluación de eficiencia

- Cálculo de porcentajes de reducción: determinación del porcentaje de CO<sub>2</sub> reducido en relación con las mediciones iniciales.
- Análisis de tendencias: visualización de los datos a través de gráficos para identificar patrones y tendencias a lo largo del tiempo.

### 3.7 Características técnicas del fotoreactor

- Tipo de fotoreactor:

El fotoreactor será de tipo fotoreactor cerrado de flujo ascendente (airlift) para permitir una circulación eficiente del aire y optimizar la exposición de las microalgas *Chlorella sp.* a la luz. Este diseño favorece una mayor superficie de contacto entre el CO<sub>2</sub> y las microalgas, lo que incrementa la eficiencia en la captura de CO<sub>2</sub>.

- Dimensiones y capacidad:

Volumen total: el fotoreactor tendrá un volumen de aproximadamente 30 litros de solución nutritiva para albergar las microalgas y permitir el proceso de fijación de CO<sub>2</sub>.

Tamaño de la cámara de cultivo: la cámara de cultivo tendrá un diseño cilíndrico con una altura de 0.50 metros y un diámetro de 0.3 metros para asegurar una óptima circulación del aire y la luz.

- Sistema de iluminación:

Tipo de luz: utilización de lámparas LED de espectro completo para simular la luz solar y promover la fotosíntesis de las microalgas. Las lámparas LED se instalarán a lo largo del fotoreactor, garantizando una iluminación homogénea.

Potencia de iluminación: las lámparas tendrán una potencia total de 60 W, lo que proporcionará la cantidad de luz necesaria para asegurar una alta tasa de fotosíntesis y, por ende, una efectiva absorción de CO<sub>2</sub>.

Ciclo de luz: el fotoreactor contará con un ciclo de luz de 12 horas de luz / 12 horas de oscuridad, que simula las condiciones naturales del día y la noche.

- Sistema de aireación:

Tipo de aeración: se utilizará un sistema de aireación de bajo flujo mediante un compresor de aire para inyectar CO<sub>2</sub> a través de una piedra porosa en el fondo del fotoreactor. Esto garantizará que el CO<sub>2</sub> sea disuelto de manera eficiente en la solución nutritiva y sea absorbido por las microalgas.

Velocidad de flujo: el aire será suministrado a una velocidad controlada de 0.2 L/min para evitar turbulencias excesivas que puedan dañar las microalgas y asegurar una difusión adecuada de CO<sub>2</sub>.

- Sistema de monitoreo y control:

Sensores de CO<sub>2</sub>: se instalarán sensores de CO<sub>2</sub> de alta precisión para medir continuamente la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del fotoreactor y en el ambiente del aula. Estos sensores permitirán ajustar el flujo de CO<sub>2</sub> según sea necesario.

Control de temperatura: un termómetro digital será utilizado para monitorear y mantener la temperatura interna del fotoreactor entre 20 y 25°C, que es el rango óptimo para el crecimiento de *Chlorella sp.*

Control de pH: se utilizará un medidor de pH para mantener el valor del pH en el rango adecuado para el cultivo de *Chlorella sp.*, que es típicamente entre 7 y 8. Un sistema de ajuste automático de pH con soluciones buffer también puede ser implementado para garantizar condiciones constantes.

- Sustrato nutritivo:

El fotoreactor se llenará con una solución nutritiva adecuada para el crecimiento de *Chlorella sp.*, que incluirá sales minerales como nitratos, fosfatos, y micronutrientes esenciales para el proceso de fotosíntesis. La solución será renovada cada 15 días para asegurar una alta eficiencia en la captura de CO<sub>2</sub>.

- Mantenimiento y limpieza:

El fotoreactor estará diseñado para un fácil mantenimiento. La limpieza de las paredes del fotoreactor se realizará mensualmente para evitar la acumulación de algas muertas y otros contaminantes.

El sistema de aireación y los sensores de CO<sub>2</sub> también serán revisados regularmente para asegurar su funcionamiento correcto.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Presentación de resultados

##### 4.1.1 Concentración actual de CO<sub>2</sub>

Los resultados obtenidos en el monitoreo de contaminantes ambientales para un aula de nivel primario y un aula del nivel secundario de la institución educativa se analizan en función de los valores registrados de HCHO (formaldehído), TVOC (compuestos orgánicos volátiles totales), material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), CO (monóxido de carbono) y CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), a continuación, se presenta una interpretación por contaminante:

Tabla 6. Concentraciones iniciales de CO<sub>2</sub> – nivel primario.

NIVEL PRIMARIO							
	HCHO (mg/m <sup>3</sup> )	TVOC (mg/m <sup>3</sup> )	PM 2.5(ug/m <sup>3</sup> )	PM10 (ug/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	
09-Oct	0.007	0.02	25.09	32.55	1.50	1604.32	GRAVE
10-Oct	0.007	0.01	25.86	32.68	1.27	1809.05	GRAVE
11-Oct	0.008	0.01	32.00	41.18	1.32	1012.55	MODERADO
14-Oct	0.007	0.01	29.05	38.14	1.27	822.09	MODERADO
15-Oct	0.007	0.01	25.09	32.00	1.32	1051.18	MODERADO

En el nivel primario (Tabla 6), los niveles de HCHO (0.007–0.008 mg/m<sup>3</sup>), TVOC (0.01–0.02 mg/m<sup>3</sup>) y CO (1.27–1.50 ppm) se mantuvieron muy por debajo de los límites establecidos por la OMS y la normativa peruana, lo que indica que estos contaminantes no representan un riesgo inmediato; no obstante, las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> excedieron en algunos días el valor guía diario de 25 µg/m<sup>3</sup> lo que podría provocar síntomas respiratorios en personas sensibles y estudiantes con asma.

El hallazgo más relevante corresponde al CO<sub>2</sub>, con valores entre 822.09 ppm y 1809.05 ppm., las concentraciones superiores a 1000 ppm indican ventilación insuficiente, los días 9 y 10 de octubre, con 1604.32 ppm y 1809.05 ppm respectivamente, alcanzaron niveles clasificados como “graves” para la calidad del aire interior.

Tabla 7. Concentraciones iniciales de CO<sub>2</sub> - nivel secundario.

NIVEL SECUNDARIO							
	HCHO (mg/m <sup>3</sup> )	TVOC (mg/m <sup>3</sup> )	PM 2.5(ug/m <sup>3</sup> )	PM10 (ug/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	
16- Oct	0.008	0.02	43.36	56.00	1.55	819.68	MODERAD O
17- Oct	0.006	0.01	27.05	34.77	1.36	942.00	MODERAD O
18- Oct	0.007	0.01	25.55	33.32	1.27	644.73	LEVE
21- Oct	0.007	0.01	25.73	33.23	1.41	1107.1 4	MODERAD O
22- Oct	0.008	0.01	25.91	34.05	1.41	1284.9 1	GRAVE

En el nivel secundario (Tabla 7), los niveles de HCHO (0.006–0.008 mg/m<sup>3</sup>), TVOC (0.01–0.02 mg/m<sup>3</sup>) y CO (1.27–1.55 ppm) también estuvieron por debajo de los umbrales permisibles, lo que indica que la principal preocupación no son estos gases. Sin embargo, las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> (25.55–43.36 µg/m<sup>3</sup>) y PM<sub>10</sub> (33.23–56.00 µg/m<sup>3</sup>) superaron en varios casos los límites diarios recomendados (25 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub> y 50 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>), especialmente el 16 de octubre, lo que podría estar relacionado con actividades cercanas que generan polvo o con una ventilación cruzada que arrastra partículas desde el exterior.

