

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
DE RECURSOS NATURALES



**“EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
DE FUENTE INDUSTRIAL EN LA BIOFIJACIÓN DE
DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (*Chlorella
vulgaris*) EN UN FOTOBIORREACTOR A NIVEL
PILOTO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

AUTORES:

JHONNY MÁXIMO AGUIRRE ALIAGA
RENZO FRANK CARRASCO MIÑAN
SUSAN PAMELA CUADROS GÓMEZ

ASESOR: MANUEL DANIEL OLCESE HUERTA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERIA Y TECNOLOGÍA

Callao, 2023
PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES



VII CICLO TALLER DE TESIS

ANEXO 3

ACTA N° 003-2023 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 125 ACTA N°003-2023 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 18 días del mes de noviembre del año 2023, siendo las 9:40 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/mge-roer-zin>, el **JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la **Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

Dr.	José Pablo Rivera Rodríguez	: Presidente
Mtro.	Abner Josué Vigo Roldán	: Secretario
Mg.	Alex Willy Pilco Núñez	: Vocal
Mtro.	Américo Carlos Milla Figueroa	: Suplente
Mg.	Manuel Daniel Olcese Huerta	: Asesor

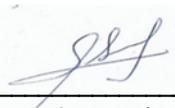
Con el quórum reglamentario de ley, de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente, y habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, se dio inicio al acto de sustentación de la tesis, de los bachilleres Renzo Frank Carrasco Miñan, Susan Pamela Cuadros Gómez y Jhonny Máximo Aguirre Aliaga, titulada: “**EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE FUENTE INDUSTRIAL EN LA BIOFIJACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN FOTOBIOREACTOR A NIVEL PILOTO**”, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual;

Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, el jurado acordó: Dar por **APROBADO** la presente tesis, con la escala de calificación cualitativa **BUENO** y calificación cuantitativa **QUINCE (15)**, conforme a lo dispuesto en el Art. 24 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU del 15 de junio de 2023.

Se dio por cerrada la Sesión a las 10:30 horas del sábado 18 de noviembre del año en curso.



Presidente
José Pablo Rivera Rodríguez



Secretario
Abner Josué Vigo Roldán



Vocal
Alex Willy Pilco Núñez



Asesor
Manuel Daniel Olcese Huerta

Document Information

Analyzed document	1A_AGUIRRE ALIAGA; Jhonny Máximo_CARRASCO MIÑAN; Renzo Frank_CUADROS GOMEZ; Susan Pamela_IF TESIS.pdf (D178566216)
Submitted	11/12/2023 4:59:00 PM
Submitted by	
Submitter email	fiarn.investigacion@unac.edu.pe
Similarity	5%
Analysis address	unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA	TESIS.docx Document TESIS.docx (D115766357)		9
W	URL: https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/mitigacion Fetched: 11/12/2023 4:59:00 PM		1
SA	Revision sistematica Final.docx Document Revision sistematica Final.docx (D110531151)		2
SA	submission.pdf Document submission.pdf (D109431964)		4
SA	AbadGiron_RocíoGabriela_Tarea 4 G.pdf Document AbadGiron_RocíoGabriela_Tarea 4 G.pdf (D142664946)		7
W	URL: https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%93xido_de_carbono_%2528IV%2529.html Fetched: 11/12/2023 5:00:00 PM		2
W	URL: https://www.significados.com/dioxido-de-carbono/ Fetched: 9/25/2019 3:32:14 AM		1
SA	FormularioProyectos_94195.pdf Document FormularioProyectos_94195.pdf (D146544300)		1
SA	2016_2017_Julio_71749094L.pdf Document 2016_2017_Julio_71749094L.pdf (D29667104)		1
W	URL: https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019 Fetched: 11/12/2023 5:00:00 PM		1
SA	IEB 451 - Yasmín Jara, Yoseph Rodríguez y Stefania Henríquez.pdf Document IEB 451 - Yasmín Jara, Yoseph Rodríguez y Stefania Henríquez.pdf (D121814331)		1
SA	artículo en español.docx Document artículo en español.docx (D121937574)		1
W	URL: https://www.rtve.es/noticias/20221111/emisiones-globales-co2-record-2022/2408743.shtml Fetched: 11/12/2023 5:00:00 PM		1

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO EVALUADOR

PRESIDENTE: Dr. JOSÉ PABLO RIVERA RODRÍGUEZ

SECRETARIO: Mtro. ABNER JOSUÉ VIGO ROLDÁN

VOCAL: Mg. ALEX WILLY PILCO NÚÑEZ

ASESOR: Mg. MANUEL DANIEL OLCESE HUERTA

Nº DE LIBRO: 01

Nº DE FOLIO: 125

Nº DE ACTA: 003-2023

FECHA DE APROBACION DE TESIS: 18 DE NOVIEMBRE, 2023

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

TÍTULO:

“EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE FUENTE INDUSTRIAL EN LA BIOFIJACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN FOTOBIORREACTOR A NIVEL PILOTO”

AUTORES:

JHONNY MÁXIMO AGUIRRE ALIAGA / 0009-0002-4746-4104 / 71350583

RENZO FRANK CARRASCO MIÑAN / 0009-0001-9421-9382 / 70863060

SUSAN PAMELA CUADROS GÓMEZ / 0009-0002-2274-8231 / 47222549

ASESOR:

MANUEL DANIEL OLCESE HUERTA / 0000-0002-5499-7972 / 07737617

LUGAR DE EJECUCIÓN:

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE ESPECIALIZACIÓN EN AGROINDUSTRIA - IIEA - CIUDAD UNIVERSITARIA - UNAC

UNIDAD DE ANÁLISIS: FOTOBIORREACTOR A NIVEL PILOTO

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: BÁSICA / CUANTITATIVO / EXPERIMENTAL

TEMA OCDE: 2.08.01 - BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

DEDICATORIA

Agradezco a Dios y Mama Huarina por bendecirme y permitirme cumplir un nuevo objetivo. Dedico este trabajo a mis padres Irene y Maximiliano por ser los pilares más importantes en mi vida y por demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional. A mis tíos Víctor y Edith quienes son mis segundos padres, por siempre estar dispuestos a escucharme y brindarme su apoyo en cualquier momento. A mi hermana Pamela que con sus palabras me alentó a seguir la carrera. A mis compañeros, Renzo y Pamela porque sin el equipo que formamos, no habiéramos logrado esta meta.

Jhonny Aguirre.

En primer lugar, le agradezco a Dios por darme fuerzas y disposición para poder culminar esta investigación. Por otro lado, a mi hermosa e incondicional madre Ana por el amor infinito que me tiene y el empuje que me da siempre para ser mejor persona cada día; a mi padre Raúl por sus constantes muestras de amor y no solo por el apoyo total para solventar la tesis sino de superación para poder completar y cumplir con mis metas a futuro, así mismo; a mi hermano Renato que es una de las razones por la que sigo adelante. A mi toffy, mi hijo, mi rey, por ser el motor y motivo para seguir con todo lo que hago. Los amo eternamente. Agradezco a mi familia en general, a mis amigos y a personas allegadas a mí por su apoyo, principalmente a mis compañeros de tesis, que sin su cariño y trabajo incansable habiéramos podido subir un escalón más hacia nuestra formación profesional. Los quiero.

Renzo Carrasco.

Agradezco a Dios por bendecirme y por darme la oportunidad de estar y disfrutar de este logro al lado de las personas que más me aman. Dedico principalmente este proyecto a mis padres Yolanda y José, por su apoyo infinito siempre y por confiar y creer en mí y en mis proyectos. A mis hermanos, por siempre impulsarme a ser una mejor profesional y por sus valiosos consejos. Gracias a mis compañeros de tesis por su incondicional apoyo y por creer en la realización de esta tesis. Los quiero.

Pamela Cuadros.

AGRADECIMIENTO

Al Mtro. Manuel Daniel Olcese Huerta, por su colaboración como asesor de la presente tesis.

A Blga. Gheraldine Ynga Huamán y Blgo. Alberto Oscanoa Haynate, del Instituto del Mar del Perú – IMARPE, por su apoyo técnico y científico brindado durante la realización de la investigación.

A Ing. Mabel Luna y al Instituto de Investigación de Especialización en Agroindustria - IIEA, por acogernos como tesisistas de su centro de investigación.

A Los profesores de esta casa de estudios, quienes de una u otra forma han tenido relación con nuestra formación profesional.

Los autores.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	1
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.1. Descripción de la realidad problemática	11
1.2. Formulación del problema	13
1.2.1. Problema general	13
1.2.2. Problemas específicos	13
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
1.4. Justificación	14
1.4.1. Social.....	14
1.4.2. Tecnológica y económica	14
1.4.3. Ambiental	15
1.4.4. Legal.....	15
1.5. Delimitantes de la investigación.....	16
1.5.1. Teórica	16
1.5.2. Temporal	16
1.5.3. Espacial.....	16

II. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes del estudio.....	17
2.1.1. Antecedentes internacionales	17
2.1.2. Antecedentes nacionales	19
2.2. Bases teóricas	21
2.2.1. Emisiones industriales.....	21
2.2.2. Emisiones de dióxido de carbono.....	23
2.2.3. Emisiones de gases de efecto invernadero.....	23
2.2.4. Ciclo del Carbono.....	27
2.2.5. Dióxido de carbono.....	28
2.2.6. Concentración de dióxido de carbono	29
2.2.7. Concentración de CO ₂ atmosférico	31
2.2.8. El CO ₂ y su implicancia ambiental.....	32
2.2.9. Fijación de CO ₂	32
2.2.10. Captura de dióxido de carbono con microalga	33
2.2.11. Fijación biológica del CO ₂	34
2.2.12. Parámetros que influyen en el proceso de biofijación de CO ₂	38
2.2.13. Tasa de fijación de dióxido de carbono	42
2.2.14. Eficiencia de utilización de carbono.....	42
2.2.15. Microalga Chlorella vulgaris	43
2.3. Marco Conceptual.....	43
2.3.1. Emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial.....	43
2.3.2. Biofijación de dióxido de carbono con la microalga Chlorella vulgaris ..	44
2.4. Definición de términos básicos	45
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	47

3.1. Hipótesis.....	47
3.1.1. Hipótesis general.....	47
3.1.2. Hipótesis específica.....	47
3.1.3. Operacionalización de variables.....	48
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	49
4.1. Diseño metodológico	49
4.2. Método de investigación	50
4.2.1. Obtención y reproducción del cultivo microalgal de <i>Chlorella vulgaris</i> .50	
4.2.2. Armado e instalación del sistema automatizado para los fotobiorreactores.....	51
4.2.3. Inoculación de la microalga a las unidades experimentales.....	53
4.2.4. Inyección de dióxido de carbono y medición de parámetros de cultivo	54
4.2.5. Determinación de la concentración de la biomasa microalgal	55
4.3. Población y muestra	56
4.3.1. Población.....	56
4.3.2. Muestra	56
4.3.3. Lugar del estudio.....	57
4.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	57
4.5. Análisis y procesamiento de datos	57
4.6. Aspectos éticos de la investigación	60
V. RESULTADOS	61
5.1. Resultados descriptivos.....	61
5.1.1. Parámetros de operación	61
5.1.2. Tasa de fijación de dióxido de carbono - RCO ₂	62
5.1.3. Eficiencia de utilización de carbono - CUE.....	64