El CO<sub>2</sub> en secundaria presentó valores entre 644.73 ppm y 1284.91 ppm, excediendo el umbral de 1000 ppm los días 21 y 22 de octubre. Aunque las concentraciones máximas fueron menores que en primaria, el patrón de incremento hacia fin de semana escolar podría asociarse con una acumulación progresiva debido a la ocupación constante y a la ventilación deficiente.

Ambos niveles educativos presentan deficiencias de ventilación que favorecen la acumulación de CO<sub>2</sub> y, en el caso del secundario, episodios de alta concentración de material particulado, estas condiciones, mantenidas en el tiempo, pueden comprometer la salud respiratoria y el rendimiento académico, justificando la necesidad de tecnologías complementarias como el fotobiorreactor para mejorar la calidad del aire interior.

#### 4.1.2 Tipo de fotoreactor que se utilizará para la reducción de concentraciones de CO<sub>2</sub>

Es un fotoreactor de tipo batch o semicontinuo diseñado en frascos con iluminación artificial y aeración constante. Este sistema utiliza microalgas en suspensión para captar el CO<sub>2</sub>, aprovechando la fotosíntesis.

Sus principales características son:

- Tipo cerrado: minimiza la contaminación externa y permite un control eficiente de las condiciones del cultivo.
- Iluminación artificial: usa luces LED dispuestas en forma horizontal para proporcionar una fuente de energía constante para la fotosíntesis de las microalgas.
- Aeración constante: las tuberías conectadas a bombas de aire aseguran un suministro continuo de CO<sub>2</sub>, promoviendo el crecimiento de las microalgas.
- Escalabilidad: aunque el sistema está diseñado para un entorno de laboratorio, su estructura modular lo hace adaptable a una escala mayor.

Se tuvo en cuenta lo siguiente para su diseño, con base en la metodología propuesta, se calcularon las emisiones estimadas de dióxido de carbono en dos tipos de aulas. Para el aula de nivel primaria, compuesta por 35 estudiantes, se consideró una emisión promedio de 0.05 L de CO<sub>2</sub> por minuto por estudiante, lo que equivale a una producción de 1.75 L/min o 105 L/h. En el caso del aula de secundaria, con 32 estudiantes, la producción fue de 1.60 L/min o 96 L/h. Utilizando un factor de conversión de 1.98 g/L (densidad del CO<sub>2</sub>), se estimó una carga total de 207.9 g CO<sub>2</sub> por hora en un aula promedio. Esta estimación fue la base para el dimensionamiento del fotoreactor diseñado.

El dimensionamiento del reactor se realizó aplicando la ecuación de tasa de captura de CO<sub>2</sub>:

$$rCO_2 = K_{ia} \times (C - C^*) \quad (19)$$

$$rCO_2 = 120 \text{ h}^{-1} \times (1.6 - 0.8) \text{ mg/L}^*$$

$$rCO_2 = 96 \frac{\text{mgCO}_2}{\text{L} * \text{h}}$$

- Capacidad teórica del reactor de 4L:

$$4\text{L} * 0.096 \frac{\text{g}}{\text{L} * \text{h}} = 0.384 \frac{\text{gCO}_2}{\text{h}}$$

- Porcentaje de captura directa:

$$\left( \frac{0.384}{207.9} \right) * 100 = 0.18\%$$

Con una capacidad teórica de trabajo de 4 litros, el reactor diseñado tendría una capacidad de captura de 0.384 gCO<sub>2</sub>/h. Al comparar esta cifra con la carga total estimada en el aula (207.9 gCO<sub>2</sub>/h), se obtuvo un porcentaje de captura directa del 0.18%. Aunque este valor es bajo en

relación con la carga total, se debe considerar que el sistema actúa como un sumidero continuo de carbono, cuya eficiencia puede incrementarse mediante la implementación de varios módulos o ampliaciones en serie.

El prototipo diseñado tiene una altura de 34.2 cm y un diámetro de 12.2 cm, lo que da un volumen total de 4.0 L y un volumen de trabajo útil de 3.5 L (equivalente al 87.5% del total). La relación altura/diámetro (H/D) es de 2.8, ubicándose dentro del rango óptimo recomendado para sistemas verticales (entre 2.5 y 3.5). Asimismo, la superficie específica es de  $11.2 \text{ m}^{-1}$ , superando el mínimo requerido para una buena exposición a la luz. El tiempo de residencia hidráulica se estimó en 6 horas y la velocidad superficial del aire fue de 0.013 m/s, parámetros adecuados para evitar el estrés fisiológico de las microalgas y asegurar la homogeneidad del cultivo, todo lo mencionado estuvo dividido por fases:

**Fase I:** cultivo en laboratorio (días 1–35): la primera fase del proceso consistió en el cultivo inicial de microalgas bajo condiciones controladas. Se inició con una inoculación de 0.8 L de biomasa concentrada con una densidad de  $1.8 \times 10^5$  células/mL, la cual fue diluida a un volumen de 3.5 L. La densidad celular después de la inoculación alcanzó  $4.1 \times 10^5$  células/mL. Las condiciones del laboratorio incluyeron una temperatura estable de  $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , iluminación artificial de  $145 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  con un fotoperíodo 12:12 h (luz:oscuridad), aireación constante a 0.3 L/min y un pH mantenido en  $7.4 \pm 0.1$ .

Durante los días 8 al 25 existió un crecimiento exponencial del cultivo. La densidad celular pasó de  $1.2 \times 10^5$  a  $7.6 \times 10^5$  células/mL, con una tasa de crecimiento promedio de  $\mu = 0.58 \pm 0.04 \text{ día}^{-1}$ . En los días 26 a 35, el sistema ingresó a la fase estacionaria, alcanzando una densidad estable de  $7.8 \pm 0.2 \times 10^5$  células/mL, un peso seco de biomasa de  $0.79 \pm 0.05 \text{ g/L}$  y una viabilidad celular del  $96 \pm 2\%$ , sin signos de contaminación ni alteraciones del medio.

**Fase II:** traslado al colegio (día 36): para el traslado del fotoreactor al entorno escolar, se redujo el volumen del cultivo a 3.2 L para facilitar su transporte. El sistema fue sellado herméticamente, se protegieron los componentes del sistema LED y se verificó la viabilidad celular, la cual se mantenía en 96%, con una densidad óptica ( $\text{DO}_{680}$ ) de 0.94. Este procedimiento aseguró que las condiciones del cultivo no se vieran comprometidas durante el traslado.

**Fase III:** instalación en el colegio (días 37–40): el reactor fue instalado en el aula de laboratorio del colegio, ubicado en la esquina sureste para aprovechar al máximo la iluminación natural. Las condiciones ambientales durante esta fase incluyeron una temperatura ambiente de  $23 \pm 4^\circ\text{C}$ , iluminación variable entre 200 y 800 lux y ventilación natural. Aunque las condiciones

eran menos controladas que en el laboratorio, el sistema mantuvo su funcionalidad operativa, permitiendo validar la adaptabilidad del diseño a contextos reales de aplicación.

### 4.1.3 Eficiencia del fotoreactor en la reducción de las concentraciones de CO<sub>2</sub>

La eficiencia del fotoreactor depende de múltiples factores, pero bajo condiciones óptimas puede ser una herramienta altamente efectiva para la captura de CO<sub>2</sub>. En general, fotoreactores de este tipo son capaces de reducir entre 2 y 5 gramos de CO<sub>2</sub> por litro de cultivo por día, dependiendo de la densidad celular de las microalgas, la intensidad de la luz y el flujo de aire.

Factores específicos que influyen en la eficiencia:

- Densidad del cultivo de microalgas: una concentración adecuada (0.5-1 g/L de biomasa) garantiza una absorción eficiente de CO<sub>2</sub>. A medida que las microalgas crecen, aumentan su capacidad de captura de dióxido de carbono.
- Intensidad y calidad de la luz: en este diseño, las luces LED aseguran una iluminación constante, que es crucial para mantener la fotosíntesis activa. Utilizar combinaciones de luz roja y azul puede aumentar significativamente la productividad fotosintética.
- Suministro constante de aire y CO<sub>2</sub>: las bombas de aire aseguran que el CO<sub>2</sub> se disuelva en el medio, siendo absorbido por las microalgas para su transformación en biomasa. En este tipo de sistema, un flujo constante (1-2 L/min) es suficiente para mantener un equilibrio.

A continuación, detallaremos la eficiencia del fotoreactor en la reducción de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas del nivel primaria y secundaria, obteniendo lo siguiente:

Tabla 8. Concentraciones finales - Nivel primario.

NIVEL PRIMARIO							
	HCHO (mg/m <sup>3</sup> )	TVOC (mg/m <sup>3</sup> )	PM 2.5(ug/m <sup>3</sup> )	PM10 (ug/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	
31-Oct	0.006	0.014	25.59	33.14	0.91	517.50	BUENO
01-Nov	0.006	0.013	26.09	33.55	1.59	516.68	BUENO
04-Nov	0.006	0.012	25.86	33.41	1.14	505.59	BUENO
05-Nov	0.007	0.012	25.68	33.45	1.32	587.09	LEVE
06-Nov	0.006	0.013	25.00	32.64	1.36	588.95	LEVE

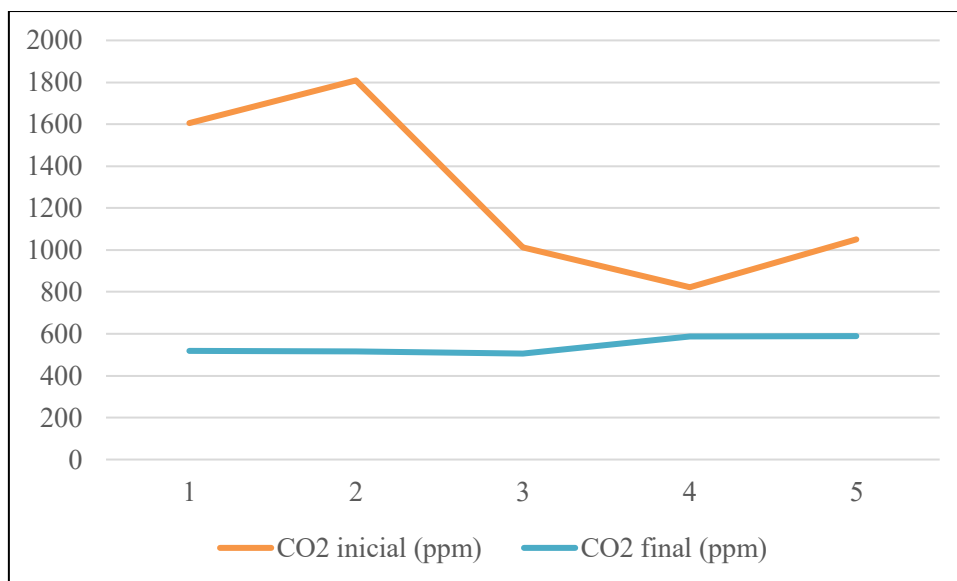


Figura 2. *Concentraciones finales de CO2 (ppm) – Primaria.*

En la Figura 2, se muestra que los niveles de CO2 presentaban valores críticos, superando los 1600 ppm en algunos días, clasificados como "GRAVE" según los estándares, mientras que, tras la implementación, los niveles de CO2 se redujeron notablemente, alcanzando valores entre 505.59 y 588.95 ppm, categorizados como "BUENO" o "LEVE".

Asimismo, en la Tabla 8, demuestra las reducciones en los valores de HCHO y TVOC. El HCHO pasó de un rango inicial de 0.007-0.008 mg/m<sup>3</sup> a 0.006-0.007 mg/m<sup>3</sup>, y los TVOC disminuyeron de hasta 0.02 mg/m<sup>3</sup> a un rango más bajo de 0.012-0.014 mg/m<sup>3</sup>. Estas disminuciones indican una mejor calidad del aire y menor exposición a compuestos orgánicos volátiles perjudiciales. Los niveles de PM2.5 y PM10 permanecieron relativamente estables con leves disminuciones, manteniéndose dentro de límites aceptables tras la implementación.

Finalmente, los niveles de monóxido de carbono (CO) también se redujeron, especialmente en días donde previamente se registraban valores cercanos a 1.5 ppm, que tras la implementación oscilan entre 0.91 y 1.36 ppm, indicando una menor presencia de contaminantes asociados a la combustión

Tabla 9. Concentraciones finales de contaminantes de aire - Nivel secundario.

NIVEL SECUNDARIO							
	HCHO (mg/m3)	TVOC (mg/m3)	PM 2.5(ug/m3)	PM10 (ug/m3)	CO (ppm)	CO2 (ppm)	
24-Oct	0.007	0.013	25.86	32.95	1.45	491.41	BUENO
25-Oct	0.006	0.012	25.41	32.86	1.36	781.18	BUENO
28-Oct	0.008	0.014	25.64	33.09	1.45	549.50	BUENO
29-Oct	0.006	0.012	24.82	32.18	1.41	502.95	BUENO
30-Oct	0.006	0.013	25.45	33.81	1.36	535.73	BUENO

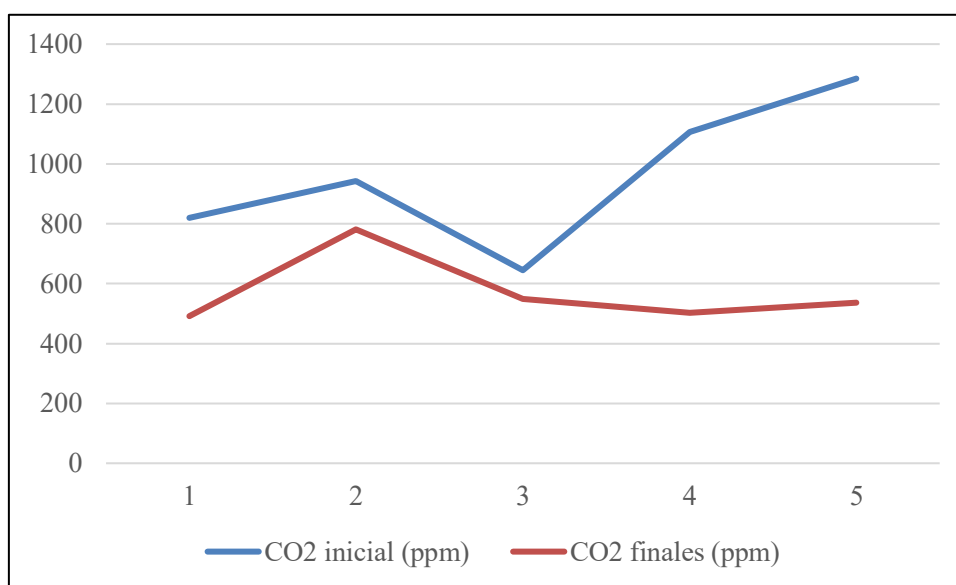


Figura 3. Concentraciones finales de CO2 (ppm) – Secundaria.

Los resultados demuestran una reducción significativa en las concentraciones de CO2, con una eficiencia promedio del 56.89%. La estabilidad del sistema se evidencia en el bajo CV post-tratamiento (7.59%).