5.2. Resultados inferenciales.....	67
5.2.1. Prueba de igualdad de varianzas de los residuos	67
5.2.2. Análisis univariado de la varianza	68
5.2.3. Comparaciones múltiples entre tratamientos	70
5.3. Otro tipo de resultados estadísticos.....	72
5.3.1. Prueba de normalidad para errores.....	72
5.3.2. Prueba de independencia de los residuos.....	73
5.3.3. Homogeneidad de varianzas de los errores	74
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.....	77
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	78
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.....	79
VII. CONCLUSIONES	81
VIII. RECOMENDACIONES.....	82
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
ANEXOS	91
Anexo 1: Matriz de Consistencia.....	91
Anexo 2: Instrumentos validados	93
Anexo 3: Base de datos	96
Anexo 4: Informe de ensayo de composición de carbono en la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	102
Anexo 5: Panel Fotográfico	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de gases de efecto invernadero	24
Tabla 2 Tipos de movimientos del carbono	27
Tabla 3 Propiedades físicas y químicas del CO ₂	28
Tabla 4 Toxicidad del CO ₂ en humanos	30
Tabla 5 Composición del medio de cultivo F/2 Medium.....	39
Tabla 6 Clasificación taxonómica de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	43
Tabla 7 Matriz de operacionalización de variables	48
Tabla 8 Diseño factorial de experimentación	58
Tabla 9 Estadísticos descriptivos para RCO ₂ por concentración y día en mg/L/d	62
Tabla 10 Media por concentración de CO ₂ suministrado y global de RCO ₂ en mg/L/día.....	63
Tabla 11 Estadísticos descriptivos para CUE por concentración y día en %....	65
Tabla 12 Media por concentración de CO ₂ suministrado y global de CUE en %	65
Tabla 13 Prueba de igualdad de varianzas de Levene para RCO ₂ de los residuos	67
Tabla 14 Prueba de igualdad de varianzas de Levene para CUE de los residuos	68
Tabla 15 Análisis univariado de varianza para RCO ₂	69
Tabla 16 Análisis univariado de varianza para CUE	70
Tabla 17 Prueba T2 de Tamhane para comparaciones múltiples de RCO ₂	71
Tabla 18 Prueba T2 de Tamhane para comparaciones múltiples de CUE	72
Tabla 19 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los errores de RCO ₂ y CUE	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Emisiones gaseosas de fuente fija y móvil.....	22
Figura 2 Emisiones de GEI en el Perú 2000 - 2019	26
Figura 3 Flujo de carbono natural y antropogénico	28
Figura 4 Evolución del CO ₂ atmosférico a escala de tiempo geológico	31
Figura 5 Evolución del CO ₂ atmosférico a escala de la historia humana	32
Figura 6 Esquema del proceso de fotosíntesis.....	35
Figura 7 Proceso fotosintético: fase lumínica y fase oscura.....	36
Figura 8 Proceso de fijación de CO ₂ (ciclo de Calvin-Benson).....	37
Figura 9 Diagrama de flujo de las experiencias.....	50
Figura 10 Obtención de la muestra de microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	51
Figura 11 Esquema de instalación del sistema	52
Figura 12 Sistema instalado para la experimentación	53
Figura 13 Dilución, mezcla e inoculación en unidades experimentales.....	54
Figura 14 Cámara de mezcla y flujómetros para el suministro de aire enriquecido con CO ₂	55
Figura 15 Toma de muestra para el análisis de concentración de biomasa.....	56
Figura 16 Evolución de los parámetros de operación respecto al día	61
Figura 17 Efecto de la concentración de CO ₂ en RCO ₂	63
Figura 18 Evolución de RCO ₂ en el tiempo y por concentración de CO ₂	64
Figura 19 Efecto de la concentración de CO ₂ en la CUE	66
Figura 20 Evolución de CUE en el tiempo y por concentración de CO ₂	67
Figura 21 Residuos vs orden de observación para RCO ₂	73
Figura 22 Residuos vs orden de observación para CUE.....	74
Figura 23 Valores pronosticados vs residuos para RCO ₂	75
Figura 24 Valores pronosticados vs residuos para CUE	76

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ASTM	: American Society for testing and materials. (Sociedad Americana para pruebas y materiales)
BPD	: Barriles de hidrocarburos líquidos por día.
Cb	: Concentración de biomasa.
CUE	: Carbon utilization efficiency (Eficiencia de Utilización de Carbono).
DOE	: U.S. Department of Energy. (Departamento de Energía de Estados Unidos de América)
FBR	: Fotobiorreactor.
GEI	: Gases de Efecto Invernadero.
IIEA	: Instituto de Investigación de Especialización en Agroindustria.
IMARPE	: Instituto del Mar del Perú.
INGEI	: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change. (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
IUPAC	: International Union of Pure and Applied Chemistry. (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada)
MDL	: Mecanismo de Desarrollo Limpio.
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
MINEM	: Ministerio de Energía y Minas.
MMPCD	: Millones de pies cúbicos por día.
NETL	: National Energy Technology Laboratory. (Laboratorio Nacional de Tecnología Energética)
PCG	: Potencial de calentamiento global.
PNA	: Política Nacional del Ambiente al 2030 – Perú.
PUIP	: Procesos Industriales y Uso de Productos.
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
UTCUTS	: Uso de tierra, cambio de uso de tierra y silvicultura.
VVM	: Volumen de gas por volumen de medio de cultivo por minuto.

RESUMEN

La presente investigación se realizó con el propósito de evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

La metodología empleada fue suministrar aire enriquecido con dióxido de carbono en porcentajes de mezcla de 0%, 5% y 20% v/v a razón de 0.25 vvm a un cultivo de microalga *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de 6 L de volumen de trabajo, con una temperatura de 30 °C, luz incidente de 2500 Lux, pH entre 6.0 a 7.5, oxígeno disuelto menor a 14 mg/L y fotoperiodo 24/0.

Los resultados obtenidos para el suministro de 5% de mezcla gaseosa se obtuvo la mejor eficiencia de utilización de carbono con un valor de 48.05%, mientras que para el suministro del 20% de mezcla se obtuvo la mejor tasa de fijación con un valor de 558.56 mg/día, por lo tanto, concluimos que las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial tuvieron un efecto en la biofijación de dióxido de carbono con la microalga *Chlorella vulgaris* puesto que a medida que se varió la concentración de dióxido de carbono, se tuvo una biofijación diferente en cada tratamiento, corroborado con el p-valor (0.001 menor a 0.05) del análisis univariado de varianza para los indicadores de tasa de fijación de CO₂ y eficiencia de utilización de carbono.

Palabras clave: Tasa de fijación, fotobiorreactor, eficiencia de utilización de carbono.

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the greenhouse gas emissions from industrial sources in the biofixation of carbon dioxide with microalgae (*Chlorella vulgaris*) in a photobioreactor at pilot level.

The methodology used was to supply air enriched with carbon dioxide in mixing percentages of 0%, 5% and 20% v/v at a rate of 0.25 vvm to a culture of microalgae *Chlorella vulgaris* in a photobioreactor of 6 L working volume, with a temperature of 30 °C, incident light of 2500 Lux, pH between 6.0 and 7.5, dissolved oxygen less than 14 mg/L and photoperiod 24/0.

The results obtained were that for the supply of 5% gaseous mixture the best carbon utilization efficiency (CUE) was 48.05%, while for the supply of 20% mixture the best fixation rate was 558.56 mg/day. We come to the conclusion that greenhouse gas emissions from industrial sources had an effect on the biofixation of carbon dioxide with the microalga *Chlorella vulgaris* since as the concentration of carbon dioxide varied, there was a different biofixation in each treatment and it is corroborated by the p-value (0.001 less than 0.05) of the univariate analysis of variance (ANOVA) for the indicators of CO₂ fixation rate and carbon utilization efficiency.

Keywords: Fixation rate, photobioreactor, carbon utilization efficiency.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se desarrolló debido a que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero de fuente industrial son un problema global cuyos efectos ambientales como cambio climático, acidificación de los océanos, cambios en los ecosistemas terrestres, lluvias ácidas; y a la salud de las personas como problemas respiratorios, quemaduras de piel por lluvias ácidas, entre otros efectos; podrían ser significativos si no se actúa antes de que el problema se intensifique. Por otra parte, en la Política Nacional del Ambiente se identificó que el incremento de los GEI, se dan como consecuencia del uso indiscriminado de combustibles fósiles, evidenciando que los hábitats de especies de cultivo se están desplazando como consecuencia de estas emisiones en el clima. Alineado con la PNA, la Ley N° 30754 y Reglamento D.S. N° 013-2019-MINAM, brindan herramientas de carácter voluntario en la promoción de la reducción de los GEI por las organizaciones público y privadas con el objetivo de contribuir a los compromisos climáticos nacionales.

La biofijación de CO₂ por microalgas es una forma ambientalmente sostenible para mitigar las emisiones de gases de combustión del carbón. Las microalgas estudiadas por Hartwig y Vieira (2017), presentaron una biofijación diaria de CO₂ de 360.12 mg/L/d, cuando se cultiva con gases de combustión. Las cepas estudiadas pueden aplicarse como alternativa para reducir la emisión de gases de combustión por la quema de carbón para la producción de energía, generando biomasa con aplicabilidad biotecnológica.

El propósito del estudio se centra en fijar biológicamente el dióxido de carbono que se liberaría como un gas de efecto invernadero a la atmósfera en la microalga *Chlorella vulgaris*, como una técnica de mitigación de dicho GEI empleando un sistema de fotobiorreacción la cual contendrá el medio de cultivo con la microalga.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La Agencia Internacional de Energía publicó su último informe sobre el Estado de Energía y CO₂ Global en la cual describió que las emisiones de CO₂ se aceleraron en 2018 al mayor ritmo en cinco años y que la mayor producción de estas emisiones corresponde al 85% en los países de China, India y Estados Unidos. Por otra parte, las emisiones alcanzaron un nivel récord de 33143 millones de toneladas de CO₂, de las cuales un 28,6% correspondieron a China (+2.5% con respecto a 2017), un 14.75% a Estados Unidos (+3.1%) y un 6.94% a India (+4.8 %) (International Energy Agency – IEA 2019).