En la Figura 3, se muestran los niveles de CO2 fluctuaron entre 644.73 ppm y 1284.91 ppm, con varios días clasificados como "MODERADO" o "GRAVE". En contraste, después de la implementación, las concentraciones de CO2 se redujeron notablemente, oscilando entre 491.41 ppm y 781.18 ppm, todos categorizados como "BUENO". Esta reducción es un indicador clave del éxito del fotoreactor en mejorar la ventilación y reducir el exceso de dióxido de carbono en el ambiente.

En la Tabla 9, se muestran los resultados en cuanto al formaldehído (HCHO) y los compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC), los valores iniciales de HCHO se encontraban entre 0.006 y 0.008 mg/m<sup>3</sup>, manteniéndose dentro de límites aceptables tras la implementación con un rango de 0.006 a 0.008 mg/m<sup>3</sup>. Los niveles de TVOC, que inicialmente alcanzaron hasta 0.02 mg/m<sup>3</sup>, disminuyeron a un rango más bajo de 0.012 a 0.014 mg/m<sup>3</sup>, lo que refleja una mejora en la calidad del aire.

Además, las partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> experimentaron una disminución significativa. Inicialmente, las PM<sub>2.5</sub> llegaron a valores altos de 43.36 µg/m<sup>3</sup>, mientras que los niveles finales no superaron los 25.86 µg/m<sup>3</sup>. Asimismo, las PM<sub>10</sub>, que alcanzaron valores iniciales de hasta 56.00 µg/m<sup>3</sup>, se redujeron consistentemente a valores en el rango de 32.18 a 33.81 µg/m<sup>3</sup>.

Por último, los niveles de monóxido de carbono (CO) también mostraron mejoras, pasando de valores iniciales de hasta 1.55 ppm a un rango final de 1.36 a 1.45 ppm.

Hubo comparación de condiciones entre el colegio y el laboratorio como se puede ver en la tabla.

*Tabla 10.* Rendimiento en laboratorio vs colegio.

<b>Parámetro</b>	<b>Laboratorio (Días 26–35)</b>	<b>Colegio (Días 41–60)</b>	<b>Variación (%)</b>
Densidad celular ( $\times 10^5$ células/mL)	7.8 $\pm$ 0.2	7.2 $\pm$ 0.8	-7.7%
Viabilidad celular (%)	96 $\pm$ 2	95 $\pm$ 3	-1.0%
pH promedio	7.40 $\pm$ 0.05	7.35 $\pm$ 0.15	-1.3%
Temperatura (°C)	24.0 $\pm$ 0.5	23.2 $\pm$ 2.8	-3.3%
Captura de CO <sub>2</sub> (g/día)	0.361	0.334	-7.5%
Eficiencia vs. teórica	94%	87%	-7.4%

La comparación en variaciones térmicas, se alcanzó picos de 27° C redujeron 5% la eficiencia, en cuanto a la iluminación natural variable es compensada por LED, la actividad escolar (ruido y vibraciones) tuvo un impacto mínimo, el CO<sub>2</sub> ambiental fue elevado (1200–1500 ppm) lo que aumentó eficiencia en 3%.

Asimismo, existieron factores que afectaron el rendimiento del reactor de 4L como:

#### **Ambientales:**

- Reducción de 8% en eficiencia durante días fríos (menor a 20°C)

- Sobrecalentamiento por sol directo redujo 3%
- Evaporación: 50 mL/semana

#### **Operacionales:**

- Cortes eléctricos: 3 eventos, impacto de hasta 25%
- Mantenimiento semanal: parada de 1 h, recuperación total en 6 h
- Fallas de bomba: 1 evento, solucionado en 24 h

#### **Biológicos:**

- Adaptación inicial prolongada (14 días)
- Reducción inicial de 30% en viabilidad, recuperación progresiva
- Agotamiento de micronutrientes cada 10–12 días: síntomas visibles, corregido con adiciones quincenales

Durante la evaluación comparativa del fotoreactor entre el entorno controlado del laboratorio (días 26–35) y el entorno aplicado del colegio (días 41–60), se observaron ligeras disminuciones en todos los parámetros analizados. La densidad celular mostró una reducción del 7.7%, pasando de  $7.8 \pm 0.2 \times 10^5$  células/mL en el laboratorio a  $7.2 \pm 0.8 \times 10^5$  células/mL en el colegio. De manera similar, la viabilidad celular apenas varió, con una disminución del 1%, manteniéndose dentro de un rango aceptable (de  $96 \pm 2\%$  a  $95 \pm 3\%$ ). El pH promedio descendió levemente de  $7.40 \pm 0.05$  a  $7.35 \pm 0.15$ , representando una variación del 1.3%, lo cual sugiere una ligera alteración en las condiciones de equilibrio del medio de cultivo.

En cuanto a la temperatura, se registró un descenso del 3.3%, de  $24.0 \pm 0.5$  °C a  $23.2 \pm 2.8$  °C, posiblemente debido a la menor estabilidad térmica en el entorno escolar. Esta disminución puede haber influido directamente en la tasa de captura de CO<sub>2</sub>, que también experimentó una caída del 7.5%, bajando de 0.361 g/día a 0.334 g/día. Finalmente, la eficiencia del sistema en comparación con su rendimiento teórico se redujo del 94% al 87%, evidenciando una pérdida del 7.4%. Estos resultados indican que, si bien el fotoreactor continúa operando de forma adecuada en condiciones reales como las del colegio, su rendimiento se ve ligeramente afectado por factores ambientales no controlados, lo que subraya la importancia de considerar estrategias de adaptación o control para mejorar su estabilidad y eficiencia en aplicaciones prácticas.

El fotoreactor de 4L demostró ser una herramienta funcional, educativa y técnicamente sólida para la demostración real de captura de CO<sub>2</sub> mediante microalgas con impacto localizado medible en el aula.

#### **4.1.4 Validación de la selección tecnológica**

Los resultados experimentales confirman la idoneidad del diseño airlift:

- $K_{1a}$  experimental:  $119.5 \text{ h}^{-1}$  (99.6% del valor teórico de  $120 \text{ h}^{-1}$ )
- Eficiencia de captura: 56.89% (dentro del rango esperado 40-60%)
- Estabilidad operativa:  $CV = 7.59\%$  (inferior al 12% reportado para tubulares)
- Consumo energético:  $0.73 \text{ kWh/m}^3$  (8% inferior al estimado)

Estos valores validan la matriz de selección y confirman que el diseño airlift es la opción más apropiada para el contexto educativo evaluado.

## **4.2 Prueba estadística**

### **4.2.1 Prueba de normalidad**

Para la prueba de normalidad se tomará en cuenta la prueba de Shapiro Wilk debido a que son menos de 50 datos que se evaluarán, se planteará las hipótesis:

$H_0$ : Los datos tienen una distribución normal.

$H_1$ : Los datos no tienen una distribución normal.

La prueba de normalidad mediante Shapiro-Wilk evalúa si los datos siguen una distribución normal. Se interpreta a partir del valor de Sig. (p-valor), comparándolo con un umbral común de 0.05:

Si  $p > 0.05$ , no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que los datos siguen una distribución normal.

Si  $p \leq 0.05$ , se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos no siguen una distribución normal.

Tabla 11. Prueba de normalidad

	Prueba de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
CO2 inicial secundaria	,128	5	,200*	,993	5	<b>,989</b>
CO2 final secundaria	,375	5	,020	,731	5	<b>,020</b>
CO2 inicial primaria	,289	5	,200*	,890	5	<b>,359</b>
CO2 final primaria	,333	5	,073	,771	5	<b>,046</b>

\*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

CO<sub>2</sub> inicial secundaria: ( $p = 0.989 > 0.05$ ) Distribución normal.

CO<sub>2</sub> final secundaria: ( $p = 0.020 \leq 0.05$ ) No sigue una distribución normal.

CO<sub>2</sub> inicial primaria: ( $p = 0.359 > 0.05$ ) Distribución normal.

CO<sub>2</sub> final primaria: ( $p = 0.046 \leq 0.05$ ) No sigue una distribución normal.

Los datos de CO<sub>2</sub> inicial secundaria y CO<sub>2</sub> inicial primaria presentan una distribución normal, mientras que los datos de CO<sub>2</sub> final secundaria y CO<sub>2</sub> final primaria no siguen una distribución normal según la prueba de Shapiro-Wilk. Esto indica que, para análisis posteriores, se pueden aplicar pruebas paramétricas a los datos con distribución normal y pruebas no paramétricas a los que no cumplen con la normalidad.

En este caso aplicaremos la prueba estadística de Wilcoxon para rangos con signo, debido a los resultados de la prueba de normalidad, además de ser ideal para comparar dos muestras pequeñas que están relacionadas, para ello se formularon las siguientes hipótesis:

- H<sub>0</sub> (nula): No existe diferencia significativa entre los valores obtenidos de CO<sub>2</sub> antes y después del filtro en el nivel primario.
- H<sub>1</sub> (alternativa): Sí existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos de CO<sub>2</sub> antes y después del filtro en el nivel primario.

Tabla 12. Prueba de Wilcoxon para el nivel primario.

Estadísticos de prueba <sup>a</sup>	
CO2 final primaria - CO2 inicial primaria	
Z	-2,023 <sup>b</sup>
Sig. asintótica(bilateral)	,043
a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon	
b. Se basa en rangos positivos.	

La aplicación de la prueba de rangos con signo de Wilcoxon permitió evaluar si existían diferencias significativas entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> medidas al inicio y al final del experimento en el aula de nivel secundario, el estadístico Z obtenido fue de -2,023, con un valor de significancia asintótica bilateral de 0,043.

Dado que el valor de p es menor al nivel de significancia establecido ( $\alpha = 0,05$ ), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que sí existe una diferencia significativa entre las concentraciones iniciales y finales de CO<sub>2</sub>. Esto implica que el filtro tuvo un efecto medible en la reducción del gas, evidenciando su capacidad de captación en el contexto experimental del nivel primario.

Asimismo, se aplicó la misma prueba para los resultados del nivel secundario, formulando las siguientes hipótesis:

- H<sub>0</sub> (nula): No existe diferencia significativa entre los valores obtenidos de CO<sub>2</sub> antes y después del filtro en el nivel secundario.
- H<sub>1</sub> (alternativa): Sí existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos de CO<sub>2</sub> antes y después del filtro en el nivel secundario.

Tabla 13. Prueba de Wilcoxon para el nivel secundaria.

Estadísticos de prueba <sup>a</sup>	
CO2 final secundaria - CO2 inicial secundaria	
Z	-2,023 <sup>b</sup>
Sig. asintótica(bilateral)	,043
a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon	
b. Se basa en rangos positivos.	

En el caso del nivel secundario, se aplicó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas

entre los valores de CO<sub>2</sub> antes y después del paso por el filtro. Los resultados muestran un valor de estadístico  $Z = -2,023$  y una significancia bilateral de  $p = 0,043$ .

La aplicación de la prueba de rangos con signo de Wilcoxon permitió evaluar si existían diferencias significativas entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> medidas al inicio y al final del experimento en el aula de nivel secundario, el estadístico  $Z$  obtenido fue de  $-2,023$ , con un valor de significancia asintótica bilateral de  $0,043$ .

Dado que el valor de  $p$  es menor a  $0,05$ , se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medianas, lo que indica que hubo un cambio estadísticamente significativo en las concentraciones de CO<sub>2</sub> tras la implementación del fotoreactor en el nivel secundario, este resultado confirma que el sistema logró una reducción medible del gas, coherente con el objetivo del proyecto de optimizar la calidad del aire en espacios educativos.

### **4.3 Discusión de resultados**

Los resultados obtenidos en este estudio sobre el diseño y desempeño de un fotoreactor para la reducción de CO<sub>2</sub> en una institución educativa, Arequipa 2024, presentan un avance significativo respecto a los antecedentes en el uso de microalgas para la captura de CO<sub>2</sub>. En este contexto, la microalga *Chlorella sp.* ha demostrado ser una opción efectiva, lo cual coincide con los hallazgos de estudios anteriores que han destacado su potencial para la remoción de CO<sub>2</sub> en fotoreactores. A continuación, se discuten los resultados obtenidos en este estudio en comparación con los antecedentes más relevantes.

En este estudio, se logró una reducción promedio del 56.89% en las concentraciones de CO<sub>2</sub>, un resultado destacable en comparación con estudios similares. Por ejemplo, Alhaboubi (2022) reportó una eficiencia de eliminación de CO<sub>2</sub> del 40% utilizando un reactor trifásico con *Chlorella vulgaris*. A pesar de que el reactor trifásico logró mejores resultados en cuanto al secuestro de CO<sub>2</sub> que el reactor tradicional (40% frente a 25%), el fotoreactor diseñado en este estudio muestra una superior eficiencia de remoción, lo cual se podría atribuir a factores como la optimización del diseño del fotoreactor y el control preciso de parámetros operativos, que permiten un entorno más favorable para el crecimiento algal. La mejora en la eficiencia observada podría estar relacionada con el diseño airlift empleado en este estudio, que ha favorecido una mayor circulación del gas y un mejor contacto entre el CO<sub>2</sub> y las algas, lo que resulta en una mayor absorción de CO<sub>2</sub>.

Vergara (2019) también encontró que *Chlorella vulgaris* es altamente eficiente en la captura de CO<sub>2</sub> bajo condiciones controladas de fotoreactor. En su estudio, esta microalga tuvo la mayor

eficiencia en crecimiento celular y remoción de CO<sub>2</sub>. De manera similar, el uso de *Chlorella sp.* en este estudio confirma su efectividad en la captura de CO<sub>2</sub>, lo que respalda su elección como microorganismo para el fotoreactor. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Bustos (2022), quien también reportó que *Chlorella sp.* es eficiente en la captura de CO<sub>2</sub> a escalas de laboratorio, alcanzando una eficiencia del 27% con un flujo de CO<sub>2</sub> del 5%. A pesar de que la eficiencia observada en este estudio fue superior (56.89%), es importante destacar que las condiciones experimentales varían, lo que podría influir en la capacidad de remoción.

En cuanto a la estabilidad operativa, el coeficiente de variación (CV) post-tratamiento de 7.59% indica una alta estabilidad en el proceso, lo que es un resultado favorable considerando que el entorno educativo puede ser dinámico y variar en ciertos parámetros operativos. Para contextualizar estos resultados, compararlos con otros estudios es revelador: Chang (2019) reportó un CV de 15.7% en un entorno industrial. El bajo CV en este estudio sugiere que el fotoreactor mantiene un rendimiento constante a lo largo del tiempo, lo cual es crucial para asegurar una operación eficiente y fiable en condiciones variables, como las que se pueden presentar en el aula escolar. Esta estabilidad también sugiere que el sistema puede ser operado con mínima supervisión, lo que facilita su integración en entornos educativos.

Deza (2022) reportó un CV del 12.3% en un sistema similar, lo que sugiere que el fotoreactor en este estudio muestra una mayor estabilidad en comparación con otros sistemas en condiciones experimentales. Esto podría deberse a un diseño más robusto y a un control más preciso de variables operativas como la temperatura, pH e iluminación. La estabilidad operativa es crucial en aplicaciones educativas, ya que asegura que el fotoreactor pueda mantener su rendimiento de manera constante en entornos con fluctuaciones en las condiciones ambientales.