Las emisiones de gas CO₂ equivalente en el Perú ascendieron a 46 579 KT CO₂eq/año según el último inventario de emisiones del 2020 del Centro de Análisis de Información sobre Dióxido de Carbono (Grupo Banco Mundial 2023). En el mes de mayo de 2023, el Perú emitió la última comunicación de los gases de efecto invernadero al Panel intergubernamental de Cambio Climático, según este Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero – INGEI 2019, las emisiones únicamente para el gas de CO₂ se registró en 159 395,34 Gg CO₂/año y las emisiones totales de CO₂ equivalente fue de 210 404,42 Gg CO₂eq/año (MINAM 2023). Según Gustavo Suárez de Freitas, coordinador ejecutivo Programa Nacional de Conservación de Bosques del Ministerio del Ambiente informó al diario El Comercio que el Perú emite diariamente 380 mil toneladas de CO₂, que equivale a 138 700 GgCO₂/año, lo cual significa un aumento del 6% en la emisión de CO₂ en 2 años (El Comercio 2014).

En el Informe Final de Estimación de Emisiones Vehiculares en Lima Metropolitana elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI en el 2014 (Dawidowski, Sánchez y Alarcón 2014). Estimaron que las emisiones para el gas de CO₂ ascendió a 4200 GgCO₂/año para el año 2014, del mismo modo realizaron una proyección de emisión de CO₂ para el año 2030 que se tendría una emisión de 7500 GgCO₂/año, lo que significa un incremento de 78.6% en un periodo de 16 años.

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas, las emisiones de

gases de efecto invernadero son producidas por una gran variedad de actividades industriales. Las principales fuentes de emisión provienen de los procesos químicos y físicos que transforman materiales, asimismo, existen fuertes evidencias de que el incremento de emisiones de gases de GEI debido a las actividades antropogénicas son la causa del aumento de la temperatura media en la Tierra (IPCC 2007). Los principales gases de efecto invernadero responsables del aumento de la temperatura son: Dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno y un grupo de compuestos gaseosos que contienen cloro y flúor, como halogenuros de carbono, perfluorocarburos y hexafluoruro de azufre (Martínez, 2008). En la actualidad, la actividad industrial ha generado una dependencia en todos los sectores de muchos países, teniendo como principal aporte el crecimiento económico y la cobertura de las necesidades de la sociedad, sin embargo, trae consigo emisiones de gases que son propias de la actividad industrial, generando un desequilibrio atmosférico (Jerí 2018).

Por dichos motivos se tiene la necesidad de mitigar los GEI, lo que implica realizar modificaciones en las actividades cotidianas de las personas y en las actividades económicas, con el objetivo de lograr una disminución de estas emisiones a fin de reducir y hacer menos severos los efectos del cambio climático. Por su parte, de acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), las medidas de mitigación son aquellas políticas y tecnologías que tienden a limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar los sumideros de estos (Argentina.gob.ar 2023).

Dicho esto, las actividades industriales que satisfacen la demanda nacional como fuente para la elaboración de alimentos, generación de energía, procesamiento de alimentos, entre otros usos, al final de su proceso generan emisiones de CO₂ no controladas la atmósfera de esta manera contribuyen al calentamiento global. Para ello, existen diversas tecnologías que se enfocan directamente a la reducción del CO₂ y evitan que las diversas actividades industriales contribuyan al aumento de dichas emisiones. La tecnología que tiene mayor eficiencia es el uso de las microalgas como tecnología biológica para capturar y fijar el CO₂ por su alta habilidad en la fotosíntesis, así mismo, tienen

una alta capacidad de crecer en altos niveles de gas procedente de la industria entre 12% a 15% de CO₂ (Pourjamshidian et al. 2019). Este proceso de biomitigación tiene muchas ventajas comparadas con la agricultura y plantas acuáticas; como una alta tasa de crecimiento y gran habilidad para fijar CO₂, asimismo, ha recibido mucha atención como una alternativa comparada con la fijación química y física (Filali et al. 2011).

Una debilidad encontrada, es que las emisiones de GEI y en específico las emisiones de CO₂ no tienen una regulación normativa específica que limite y/o obligue al generador a mitigar o tratar sus emisiones, tal como sucede con los contaminantes primarios atmosféricos.

De aquí la importancia a lo planteado, de la necesidad de utilizar tratamientos o alternativas de solución que permitan fijar las emisiones de CO₂, todo ello con la finalidad de aplicar esta tecnología ambiental que contribuye a reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y a la reducción de los gases de efecto invernadero.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿En qué medida las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial influyen en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál será la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 0% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto?
- ¿Cuál será la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 5% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto?
- ¿Cuál será la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 20% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 0% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.
- Determinar la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 5% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.
- Determinar la influencia de la de concentración de dióxido de carbono al 20% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

1.4. Justificación

1.4.1. Social

La principal causa del calentamiento global es inducida por los humanos y se debe al aumento principalmente del dióxido de carbono; de manera que la salud de muchas personas se vería afectada de manera progresiva, ocasionando un incremento de la desnutrición, muertes, enfermedades, lesiones asociadas con olas de calor, inundaciones, tormentas, incendios, sequías, enfermedades respiratorias, distribución espacial alterada, entre otros (Ballesteros y León 2007). Asimismo, es de importancia para el sector industrial poner en práctica su compromiso con el medio ambiente y con la población para evitar la degradación de este debido a que las futuras generaciones lucharán contra el cambio climático y la escasez de los recursos naturales (MINAM 2021a).

1.4.2. Tecnológica y económica

En la última década, los estudios se están dirigiendo hacia la fijación

biológica de CO₂ por fotosíntesis microalgal como un método viable técnica - económicamente y de mayor efectividad que las plantas terrestres, no sólo por reducir las emisiones de dióxido de carbono, sino paralelamente se podría producir industrialmente compuestos de gran importancia comercial, tales como biomasa para alimentación humana y animal, pigmentos de tipo carotenoides y ficocianinas, compuestos multivitamínicos, biofiltros, compuestos sulfolípidicos, biocombustibles, biohidrógeno, entre otros (Seijas et al. 2012).

1.4.3. Ambiental

Los gases de efecto invernadero incrementados por las emisiones industriales pueden ser la causa del calentamiento global hoy en día, el cual se manifiesta en un aumento de la temperatura global, que generará un aumento en el nivel del mar, cambios en los regímenes de precipitación y en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (tales como tormentas, huracanes, fenómeno del Niño y Niña), además de presentarse una variedad de impactos sobre diferentes componentes, tales como la agricultura, los recursos hídricos, los ecosistemas, entre otros (Ballesteros y León 2007).

Según la Política Nacional del Ambiente al 2030 aprobado mediante Decreto Supremo N° 023-2021-MINAM. Las emisiones GEI se dan como consecuencia de las actividades de deforestación, quema de bosques, uso indiscriminado de combustibles fósiles, entre otros. Evidenciando que los hábitats de especies de cultivo se están desplazando como consecuencia de estas emisiones y sus efectos en el clima ya son evidentes (MINAM 2021a).

En ese sentido, la reducción de GEI mediante la captura de dióxido de carbono con microalgas, se presenta como una alternativa eficiente para reducir y mitigar los efectos negativos causados por las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Giraldo 2013).

1.4.4. Legal

A nivel legal, no existe una normativa que regule las emisiones de dióxido de carbono de fuente industrial, sin embargo, existe el compromiso por parte de las empresas de implementar dentro de su organización, la Huella de carbono aprobada Decreto Supremo N° 013-2019-MINAM como una herramienta digital,

gratuita y de carácter voluntario, de promoción de la reducción de GEI por las organizaciones privadas y públicas; con el objetivo de contribuir a los compromisos climáticos nacionales (MINAM 2021b).

Según la Ley N° 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático, establece que el Ministerio del Ambiente es la autoridad nacional en materia de cambio climático y la autoridad técnico-normativa a nivel nacional en esta materia. En ese sentido, en el marco de sus competencias monitorea y evalúa la implementación de la gestión integral del cambio climático en los tres niveles de gobierno, promoviendo la participación del sector público y los actores no estatales a fin de fortalecer la gestión integral del cambio climático y al desarrollo sostenible en armonía con la naturaleza.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Teórica

La investigación se delimitó teóricamente por la definición conceptual de emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial y la biofijación de dióxido de carbono por microalgas, extraída de libros, tesis y artículos científicos específicos, se compararon los resultados obtenidos y se discutieron de manera científica para ampliar el contenido en la ingeniería del tratamiento de GEI y aportar en la reducción de la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se vierten a la atmósfera.

1.5.2. Temporal

La presente investigación se desarrolló en 4 meses, partiendo desde la concepción del proyecto de investigación hasta la elaboración y presentación del informe final de tesis.

1.5.3. Espacial

La investigación se desarrolló en el Instituto de Investigación de Especialización en Agroindustria – IIEA ubicado en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional del Callao, cuyos ambientes generales se emplearon para el desarrollo de la parte experimental (implementación del fotobiorreactor y desarrollo experimental) y el laboratorio para el análisis de la microalga.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Vergara, Sanclemente y Ararát (2023) en su investigación titulada “Biofijación de CO₂ por dos especies de microalgas cultivadas en fotobiorreactores”, tuvo como objetivo evaluar la capacidad de biofijación de dióxido de carbono por las especies de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus*. La metodología empleada fue el crecimiento de las microalgas en fotobiorreactores con fotoperiodo 12:12 con un diseño experimental de 2 factores y 2 niveles: concentración de biomasa y dosificación de CO₂ (0.36: 11.44 y 22.62 g/d), se empleó un volumen de trabajo de 3.8 L e iluminación artificial de 440 lúmenes. Los resultados obtenidos fueron que la mayor biofijación de CO₂ por *C. vulgaris* y *S. obliquus* se registró a la dosis de 11.44 g/d con 161.79 ± 4.72 y 55.31 ± 0.73 mg/L/d, respectivamente. La eficiencia de remoción de CO₂ fue significativamente mayor con la dosis 0.36 g/d registrando valores de 49.80 ± 3.16 y $39.13 \pm 0.57\%$ para *C. vulgaris* y *S. obliquus* respectivamente.

Zheng et al. (2020) en su investigación titulada “Simultaneous fixation of carbon dioxide and purification of undiluted swine slurry by culturing *Chlorella vulgaris* MBFJNU-1”, tuvo como objetivo evaluar la fijación de CO₂ y el rendimiento del tratamiento de aguas residuales (purines de cerdo) de la microalga *Chlorella vulgaris*. La metodología empleada fue en un fotobiorreactor de 1 L de capacidad de trabajo a 25 °C y 5500 Lux con concentraciones de burbujeo de 1, 5, 10 y 20% de CO₂ de mezcla gaseosa con tiempos de ventilación de 6, 12, 18 h/d y tasas de ventilación de 400, 600, 800 y 1000 mL/min. Los resultados obtenidos mostraron que *Chlorella vulgaris* alcanzó la biomasa más alta con 3.08 g/L bajo las condiciones optimizadas (5% CO₂, 24 h/día de tiempo de ventilación y 1000 mL/min de tasa de ventilación). Además, al final de los ensayos, *Chlorella vulgaris* para tratar purines de cerdo alcanzó una tasa de eliminación de nitrógeno total del 74%, de nitrógeno amoniacal del 78% y de fósforo total del 87%. La mayor tasa de fijación de CO₂ fue de 454 mg/L/d.