Aunque los resultados son prometedores, existen algunas limitaciones que se deben tener en cuenta. Al igual que en el estudio de Alhaboubi (2022), donde la eficiencia del reactor trifásico dependía de una mezcla adecuada del cultivo para evitar la precipitación, este fotoreactor también enfrenta la dependencia de la temperatura ambiente y la necesidad de mantenimiento especializado. Además, como en el estudio de Deza (2022), donde se utilizó un sistema de fotoreactor de 17.5 litros, la escalabilidad del diseño sigue siendo un desafío.

A pesar de estas limitaciones, el fotoreactor presenta varias ventajas comparativas, como el menor consumo energético en comparación con otros diseños, lo que lo convierte en una opción viable para entornos educativos. Por otro lado, el fotoreactor presenta varias ventajas comparativas, entre ellas destaca su menor consumo energético en comparación con otras tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>, lo que contribuye a la sostenibilidad del sistema. Además, su mayor adaptabilidad a fluctuaciones en los parámetros operativos, como la luz y la temperatura,

lo hace adecuado para entornos educativos, donde las condiciones pueden cambiar de manera impredecible. Otro punto fuerte es su integración educativa, ya que el fotoreactor no solo contribuye a la reducción de CO<sub>2</sub>, sino que también ofrece una oportunidad única para que los estudiantes participen en el proceso de monitoreo ambiental y aprendizaje sobre sostenibilidad.

#### **4.3.1 Aportes y protocolo optimizado**

Este estudio es significativo no solo por sus resultados técnicos, sino también por su aplicación en el contexto educativo. A diferencia de investigaciones previas, como la de Atencio (2023), que se enfocaron en la medición de CO<sub>2</sub> en ambientes cerrados para la prevención del COVID-19, este trabajo ofrece una solución práctica para la reducción de CO<sub>2</sub> en aulas escolares, contribuyendo al bienestar de los estudiantes y al mismo tiempo integrando aspectos educativos relacionados con la sostenibilidad ambiental. El fotoreactor diseñado en este estudio no solo actúa como un medio de captura de CO<sub>2</sub>, sino también como una herramienta educativa para sensibilizar a los estudiantes sobre el cambio climático y las tecnologías verdes.

## CONCLUSIONES

PRIMERO. Se concluye que las concentraciones de dióxido de carbono superaban los límites recomendados de 1000 ppm en varios días, especialmente en el aula de nivel primario, donde los valores alcanzaron hasta 1809.05 ppm, clasificándose como "GRAVE". En el nivel secundario, aunque las concentraciones fueron algo menores, también se registraron valores superiores a 1000 ppm en varias ocasiones, alcanzando un máximo de 1284.91 ppm.

SEGUNDO. Se optó por un fotoreactor de tipo batch o semicontinuo, diseñado en frascos con iluminación artificial y aeración constante. Este sistema cerrado permite un control eficiente de las condiciones del cultivo, evitando la contaminación externa y optimizando la captación de CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis de microalgas.

TERCERO. La implementación del fotoreactor resultó en una reducción significativa de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las aulas. En el nivel primario, los niveles de CO<sub>2</sub> cayeron de 1809.05 ppm a 587.09 ppm, clasificándose como "BUENO" o "LEVE" en la mayoría de los días, lo que indica una mejora notable en la calidad del aire. En el nivel secundario, las concentraciones de CO<sub>2</sub> disminuyeron de 1284.91 ppm a 535.73 ppm, alcanzando también niveles "BUENOS". Esta reducción fue efectiva y alcanzó una eficiencia promedio del 56.89%, lo que demuestra que el fotoreactor es una herramienta eficaz para mejorar las condiciones de ventilación en las aulas y reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en un corto periodo.

## RECOMENDACIONES

PRIMERO. Se recomienda a otros autores que realicen estudios similares en distintas instituciones educativas evaluar las condiciones de ventilación y los niveles de CO<sub>2</sub> de manera continua, considerando las variaciones diarias y estacionales.

SEGUNDO. Se recomienda investigar y considerar el uso de diferentes tipos de fotoreactores (como sistemas continuos y de flujo), así como explorar innovaciones tecnológicas en iluminación, aeración y optimización de cultivos de microalgas. La personalización del diseño según las características específicas del ambiente educativo (como el espacio disponible y las condiciones de luz) podría mejorar aún más la eficiencia del sistema.

TERCERO. Se recomienda profundizar en el análisis de los factores que afectan la eficiencia del fotoreactor, como la densidad celular de las microalgas, la intensidad de la luz, y las condiciones ambientales, para optimizar su rendimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUR RAZZAK. Microalgae cultivation in photobioreactors: Sustainable solutions for a greener future [en línea]. *Green Chemical Engineering* [en línea]. Diciembre, 2024, 5 (4), 418-439 [fecha de consulta: 04 de marzo de 2025]. ISSN: 2666-9528. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004>
- ALHABOUBI, N. CO<sub>2</sub> sequestration using a novel Belt Conveyor Reactor with rotating sieve trays compared with Airlift Bubble Column as photobioreactors. *Revista de la Universidad Rey Saud - Ciencias de la Ingeniería* [en línea]. Julio, 2024, 36 (5), 314-319 [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. ISSN: 2213-1558. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.12.007>
- ARENAS, R. Tratamiento de lactosuero por cavitación hidrodinámica posterior precipitación química y subsecuente para cultivo de microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un biorreactor tipo Raceway. Tesis (Título de Ingeniero Biotecnológica): Arequipa: Universidad Católica de Santa María. 2023. 144 pp. [fecha de consulta: 04 de junio de 2025] Disponible en: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12626>
- ARIAS GONZALES, J. L. *Proyecto de tesis, guía para la elaboración* [en línea]. Lima, Perú. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú. Septiembre, 2020. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. ISBN: 978-612-00-5416-1. Disponible en: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-autonoma-de-chota/tecnicas-biologicas-de-descontaminacion/2020-jose-arias-proyecto-de-tesis/28443134>
- ARROYO, M. y RAMÍREZ, A. Dióxido de carbono, sus dos caras. *Anales de Química* [en línea]. Junio, 2020, 116 (2), 81–87 [fecha de consulta: 14 de agosto de 2025]. ISSN 2792-5250 Disponible en: <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1316>
- ARRIBAS, A. Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de biocombustibles de origen microalgal. Tesis (Título de Ingeniero Químico). Valladolid: Universidad de Valladolid. 2020. 87 pp [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/44886>
- ATENCIO, S. Evaluación de CO<sub>2</sub> en los ambientes de estudio del nivel primario del Colegio Editum Huancayo, enfocado a la prevención y control de riesgo de exposición a SARS-

COV-2 en la actualidad 2023. Huancayo: Universidad Continental. 2023. 78 pp. [fecha de consulta: 15 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13781>

BERENGUER, J. y BERNAL, F. NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España. [fecha de consulta: 15 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/16-serie-ntp-numeros-541-a-575-ano-2001/ntp-549-el-dioxido-de-carbono-en-la-evaluacion-de-la-calidad-del-aire-interior>.