Bustos y Fabio (2022) en su investigación titulada “Evaluación del efecto

de la concentración de CO₂ en un cultivo de *Chlorella sp.* y su aplicación en la industria”, tuvo como objetivo evaluar el efecto de la concentración de CO₂ en un cultivo mixto de microalgas bajo condiciones de laboratorio. La metodología empleada fue la utilización de reactores (1.9 L) con 1.5 L de medio de cultivo BBM modificado estéril y 230 mL de cultivo inicial. El suministro de CO₂ y aire fue realizado por tubería de poliuretano de 6 mm de diámetro y racores de acople rápido evaluando cinco concentraciones de CO₂ (0.04, 5, 10, 15 y 20% de CO₂). El control de flujo fue de 0.57 L/min, se utilizaron piedras difusoras para el suministro de CO₂ favoreciendo el tamaño de burbujas de tamaño pequeño en el medio de cultivo. La fuente de CO₂ (99.5%) y aire (20.93% oxígeno, balance nitrógeno) se realizó a partir de cilindros industriales. El resultado se logró en la concentración de CO₂ de 5% (27.0% de CUE).

Jain et al. (2018) en su investigación titulada “CO₂ fixation and production of biodiesel by *Chlorella vulgaris* NIOCCV under mixotrophic cultivation”, tuvo como objetivo determinar la resistencia de la microalga *Chlorella vulgaris* a diferentes concentraciones de CO₂ suministrado y determinar el grado de producción de lípidos. La metodología desarrollada fue el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* en agua residual de procesamiento de mariscos en un fotobiorreactor tubular con un volumen de trabajo de 4 L, con suministro constante de CO₂ al 5%, 10% y 20%. Se trabajó con una salinidad entre 0.5 a 3.5‰, 100 µmol/m²/s en un periodo de 4 días. Los resultados fueron: La eficiencia óptima de fijación de CO₂ fue de 430 mg/L/d, productividad de biomasa 264.58±8.8 mg/L/d, tasa específica de crecimiento de 0.46 d⁻¹ y contenido de lípido en base al peso seco de 38±2.6%, todos ellos para el suministro del 10% de CO₂.

Hartwig et al. (2017) en su investigación titulada “Biological CO₂ mitigation from coal power plant by *Chlorella fusca* and *Spirulina sp.*”, tuvo como objetivo mitigar las emisiones de CO₂ provenientes de centrales eléctricas de carbón mediante la mitigación biológica con microalgas. La metodología desarrollada fue el cultivo de las microalgas en fotobiorreactores de frascos Erlenmeyer con un volumen de trabajo de 1.8 L bajo condiciones de suministro de CO₂ en rangos de 10 a 12%, NO_x de 400 ppm, SO_x de 5000 ppm y cenizas

de 650 ppm, este gas se burbujeo a una tasa de 0.05 vvm cada 2 horas en el periodo de luz por 15 min. Los resultados fueron que la *Chlorella fusca* aislada de una central eléctrica de carbón podía fijar 2.6 veces más CO₂ que la *Spirulina* sp. La máxima biofijación diaria de CO₂ procedente de gases de combustión de carbón se obtuvo con *Chlorella fusca* (360.12 ± 0.27 mg/L/d), mostrando una tasa de crecimiento específica de 0.17 ± <0,01 d⁻¹.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Calderón (2022) en su investigación titulada “Evaluación de la depuración de CO₂, H₂S y la concentración de CH₄, mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, sp) para obtención de biometano, a partir del biogás generado de los efluentes de la planta extractora de palma de aceite INDOLMASA”, tuvo como objetivo evaluar la depuración del CO₂ y H₂S para una alta concentración de CH₄, mediante el tratamiento biológico con microalgas (*Chlorella vulgaris*, sp). La metodología empleada fue utilizar el biogás de un biodigestor que por descomposición anaeróbica produce aproximadamente 7 m³ de biogás diario con una composición de 39.6% de CO₂, para purificar el biogás se establecieron tres tratamientos y un piloto/testigo, distribuidos y contenidos de la siguiente manera: T0 (0% de MA y 60 L H₂O y 0 mL Biol); T1: (10% MA, 60 L H₂O y 50 mL Biol); T3: (30% MA, 60 L H₂O y 100 mL Biol); T3: (60% MA, 60 L H₂O y 150 mL Biol) utilizando como muestra total 1,08 m³ de biogás, así mismo, el uso de un fotobiorreactor de retención del biogás, que interactuó más con las microalgas y fijo CO₂. Los resultados fueron que el testigo de la prueba con 60 L de agua y el T1 (1.1 L de microalgas, 60 L de agua y 50 mL de biol) generaron un 32% de CO₂ en el biogás obtenido, para el T2 (3.3L microalgas, 60 L de agua y 100 mL de biol) generó una concentración de 26% de CO₂ y 39% de CO₂ para el T3 (6.6 L microalgas, 60 L de agua y 150 mL biol), siendo el T2 la que obtuvo mayor reducción de CO₂.

Seijas et al. (2012) en su investigación “Escalamiento de fotobiorreactor solar secuestrante de CO₂ de gases de combustión optimizando producción de Espirulina” tuvo como objetivo diseñar y escalar un fotobiorreactor solar tipo tubular secuestrante de dióxido de carbono procedente de gases de combustión

empleando la microalga espirulina. La metodología empleada fue iniciar preparando el inóculo, el cual se cultivó en 10 cámaras de 250 mL cada una. Se implementó el sistema de combustión estacionario de CO₂ conformado por una caldera acuotubular con una concentración de CO₂ inicial de 11,68 v/v% y el otro sistema conformado por un fotobiorreactor tubular. Se empleó el diseño experimental completamente aleatorizado, conformándose 5 grupos con tres repeticiones cada uno: A (testigo), B, C, D y E. En cada grupo se utilizaron diferentes tiempos en el que se realizó la cosecha (0, 48, 72, 96 y 120 horas respectivamente). Terminado el tiempo respectivo se procede a evaluar el secuestro del dióxido de carbono por parte de espirulina, esto se realizó a través de la determinación de la bioconversión del CO₂ mediante la evaluación tanto de la producción de biomasa microalgal (crecimiento) así como de la producción de oxígeno; además se evaluó la salida de los gases de combustión del fotobiorreactor. Los resultados fueron que el grupo D tuvo mejor concentración de CO₂ en el gas de salida 4,91 v/v%, siendo el factor determinante el tiempo de cosecha.

Rucoba (2017) en su investigación “Eficiencia en la captura de carbono atmosférico a partir de cuatro géneros de algas fotosintéticas en el distrito de Moyobamba - 2015” tuvo como objetivo aislar 04 especies de microalgas e inocularlas a fotobiorreactores para determinar la tasa y productividad microalgal, así mismo la capacidad de captura de carbono. La metodología empleada para el cultivo de algas fue un fotobiorreactor de sistema abierto con 5 g de masa microalgal a temperatura ambiente de la zona de Moyobamba a 23.9 °C promedio, con muestreo de parámetros de operación constante. Los resultados fueron que los géneros *Scenedesmus spp* y *Cosmarium spp*, son los que mayor cantidad de carbono capturaron; es decir, son los géneros algales de mayor eficiencia en la captura de carbono en el proceso evaluado con iguales condiciones durante un mes de cultivo; el género *Scenedesmus spp* tiene una concentración inicial de 7.07%C y el género *Cosmarium spp* tiene una concentración de 5.63%C, los valores de la concentración de carbono sirvieron para determinar que géneros son los que mayor captura de carbono han logrado en la misma cantidad de tiempo, el peso en kilogramos que se determinó son

0,0016043244 kg y 0,0016038744 kg respectivamente.

2.2. Bases teóricas

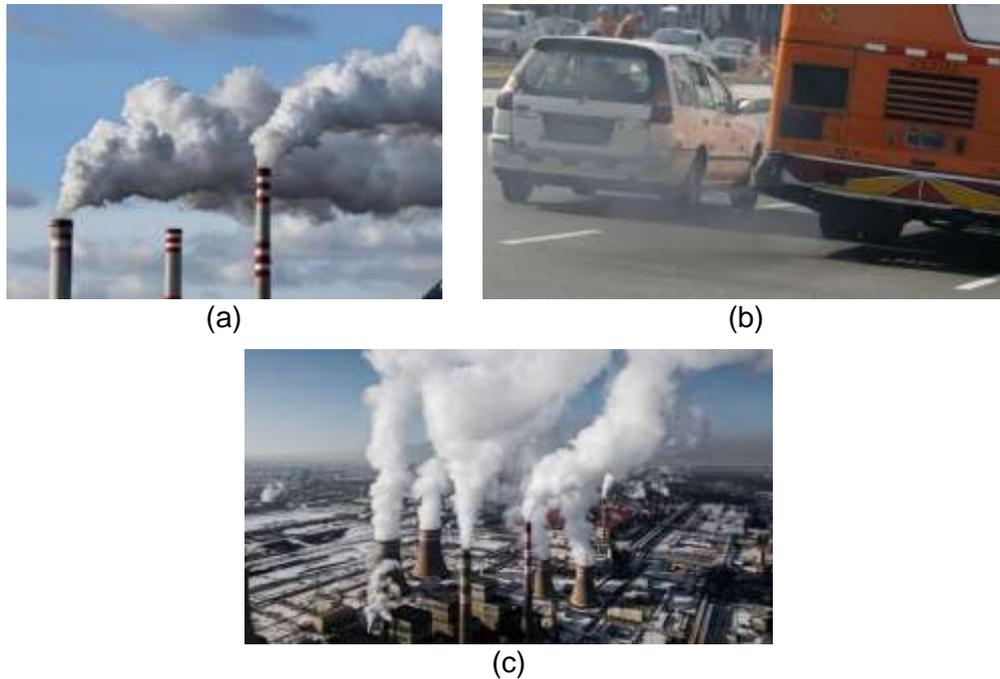
2.2.1. Emisiones industriales

Las emisiones industriales se consideran de 2 tipos: (1) fuentes fijas (estacionarias) y suelen ocupar un área limitada en relación con una comunidad y (2) fuentes móviles (que por su característica abarcan un área grande determinado) (Pfafflin y Ziegles 2006, p. 72) ver Figura 1. Estas emisiones industriales incluyen:

- ✓ Plantas industriales y manufactureras.
- ✓ Centrales eléctricas de vapor.
- ✓ Incineradoras industriales y municipales.
- ✓ Instalaciones que utilicen disolventes (revestimiento de superficies, desengrasado, limpieza en seco, fabricación de plásticos, fabricación de caucho) y pierden productos derivados del petróleo por evaporación.
- ✓ Instalaciones que pierden productos derivados del petróleo por almacenamiento y comercialización (parques de tanques, estaciones de servicio) operaciones.
- ✓ Vehículos de motor, aviones, barcos y ferrocarriles en los que se produzca la combustión de combustibles para el transporte.
- ✓ Vertederos, incineradoras, etc. en los que se produzca la combustión de residuos.
- ✓ Instalaciones o unidades en las que se produzca la descomposición de residuos orgánicos.
- ✓ Plantas de tratamiento de aguas residuales.