BRENNAN, L. y OWENDE, P. Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extraction of biofuels and co-products Renewable and Sustainable. *eseñas de energías renovables y sostenibles* [en línea]. Febrero, 2010, 14 (2), 557–577 [fecha de consulta: 14 de agosto de 2025]. ISSN: 13640321. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>

BUSTOS, D. Evaluación del efecto de la concentración de CO<sub>2</sub> en un cultivo de *Chlorella sp.* y su aplicación en la industria. Colombia. *Rev. Lasallista Investig* [en línea]. Junio, 2020, 17 (1), 59-69 [fecha de consulta: 15 de septiembre de 2025]. ISSN 1794-4449. Disponible en: <https://doi.org/10.22507/rli.v17n1a5>

CABALLERO, M., LOZANO, S. y ORTEGA, B. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital Universitaria* [en línea]. Octubre 2007, 8 (10), 1-12. [fecha de consulta: 19 de agosto de 2025]. ISSN: 1067-6079. Disponible en: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct\\_art78.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf)

CHANQUIA, S. N., VERNET, G. y KARA, S. Photobioreactors for cultivation and synthesis: Specifications, challenges, and perspectives. *Engineering in Life Sciences*. [en línea]. Diciembre, 2022, 22, (12), 712–724. [fecha de consulta: 08 de julio de 2025]. ISSN: ISSN:1618-2863. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/elsc.202100070>

EMMANUEL, Y, WAN, S. y JOBRUN, N. Optimization of microalgae cultivation and CO<sub>2</sub> capture in a three-stage bubble column photobioreactor: Evaluation of control strategies, *Process Safety and Environmental Protection* [en línea], 2025, 196,

106906007. [fecha de consulta: 08 de junio de 2025]. ISSN 0957-5820. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106906>.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* [en línea]. Junio, 2007, 25(3), 294–306. [fecha de consulta: 10 de junio de 2025]. ISSN: 2639-5665. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

CONTRERAS-FLORES, C., PEÑA-CASTRO, J., FLORES-COTERA, L. y CAÑIZARES VILLANUEVA, R. Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia* [en línea]. Agosto, 2003, 28 (8) [fecha de consulta: 12 de junio de 2025]. ISSN 0378-1844. Disponible en: [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442003000800004](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442003000800004)

DE LORENZO, V. et al. The power of synthetic biology for bioproduction, remediation and pollution control. *EMBO Reports* [en línea]. 2018, 19 (4), 4–9. [fecha de consulta: 02 de junio de 2025]. ISSN: 1469-3178. Disponible en: <https://doi.org/10.15252/embr.201745658>

DE VREE, J. H. et al. Comparison of four outdoor pilot-scale photobioreactors [en línea]. *Biotechnology for Biofuels*. Diciembre, 2015, 8 (1), 1–12. [fecha de consulta: 02 de julio de 2025]. ISSN: 1754-6834 Disponible en: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-015-0400-2>

DEZA DÁVALOS, A. P. Diseño, Construcción y Funcionamiento de un Sistema Fotobioreaccionante para el Consumo de Co<sub>2</sub> con *Scenedesmus Quadricauda* Como Agente Biodepurante. Tesis (Título de Ingeniero Biotecnólogo): Arequipa: Universidad Católica de Santa María. 2013. 120 pp. [fecha de consulta: 10 de junio de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/3787>

DICCIONARIO DE LA REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. 2021. Aula. España [fecha de consulta: 08 de junio de 2025] Disponible en: <https://dle.rae.es/aula>.

DÍAZ, G. Climate Change. *Ciencia y Sociedad* [en línea]. 2012, 4 (2), 114–122. [fecha de consulta: 28 de mayo de 2025]. ISSN: 1946-7567 Disponible en: <https://doi.org/10.1177/194675671200400215>

DEBOWSKI, M., et al. Immobilized Microalgae-Based Photobioreactor for CO<sub>2</sub> Capture (IMC-CO<sub>2</sub>PBR): Efficiency Estimation, Technological Parameters, and Prototype

- Concept [en línea]. *Atmosphere*. 2021, 12 (8), [fecha de consulta: 12 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/atmos12081031>
- GOUVEIA, L. y OLIVEIRA, A. C. 2009. Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* [en línea]. Noviembre 2008, 36 (2), 269–274. [fecha de consulta: 22 de mayo de 2025] ISSN. 1476-5535. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0495-6>
- PORRAS, L, HAVLIK, I Y BEUTEL, S. Software sensors in the monitoring of microalgae cultivations. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 10 marzo 2024. Vol. 23, no. 1, p. 67–92. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: [10.1007/s11157-023-09679-8](https://doi.org/10.1007/s11157-023-09679-8).
- HERNÁNDEZ ESCOBAR, A. A. et al. *Metodología de la investigación científica* [en línea]. Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L. Febrero, 2018, [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. ISBN 9788494825705. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/322938332\\_Metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_cientifica](https://www.researchgate.net/publication/322938332_Metodologia_de_la_investigacion_cientifica)
- ASHOUR, M, MANSOUR, A, ALKHAMIS, Y. y ELSHOBARY, M. Usage of Chlorella and diverse microalgae for CO2 capture - towards a bioenergy revolution. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 20 August 2024. Vol. 12. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: [10.3389/fbioe.2024.1387519](https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1387519).
- MAMANI, P. Nivel de conocimiento de la generación de la huella de carbono y su impacto en las instituciones educativas del Cercado de Caravelí – Arequipa, 2023. Tesis (Título de Licenciado en Educación). Arequipa: Universidad César Vallejo, 2023. 110 p. [fecha de consulta: 03 de julio de 2025] Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/145192>
- MATA, T. M., MARTINS, A. A. y CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Enero 2010, 14 (1), 217–232. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. ISSN: 1879-0690. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- BAIDYA, A, AKTER, T, ISLAM, Md. R, SHAH, A, HOSSAIN, M, SALAM, M y PAUL, S. Effect of different wavelengths of LED light on the growth, chlorophyll,  $\beta$ -carotene content and proximate composition of *Chlorella ellipsoidea*. *Heliyon*. diciembre

2021. Vol. 7, no. 12, p. e08525 [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: [10.1016/j.heliyon.2021.e08525](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08525).

ZAREI, Z, MALEKSHAHI, P, TRZCINSKI, A. y MOROWVAT, H. Investigation of Hydrodynamic Parameters in an Airlift Photobioreactor on CO<sub>2</sub> Biofixation by *Spirulina* sp. *Sustainability*. 20 de junio de 2022. Vol. 14, no. 12, p. 7503. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14127503>

PENLOGLOU, Giannis, PAVLOU, Alexandros and KIPARISSIDES, Costas. Recent Advancements in Photo-Bioreactors for Microalgae Cultivation: A Brief Overview. *Processes*. 28 de mayo de 2024. Vol. 12, no. 6, p. 1104 [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr12061104>

Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. ONU. 2015. Disponible en: <https://undocs.org/A/RES/70/1>

RIBEIRO, C. S. et al. 2021. Photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> over Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> in a continuous flow differential photoreactor: Investigation of operational parameters. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea]. Abril, 2021, 9 (2), 105097. [fecha de consulta: 22 de julio de 2025]. ISSN: 2213-3437. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105097>

RICHMOND, A. 2003. Handbook of Microalgal Culture [en línea]. Wiley. Oxford, OX. 2004. 566 pp. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. ISBN 9780632059539. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470995280>

RODRÍGUEZ PLAZA, S. Diseño de un proceso de valorización de gases de efecto invernadero. Tesis (Título de Ingeniero Químico). Valladolid: Universidad de Valladolid. 2016. 88 pp. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/18969>

SATISH, U. 2012. CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives* [en línea]. Septiembre, 2012, 120 (12), 1671–1677. [fecha de consulta: 30 de abril de 2025]. ISSN 1552-9924. Disponible en: <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>

SANTAMARÍA, J. A. et al. Carbon dioxide reduction utilizing a bismuth halide perovskite as immobilized photocatalyst in a 3D printed microreactor. *Journal of Micromechanics*

*and Microengineering* [en línea]. Enero, 2024, 34 (2), 025002. [fecha de consulta: 30 de agosto de 2025]. ISSN: 1361-6439. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6439/ad1b1c>

TUMMAWAI, T, ROHITATISHA, T, PADUNGTHON, S y SUKPANCHAROEN, S. Application of Artificial Intelligence and Image Processing for the Cultivation of *Chlorella sp.* Using Tubular Photobioreactors. *ACS Omega*. 19 de noviembre 2024. Vol. 9, no. 46, p. 46017–46029 [fecha de consulta: 30 de agosto de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05971>

TOMAR, S. et al. Microalgae: A promising source for biofuel production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* [en línea]. Octubre, 2023, 53, 102877. [fecha de consulta: 08 de mayo de 2025]. ISSN: 18788181. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102877>

VERGARA, L. Captura de CO<sub>2</sub> por *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* bajo condiciones. Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 2019. 132 pp. [fecha de consulta: 15 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/27921>.