Figura 1

Emisiones gaseosas de fuente fija y móvil



Nota. (a) Emisiones de gases de fuente industrial de fuente fija, (b) Emisiones de gases de fuente móvil, (c) Emisiones de gases de una central térmica de china. Tomado de (Giraldo 2022; Exitosa 2023; RTVE 2022)

Las plantas industriales constituyen un sistema químico muy variado y complejo, presentando cada industria un problema de contaminación atmosférica único. Las características de las emisiones producidas están directamente relacionadas con las peculiaridades de la operación en cuestión, es decir, con las materias primas, los combustibles, el método de proceso, la eficacia del proceso elegido, el método y el tipo de medidas de control de la contaminación atmosférica aplicadas.

Las fuentes menores son aquellas que no pueden catalogarse prácticamente fuente por fuente. Pueden ser estacionarias o móviles y suelen estar repartidas por toda la comunidad. Estas fuentes están asociadas a (Pfafflin, Ziegles 2006, p. 73):

- ✓ Combustión de combustibles en residencias, edificios comerciales e instituciones.

- ✓ Industrias de servicios, como lavanderías, tintorerías, servicios de reparación, etc.
- ✓ Procesamiento de animales.
- ✓ Manipulación y utilización de pinturas, lacas y otros recubrimientos de superficies que contengan disolventes orgánicos.
- ✓ Procesado de alimentos en restaurantes, parrillas, café, etc.

2.2.2. Emisiones de dióxido de carbono

Se encuentra comúnmente en la Tierra y ocurre naturalmente en cantidades pequeñas (cerca de 0.04%) en la atmósfera (García 2020). Su obtención se encuentra ligada a dos tipos de fuentes: (1) Fuentes Naturales de CO₂: Las fuentes naturales de CO₂ representan la mayor parte del CO₂ liberado a la atmósfera. Los océanos proporcionan la mayor cantidad anual de CO₂ de cualquier fuente natural o antropogénica. (2) Fuentes Antropogénicas de CO₂: Las fuentes antropogénicas de CO₂ son parte de nuestras actividades cotidianas e incluyen las de generación de energía, transporte, fuentes industriales, producción química, producción de petróleo y prácticas agrícolas.

2.2.3. Emisiones de gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero se clasifican en directos e indirectos. En la Tabla 1 se detallan estos tipos de gases.

De todos los gases emitidos, el más significativo es el CO₂. El cuál es el GEI más común e importante pues está asociado a las actividades humanas, además que forma parte del ciclo natural del carbono, el CO₂ juega un papel principal en un gran número de procesos biológicos Natural y antropogénico. Las emisiones de gases de fuente industrial provienen del consumo de combustibles fósiles como carbón, petróleo, gas natural, que emplean los combustibles para la obtención de energía (Ballesteros y León 2007).

Tabla 1*Tipos de gases de efecto invernadero*

GEI	Descripción	Fuente
GEI Directos		
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Es el GEI más común e importante, está asociado a las actividades humanas. Dentro del ciclo natural del carbono, el CO ₂ juega un papel principal en un gran número de procesos biológicos	Natural y antropogénico (consumo de combustibles fósiles como carbón, petróleo, gas natural. Quema de leña, por la tala y quema de bosques).
Metano (CH ₄)	El metano es un fuerte GEI y juega un papel importante en la determinación de la capacidad de oxidación de la troposfera. La carga atmosférica de metano a finales de la década de los 90's era de 4.8 x10 ¹⁵ gramos, más de dos veces la cantidad presente durante la era preindustrial.	Descomposición de materia orgánica en sistemas biológicos (fermentación entérica de herbívoros, descomposiciones anaerobias de estiércol de animales, cultivos de arroz de bajo riego, quemados de sabanas y residuos agrícolas, disposición de residuos sólidos, tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas e industriales, producción y distribución de gas natural, petróleo y explotación de carbón mineral).
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Contribuye con cerca del 6% del forzamiento del efecto invernadero. El óxido nitroso es inerte en la troposfera. Su principal sumidero es a través de las reacciones fotoquímicas en la estratosfera que afectan la abundancia de ozono estratosférico.	Natural y antropogénico: océanos, la quema de combustibles fósiles y biomasa y la agricultura (nitrificación y desnitrificación del suelo). Las emisiones generadas por suelos agrícolas y en menor grado por el consumo de combustibles fósiles para generar energía y las emitidas por descomposición de proteínas de aguas residuales domésticas, producción de ácido nítrico y adípico (nylon).
Compuesto Halogenados	Los halocarbonos tienen efectos sobre el forzamiento radiativo tanto directos como indirectos. Los clorofluorocarbonos (CFC _s), los cuales incluyen el CFC ₁₁ (CFC ₃) y el CFC ₁₂ (CF ₂ Cl ₂) son una familia de compuestos que no existen naturalmente en el ambiente. Otros compuestos que contienen cloro incluyen los hidroclorofluorocarbonos (HCFC _s), el metil cloroformo y el tetracloruro de carbono, los compuestos que contienen bromo están los halones, el bromuro de metilo y los hidrobromofluorocarbonos (HBFC _s)	Antropogénica: gases refrigerantes, solventes industriales, limpieza en seco, propulsor en los recipientes de aerosoles, fundición del aluminio, la fabricación de semiconductores, transmisión y distribución de energía eléctrica.
Ozono Troposférico (O ₃)	El ozono está presente en la estratosfera superior, donde protege la Tierra de niveles perjudiciales de radiación ultravioleta y en concentraciones más bajas en la troposfera, donde es el componente principal del smog fotoquímico antropogénico.	El ozono troposférico es producido a partir de reacciones químicas complejas de compuestos orgánicos volátiles que se mezclan con óxidos de nitrógeno (NOx) en presencia de luz solar.
Vapor de Agua (H ₂ O)	El vapor de agua sigue siendo el GEI más abundante en la atmósfera y las nubes son una parte importante del invernadero planetario de la Tierra. Los gases de invernadero, como el dióxido de carbono y el metano, son investigados quizás más extensamente, pero las nubes pueden provocar el	Las actividades humanas no están afectando directamente la concentración media global del vapor del agua; sin embargo, el forzamiento radiativo producido por el incremento en las concentraciones de otros GEIs puede afectar indirectamente el ciclo hidrológico. Una atmósfera más caliente tiende

GEI	Descripción	Fuente
	<p>mismo efecto: calientan nuestro planeta atrapando el calor que se encuentra debajo de ellas. A diferencia de los gases de invernadero, sin embargo, las nubes que reflejan los rayos solares también poseen una influencia refrigerante.</p>	<p>a incrementar su contenido de vapor de agua lo cual afectará la formación de nubes.</p>
GEI Indirectos		
Óxidos Nitrosos (NO _x)	<p>Los óxidos de nitrógeno forman una gran familia de gases traza que se presentan en la troposfera de la Tierra. Los compuestos más importantes son: el NO (óxido nítrico), el NO₂ (dióxido de nitrógeno el cual es un gas venenoso color marrón-rojizo que produce un olor muy fuerte), el HNO₃, los aerosoles nitrados y el Peroxi- Acetil- Nitrato (PAN). La suma del NO y el NO₂ es usualmente reportada como NO_x. El NO y el NO₂ son los compuestos inicialmente emitidos, mientras que los otros son productos secundarios resultantes de conversiones atmosféricas.</p>	<p>Naturales (quema de biomasa, relámpagos y actividad microbiana del suelo). Antropogénica (combustión en motores de automóviles y por las centrales de energía). Las emisiones de NO_x desde fuentes móviles son relacionadas a la mezcla aire/combustible, las temperaturas de combustión, así como los equipos de control. Para vehículos no controlados la proporción de emisiones de NO_x desde vehículos Diesel son generalmente más bajas que para un vehículo a gasolina y más bajas para un vehículo liviano que para uno pesado, los que contribuyen significativamente con las emisiones.</p>
Monóxido de Carbono (CO)	<p>El CO por sí mismo no contribuye directamente al efecto invernadero, a causa de su influencia sobre los radicales OH, el CO tiene la importancia climatológica ya que su cantidad afecta indirectamente la formación de otros GEI tales como el metano y el ozono troposférico. El CO es un producto intermedio de los procesos de combustión y en particular bajo condiciones estequiométricas de combustión. EL mecanismo de formación del CO es directamente influenciado por patrones de uso, tipo y tamaño del equipo, mantenimiento y tecnología de la operación.</p>	<p>Este es un GEI indirecto creado cuando el carbono contenido en los combustibles es quemado incompletamente, y posteriormente es oxidado a CO₂ a través de procesos naturales. La mayoría de las emisiones de CO de la combustión de combustibles proviene de los automotores. Otro gran contribuyente es el sector residencial desde pequeños equipos de combustión.</p>
Compuestos Orgánicos Volátiles diferentes al Metano (COVDM)	<p>Estos son GEI indirectos e incluye gases como el butano, propano y etano. Estos compuestos participan, junto a los NO_x, en la formación de ozono troposférico y otros oxidantes fotoquímicos.</p>	<p>La mayoría de las emisiones de COVDM de la combustión de combustibles proviene de los automotores. Otro gran contribuyente es el sector residencial (especialmente desde la combustión de biomasa) y los procesos industriales.</p>
Óxidos de Azufre y Partículas	<p>Los óxidos de azufre no son gases de efecto invernadero, pero su presencia en la atmósfera puede influenciar el clima. El SO₂ es un precursor de aerosoles (puede reaccionar con una gran variedad de oxidantes producidos fotoquímicamente para formar aerosoles sulfatados) y tiene un efecto de enfriamiento sobre el clima, por lo tanto, debe incluirse en la modelación del clima.</p> <p>Por otro lado, el hollín afecta la capacidad de reflejar el sol impidiendo que la nieve y el hielo reflejen la luz del sol.</p>	<p>Los aerosoles son pequeñas partículas, como el polvo volcánico, polvo del suelo, sal oceánica, arena suspendida por tormentas, productos de la combustión carbonácea, de la producción de cemento, incineración de residuos, quema de biomasa, la contaminación e incluso el rocío del mar, suspendidas en el aire. La concentración de estas partículas está incrementándose debido a la combustión de combustibles fósiles los cuales contienen azufre.</p> <p>El hollín se forma de la quema de combustibles fósiles y de la vegetación</p>

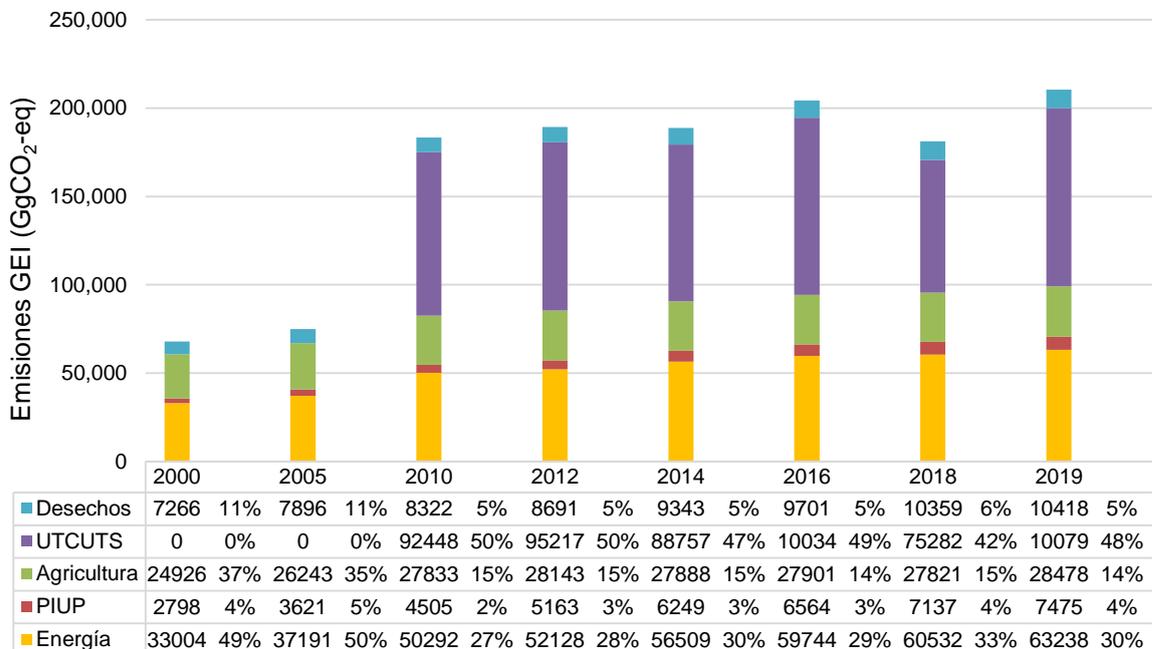
Nota. Adaptado de Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y Cambio Climático. (Ballesteros y León 2007).

En el Perú, según el INGEI 2000-2019. Las emisiones solamente de CO₂ provenientes de la generación de energía alcanzan unas emisiones de 51772.83 GgCO₂ las cuales pertenecen a las actividades de quema de combustibles y emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustibles, por otra parte, las emisiones netas de gases de efecto invernadero para este componente (Energía) alcanza una emisión de 63 238.17 GgCO₂-eq que representa el 30.1% de las emisiones totales de GEI (210 404.42 GgCO₂-eq) (MINAM 2023).

En la Figura 2, se evidencia la tendencia de las emisiones netas de GEI por sector desde el año 2000 al 2019 en base a los comunicados internacionales que envía el MINAM a la IPCC, la categoría Energía posee casi la tercera parte del total de las emisiones netas equivalente de CO₂ (34.5% en promedio) a lo largo del periodo de 2000 al 2019. Asimismo, en cuanto a la tendencia, esta categoría ha ido en aumento con un acumulado de 412637 GgCO₂-eq para el periodo descrito.

Figura 2

Emisiones de GEI en el Perú 2000 - 2019



Nota. UTCUTS es la categoría de Uso de tierra, cambio de uso de tierra y silvicultura, PIUP es la categoría Procesos Industriales y Uso de Productos. Adaptado del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000-2019 (MINAM 2023).

2.2.4. Ciclo del Carbono

El carbono es un elemento sólido no metálico formado en el núcleo de las estrellas hace millones de años y puede formar parte de una inmensa variedad de compuestos, puede formar parte de diferentes reservorios o componentes, entre los que fluye, constituyendo el llamado Ciclo del Carbono, que es el proceso a través del cual el carbono se circula a través del aire, tierra, plantas, animales y combustibles fósiles.

Este proceso es de carácter complejo y con gran importancia dentro del sistema Tierra. Entre los reservorios existen dos tipos de movimientos, uno de carácter lento, con un tiempo de residencia alto (ciclo geoquímico) y otro con un tiempo de residencia menor (ciclo biológico) (García 2014), como se describe en la Tabla 2.

Tabla 2

Tipos de movimientos del carbono

Tipos de Movimientos	Descripción
Ciclo Geoquímico	Este ciclo contiene tres componentes principales: litosfera, hidrosfera y atmósfera y se estima que más de $7,5 \cdot 10^7$ Pg de C se encuentran dentro de alguno de estos reservorios.
Ciclo Biológico	El carbono entra en el ciclo biológico a través de la fotosíntesis realizada por organismos fotoautótrofos. En ese ciclo se encuentran implicados solo unos $2-3 \cdot 10^3$ Pg de carbono. Su distribución se encuentra de la siguiente manera: i. La mayor parte del carbono forma parte de materia orgánica no viva como restos leñosos, turba o detritos (unos 1580 Pg de C). ii. Los vegetales contienen 610 Pg de carbono. iii. El carbono que forma parte de heterótrofos puede considerarse insignificante.

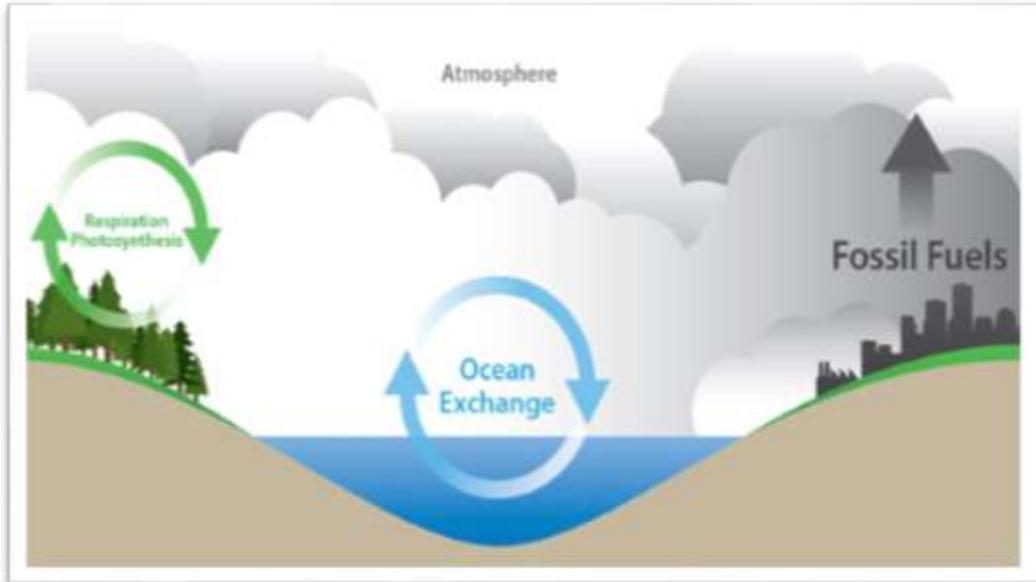
Nota. 1 Pg= 10^{15} g. Adaptado de (García Cubero 2014).

La Figura 3 muestra el Ciclo del Carbono mostrando cómo el carbono se mueve entre la tierra, la atmósfera y el océano a través de diversos procesos naturales y humanos.

Esta investigación está enfocada dentro del ciclo biológico del carbón, debido a que se utilizará una microalga como fijador del CO₂ atmosférico.

Figura 3

Flujo de carbono natural y antropogénico



Nota. Tomado de The National Energy Technology Laboratory - NETL of the U.S. Department of Energy - DOE. (DOE 2021).

2.2.5. Dióxido de carbono

El dióxido de carbono, también denominado óxido de carbono (IV) o anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono, su fórmula química es CO_2 . Su representación por la estructura de Lewis es: $\text{O}=\text{C}=\text{O}$. Es una molécula lineal y no polar, a pesar de tener enlaces polares. Esto se debe a que dada la hibridación del carbono la molécula posee una geometría lineal y simétrica (Lumitos 2023). Las propiedades físicas y químicas del CO_2 se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3

Propiedades físicas y químicas del CO_2

Propiedades	Valor	Observación
Estado físico	Gas incoloro	
Color	Incoloro	
Olor	Inoloro	Sin olor que advierta sus propiedades
Densidad	0.0018 g/cm ³ a 21 °C	Como vapor
Densidad relativa	0.82	Con relación al agua = 1

Propiedades	Valor	Observación
Punto de fusión o congelación	-56.6 °C	
Temperatura de ebullición	-88.1 °C	
Presión de vapor	5.73 MPa _{abs} a 20 °C	
Solubilidad en agua	2.0 g/L	
pH	No aplica	
Viscosidad	No aplica	
Punto de inflamación	No aplica	
Temperatura de autoignición	No aplica	
Peligro de explosión	Sin datos	Salvo el envase se someta a calentamiento extremo
Peso molecular	44.01 g/mol	
Volumen específico	0.55 m ³ /Kg a 21 °C	
Densidad relativa del vapor	1.52	Con relación al aire = 1

Nota. Adaptado de la Ficha de Datos de Seguridad de CO₂. (Air Products 2017).

2.2.6. Concentración de dióxido de carbono

Con frecuencia se emplean unidades de fracción de volumen o de fracción de mol para expresar la concentración de los gases. Las unidades de fracción de volumen más comunes son las partes por millón por volumen (que se representan como ppm o ppm_v) y concentración porcentual (que representa la composición porcentual del gas en particular). También se emplean unidades de masa por volumen (como mg/m³ y µg/m³) para el aire (Mihelcic y Zimmerman 2012), que se definen como:

$$C_{Gas_i} = \frac{m_i}{V_{Total}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$ppm_v = \frac{V_i}{V_{Total}} \cdot 10^6 \quad \text{Ec. 2}$$

$$[Gas_i] = \frac{V_i}{V_{Total}} \cdot 100\% \quad \text{Ec. 3}$$

Donde: m_i es la masa del Gas i analizada. V_{Total} es el volumen total que ocupa la mezcla gaseosa. V_i/V_{Total} es la fracción de volumen del gas i analizado en comparación con el volumen total de la mezcla gaseosa. 10^6 es un factor de conversión de unidades con unidades de ppm_v por fracción de volumen. 100% es un factor de conversión adimensional en porcentaje por fracción de volumen.