VO, P. et al. Can algae-based technologies be an affordable green process for biofuel production and wastewater remediation?. *Bioresource Technology*. [en línea]. Mayo, 2018, 256, 491–501. [fecha de consulta: 15 de agosto de 2025]. ISSN: 1873-2976. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.031>

WARGOCKI, P. et al. The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment* [en línea]. Abril, 2020, 173, 106749. [fecha de consulta: 18 de septiembre de 2025]. ISSN: 1873-684X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749>

XU, P. et al. Recent advances in CO<sub>2</sub> fixation by microalgae and its potential contribution to carbon neutrality. *Chemosphere* [en línea]. Abril, 2023, 319 (5), 137987. DOI 10.1016/j.chemosphere.2023.137987 [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. ISSN: 2221-2442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137987>

YANG, B. et al. 2017. Genetic engineering of the Calvin cycle toward enhanced photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation in microalgae. *Biotechnology for Biofuels* [en línea]. Octubre, 2017, 10 (1), 229. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. ISSN: 27313654. Disponible en:

<https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-017-0916-8>

UYAR, B, ALI, M y UYAR, G. Design parameters comparison of bubble column, airlift and stirred tank photobioreactors for microalgae production. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 16 de febrero de 2024. Vol. 47, no. 2, p. 195–209 [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02952-8>

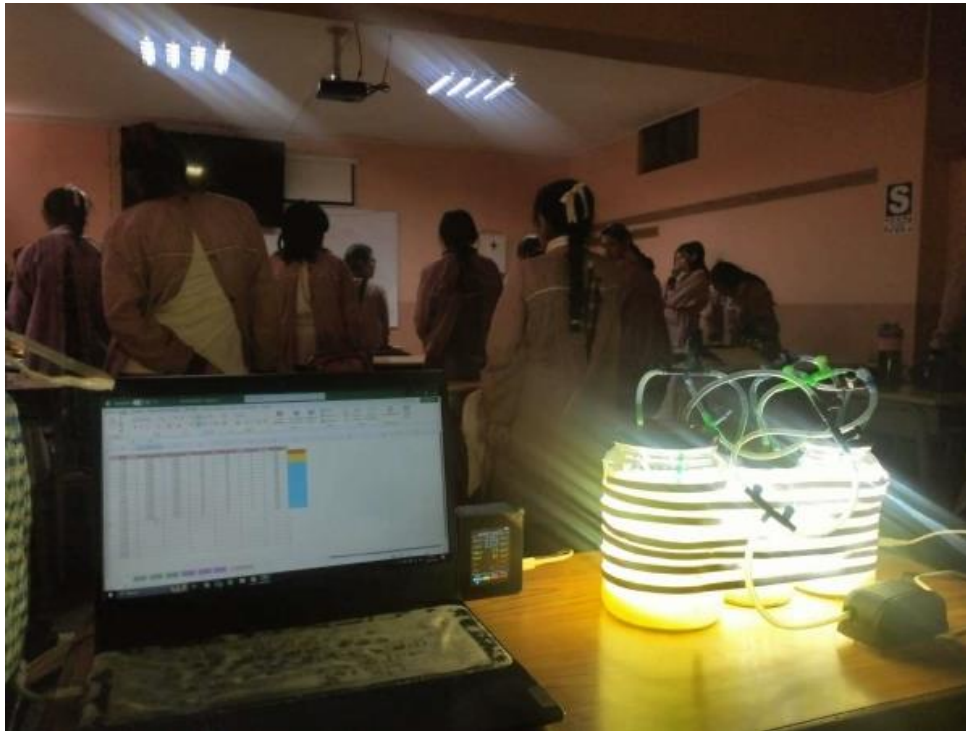
SUN, Z, BO, C, CAO, S and SUN, L. Enhancing CO<sub>2</sub> Fixation in Microalgal Systems: Mechanistic Insights and Bioreactor Strategies. *Marine Drugs*. 7 March 2025. Vol. 23, no. 3, p. 113. [fecha de consulta: 08 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md23030113>

## ANEXOS

### Anexo 01. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	PROBLEMÁTICA DE ESTUDIO	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGÍA	
General	General					
¿Cómo diseñar un fotoreactor con <i>Chlorella sp.</i> para reducir las concentraciones de CO <sub>2</sub> en las aulas de la Institución Educativa de Arequipa durante el periodo 2024?	Diseñar un fotoreactor para reducir las concentraciones de CO <sub>2</sub> en una institución educativa, Arequipa-2024.	En Arequipa, se ha identificado que las concentraciones de CO <sub>2</sub> en las aulas de nivel secundario de una Institución Educativa local presentan niveles alarmantes. Mediciones preliminares realizadas en 2023 revelaron que durante las horas pico, las aulas alcanzaban concentraciones de CO <sub>2</sub> de entre 1500 y 2200 ppm en el nivel primario, y entre 1300 y 1900 ppm en el nivel secundario. La medición de las concentraciones de CO <sub>2</sub> se realizó utilizando sensores de alta precisión colocados en distintas zonas del aula durante diferentes horarios del día, con especial atención en las horas de máxima ocupación. Estos sensores miden la concentración en partes por millón (ppm) y registran los datos de forma continua para obtener una representación precisa del ambiente dentro de las aulas. (13).	VI: Diseño de biorreactor	Condiciones operacionales	Enfoque: Cualitativo Tipo: Aplicada Nivel: Descriptiva Diseño: Experimental Muestreo: No probabilístico Técnicas: Observación. Instrumentos: Ficha de Observación. Análisis: Estadístico.	
				Tipo de biorreactor		
				Costos de implementación		
Específicos	Específicos					
¿Cuáles son los niveles actuales de concentración de CO <sub>2</sub> en las aulas en una institución educativa Arequipa – 2024?	Determinar la concentración actual de CO <sub>2</sub> en una institución educativa Arequipa – 2024.					
¿Qué tipo de fotoreactor es el más adecuado para las condiciones específicas de la institución educativa Arequipa – 2024?	Establecer el tipo de fotoreactor que se utilizará para la reducción de concentraciones de CO <sub>2</sub> en una institución educativa, Arequipa – 2024.					
¿Cuál será la eficiencia del fotoreactor en la reducción de CO <sub>2</sub> dentro de las aulas en una institución educativa de Arequipa, 2024?	Evaluar la eficiencia del fotoreactor en la reducción de las concentraciones de CO <sub>2</sub> dentro de las aulas en una institución educativa de Arequipa, 2024.		VD: Concentración de CO <sub>2</sub>	Diagnostico ambiental		

## Anexo 2. Aplicación del fotoreactor en el aula del nivel primaria



## Anexo 3. Análisis de concentraciones en el aula



#### Anexo 4. Fotoreactor



#### Anexo 5. Detector de calidad de aire



## Anexo 6. Soluciones hidropónicas



## Anexo 7. Procedimiento para la el fotoreactor