Para el caso del estudio del dióxido de carbono se hace referencia a la concentración de este, respecto a la mezcla gaseosa expresándose en porcentaje, según la Ecuación 3.

La ventaja de las unidades de volumen/volumen es que las concentraciones gaseosas que se reportan en estas unidades no cambian conforme el gas se comprime o se expande. Las concentraciones atmosféricas que se expresan como masa por volumen (por ejemplo, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) disminuyen a medida que el gas se expande, debido a que la masa del contaminante permanece constante pero el volumen aumenta. Con frecuencia, las unidades de masa/volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ y ppm_v) se usan para expresar la concentración de los gases (Mihelcic y Zimmerman 2012).

Asimismo, el CO_2 es asfixiante; a bajas concentraciones causa una falta de aire, a altas concentraciones causa narcosis, los síntomas que provoca en CO_2 se describen en la Tabla 4, para diferentes concentraciones de CO_2 .

Tabla 4

Toxicidad del CO_2 en humanos

Concentración (%)	Efecto
1	La tasa de respiración aumenta levemente.
2	La tasa de respiración aumenta en 50 % por encima del nivel normal. Exposición prolongada causa dolor de cabeza y fatiga.
3	La tasa de respiración aumenta dos veces por encima de lo normal y se torna difícil. Efecto narcótico suave. Perjudica la audición, causa dolor de cabeza, aumento de la presión sanguínea y de la tasa de pulsación.
4 - 5	La tasa de respiración aumenta aproximadamente 4 veces por encima de lo normal, síntomas de intoxicación se tornan evidentes y un leve sofocamiento puede sentirse.
5 - 10	Considerable olor penetrante. Respiración muy difícil, dolor de cabeza, confusión visual y zumbido de los oídos. Puede ser perjudicial, seguido por pérdida de la conciencia.
50 - 100	La inconsciencia ocurre más rápidamente por encima de 10 %. Exposiciones prolongadas a altas concentraciones pueden resultar en la muerte por asfixia

Nota. Adaptado de la Ficha de Datos de Seguridad de CO_2 . (PRAXAIR 2014).

2.2.7. Concentración de CO₂ atmosférico

Las concentraciones de CO₂ en la atmosfera han ido incrementando a lo largo del tiempo por las emisiones naturales de CO₂ en la Figura 4, se muestra dicha variación a lo largo de las eras geológicas. En los últimos seiscientos millones de años la concentración de CO₂ atmosférico viene disminuyendo desde los 7000 ppm hasta los 400 ppm actuales (García 2020, p. 53).

Figura 4

Evolución del CO₂ atmosférico a escala de tiempo geológico

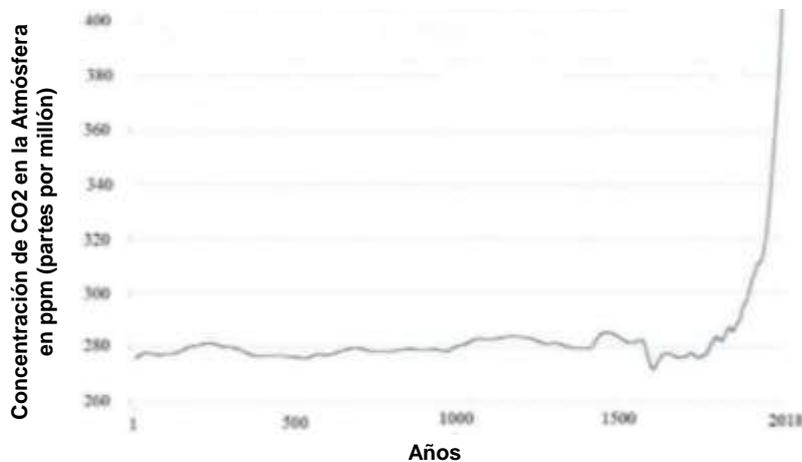


Nota. Tomado de (García 2020).

Desde el comienzo de la revolución industrial la concentración de CO₂ paso de 276.45ppm a 408.52ppm; pero, el cambio más drástico en la tendencia se produce a partir de mediados del siglo XX, que es una muestra clara de la influencia de las actividades antrópicas sobre la concentración de CO₂ atmosférica. Ver figura 5.

Figura 5

Evolución del CO₂ atmosférico a escala de la historia humana



Nota. Tomado de (García 2020).

2.2.8. El CO₂ y su implicancia ambiental

La presencia de gases tales como dióxido de carbono (CO₂) y otros compuestos causan el fenómeno llamado efecto invernadero en la cual la atmósfera de la Tierra atrapa la radiación solar. El efecto invernadero natural de la Tierra actúa de manera similar, la luz solar que entra en la atmósfera se refleja, absorbe o simplemente pasa. La luz del sol que pasa a través de la atmósfera es absorbida por la superficie de la Tierra o reflejada en el espacio (DOE 2021).

Por último, el dióxido de carbono (CO₂) cumple un rol importante en el ciclo vital de las plantas y de los animales que forma parte del ciclo del carbono.

2.2.9. Fijación de CO₂

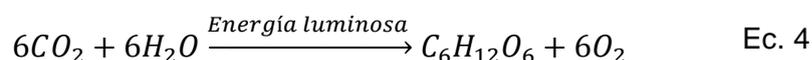
Distintos enfoques han sido introducidos con respecto a la fijación de CO₂, entre ellos se encuentran procesos físicos (almacenamiento biológico, almacenamiento en el océano, secuestro geológico), procesos químicos (carbonización mineral y depuración química) y procesos biológicos (reforestación, agricultura y microorganismos fotosintéticos), siendo los microorganismos fotosintéticos los más prometedores para la fijación de CO₂, debido a su capacidad de utilización de CO₂ como fuente de carbón para su producción de biomasa (Kassim y Meng 2017).

Una de las tecnologías relacionadas con la fijación del CO₂ es en forma de carbonatos inorgánicos e insolubles. Esa fijación se consigue mediante una reacción química, conocida como carbonatación mineral. En las reacciones de carbonatación, el CO₂ reacciona con materiales (mayoritariamente silicatos) que tienen óxidos metálicos (típicamente de metales alcalinos térreos) en su composición, formando así el correspondiente carbonato y sílice (SiO₂) como sub-producto (Santos, Esquivias y Ajbary 2020).

2.2.10. Captura de dióxido de carbono con microalga

Es un proceso que es llevado a cabo a través de la fotosíntesis de todas las plantas terrestres y un número inmenso de microorganismos fotosintéticos (Cuellar et al. 2015).

La aplicación de este proceso se basa en la obtención de glúcidos y oxígeno mediante la utilización de organismos fotosintéticos, utilizando dióxido de carbono y luz solar como fuente de sustrato. Como resultado del proceso de fotosíntesis, se generan moléculas de alta energía, como ATP y NADH. La fotosíntesis se describe a través de la siguiente ecuación de oxidación - reducción:



Se divide en dos procesos, una fase luminosa que utiliza energía lumínica, la cual es absorbida por la clorofila conservándola en forma de ATP y NADPH y produciendo moléculas de oxígeno que luego son liberadas al ambiente. La fase oscura por su parte produce la fijación de carbono dónde se utilizan estas moléculas energéticas para reducir el CO₂ y formar glucosa, además de otros productos orgánicos.

La fijación del dióxido de carbono se realiza en el ciclo de Calvin Benson en tres etapas, que implican la condensación, reducción y regeneración, obteniendo un proceso cíclico que permite convertir continuamente el dióxido de carbono en glúcidos (Arroyo 2015).

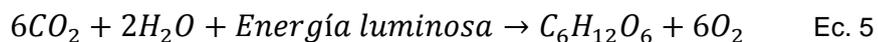
A comparación con las plantas que contribuyen con el 3 - 6% de la

reducción global de las emisiones de CO₂, en los distintos estudios realizados hace más de 50 años, han demostrado que los microorganismos fotosintéticos como microalgas y cianobacterias tienen una eficiencia de fijación de CO₂, alrededor de 10 - 50 veces mayor (Vieira et al. 2000; Skjanes, Lindblad y Muller 2007; Fernández 2012; Cuellar et al. 2015).

2.2.11. Fijación biológica del CO₂

El proceso biológico de fijación de CO₂ es la fotosíntesis, este es un mecanismo complejo, eficiente y único de conversión de energía de la luz solar, resultado de varios millones de años de evolución y provocando la formación de todas las formas aerobias vivas en la tierra. (Raven 1997; Martínez 2008)

La absorción de energía lumínica y su conversión a su potencial químico estable por la síntesis de compuestos orgánicos, a través de las plantas y los organismos fotosintéticos, se resume a través de la siguiente reacción, (Ho et al. 2011):



La cual refleja que el CO₂ gaseoso en presencia de un estimulante que es la energía luminosa se fija y genera un producto llamado glucosa (C₆H₁₂O₆), que es la unidad biológica de almacenamiento de energía.

El proceso fotosintético puede considerarse en tres fases:

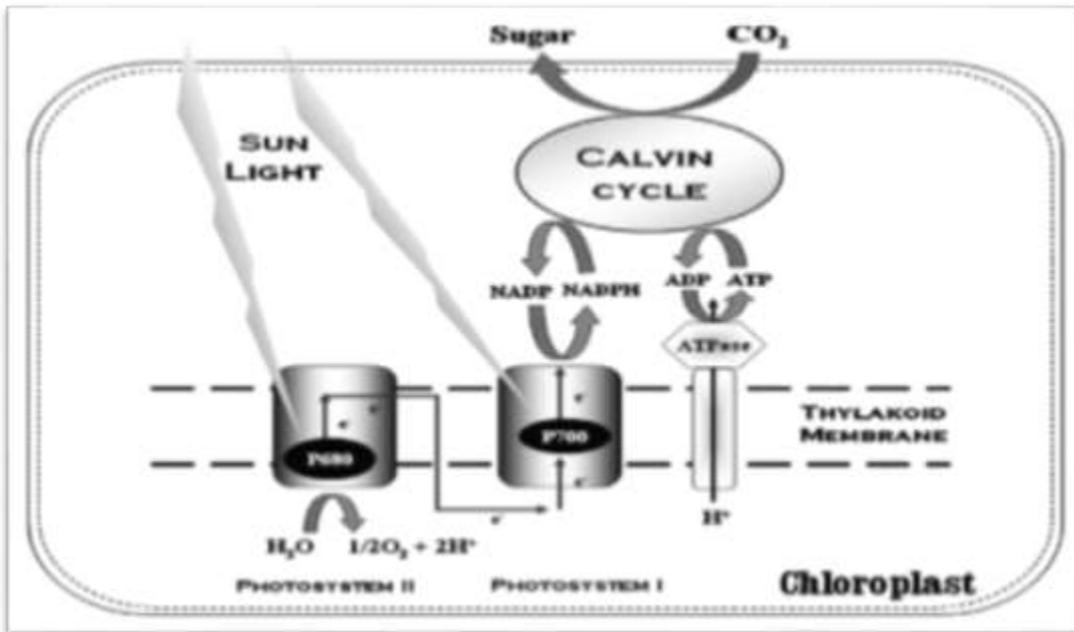
- a) Absorción de la luz y retención de energía lumínica. (Ciclo Claro)
- b) La conversión de energía lumínica en potencial químico. (Ciclo Claro)
- c) La estabilización y almacenaje del potencial químico. (Ciclo Oscuro)

Este proceso contiene 2 pasos, reacciones de luz (Ciclo Claro) que solo ocurren cuando las células están iluminadas, y reacciones de fijación de carbono, también conocidos como reacciones oscuras (Ciclo Oscuro), que ocurren en presencia o ausencia de luz. En el corazón de la fotosíntesis existen dos complejos fotoactivos, Fotosistema I y el Fotosistema II, quienes cosechan la luz solar dentro de una cadena de transporte de electrones vía la excitación de la clorofila (Iverson 2006).

En la Figura 6 se muestra el esquema del proceso de fotosíntesis que se lleva a cabo en el cloroplasto.

Figura 6

Esquema del proceso de fotosíntesis

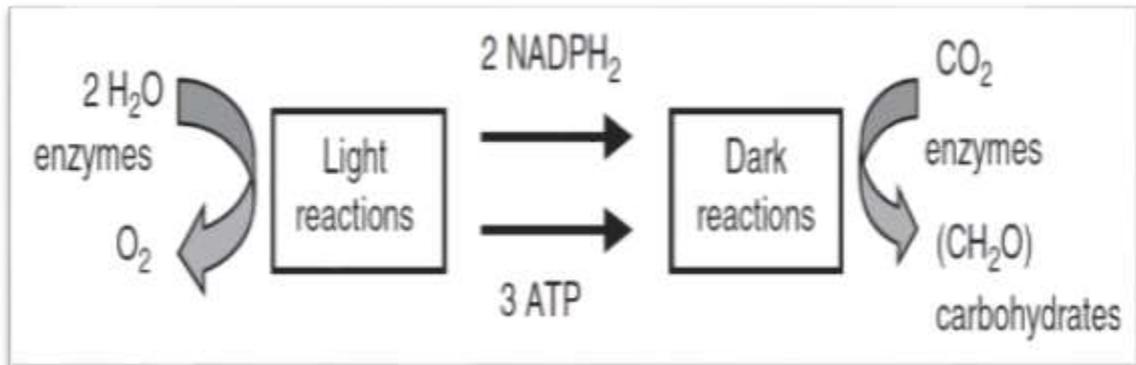


Nota. Tomado de Perspectives on microalgal CO_2 - emission mitigation systems - A review. (Ho et al. 2011).

En las reacciones de luz, que están unidas a membranas fotosintéticas, la energía luminosa se convierte en energía química proporcionando un reductor bioquímico $NADPH_2$ y un compuesto de alta energía ATP. En las reacciones oscuras, que tienen lugar en el estroma, el $NADPH_2$ y ATP son utilizados en la reducción bioquímica secuencial del dióxido de carbono a carbohidratos (Richmond 2004). En la Figura 7 se muestra el proceso fotosintético de ambas fases.

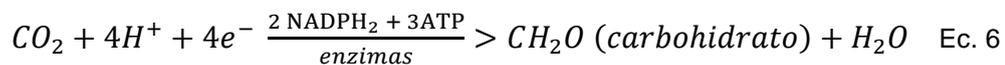
Figura 7

Proceso fotosintético: fase lumínica y fase oscura



Nota. Tomado de Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and applied phycology. (Richmond 2004).

La fijación de CO₂ se da en la reacción oscura (Ciclo Oscuro), siendo el dióxido de carbono asimilado en una serie de reacciones cíclicas utilizando la acción reductora de dos moléculas de NADPH₂ y la fuerza fosforilante de tres de ATP producido en la reacción lumínica de la fotosíntesis (una energía de 5.2x10⁴ J, que se consigue mediante la absorción de al menos ocho fotones de luz) (Richmond 2004). La reacción general puede expresarse de la siguiente manera:



La conversión de CO₂ en azúcar (u otros compuestos) ocurre en cuatro fases distintas que forman el llamado ciclo de Calvin-Benson tal como se puede observar en la Figura 7, las fases del ciclo de Calvin-Benson son:

i. Fase de Carboxilación

El CO₂ es fijado a la molécula RuBP por acción de la enzima RuBisCO. El compuesto formado por seis átomos de carbono inestable, siendo rápidamente hidrolizado y resultando en dos moléculas de 3 fosfoglicerato o ácido 3-fosfoglicérico (PGA)

ii. Fase de Reducción

Con el fin de convertir el 3-fosfoglicerato en productos de 3-carbonos (Triosa-P), la energía debe añadirse en forma de ATP y NADPH₂ en dos etapas:

fosforilación de 3-fosfoglicerato (PGA) para formar difosfoglicerato y ADP, y, en segundo lugar, la reducción de difosfoglicerato (DFG) a 3-fosfogliceraldehído (GPA).

iii. Fase de Regeneración

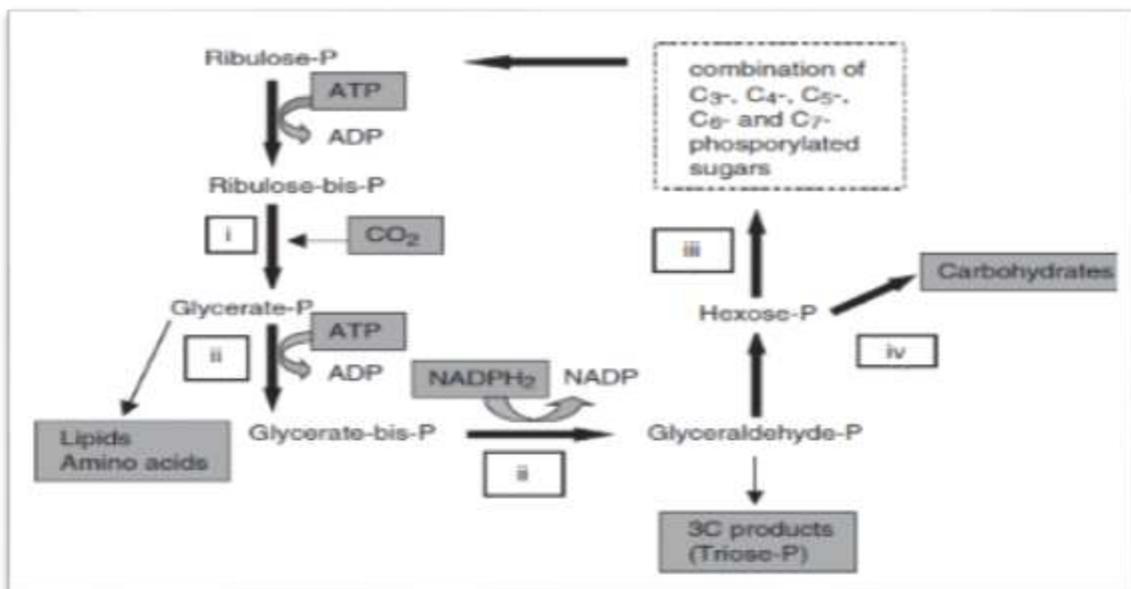
Durante las dos primeras etapas, tres moléculas de CO₂ son fijadas en tres moléculas de RuBP para formar seis moléculas de gliceraldehido 3-fosfato. Cinco de las seis moléculas de gliceraldehido 3-fosfato son usados para regenerar tres moléculas de ribulosa 1.5-bifosfato, que es compuesto inicial del Ciclo de Calvin. La otra corresponde al primer compuesto de una serie de nuevas reacciones para sintetizar moléculas de azúcares complejas.

iv. Fase de Producción

Los productos finales primarios de la fotosíntesis se consideran hidratos de carbono, pero los ácidos grasos, los aminoácidos y los ácidos orgánicos también se sintetizan en la fijación fotosintética de CO₂. Varios productos finales pueden formarse en diferentes condiciones de intensidad de luz, concentraciones de CO₂, O₂ y nutrientes.

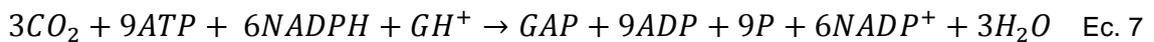
Figura 8

Proceso de fijación de CO₂ (ciclo de Calvin-Benson)



Nota. Tomado de Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and applied phycology. (Richmond 2004).

La reacción de fijación de carbono a manera más exacta puede sintetizarse de la siguiente ecuación:



2.2.12. Parámetros que influyen en el proceso de biofijación de CO₂

El cultivo de microalgas persigue la obtención de cantidades importantes de un producto de valor; por tanto, la productividad del sistema debe ser máxima. Para alcanzar este objetivo se debe considerar los factores de cultivo más decisivos que determinarán el crecimiento del alga y tasa de formación de productos. (Koller et al. 2012; García 2014).

A continuación, se detallan los factores condicionantes del desarrollo de las microalgas:

i. Nutrientes

Los nutrientes más importantes para el crecimiento autótrofo son el Carbono, Nitrógeno, Fósforo, y macro y micronutrientes, debido a que su suministro es esencial para el crecimiento y desarrollo microalgal.

ii. pH

Las microalgas tienen diversos requerimientos de pH para su crecimiento. A niveles de pH alcalinos, la disponibilidad de CO₂ puede ser limitante para el crecimiento y la fotosíntesis de microalgas. El rango de pH para la mayoría de los cultivos de microalgas está entre 7 y 9, con un rango óptimo de 8.2 a 8.7. Un pH óptimo en el cultivo generalmente es mantenido gracias a la aeración con aire enriquecido con CO₂. En casos que el pH se altere, se puede controlar fácilmente con la inyección controlada de CO₂, pero también con adicción de ácido o base (Benavente et al. 2012).

iii. Medio de Cultivo

El medio de cultivo debe suministrar todas las sales requeridas para el crecimiento de la microalga, es por ello, que existen una gran variedad de medios de cultivo y la mayoría son modificaciones de fórmulas anteriormente establecidas. Un medio de cultivo ampliamente empelada para la propagación

de microalgas es el medio F/2 (UTEX 2023), las cuales tiene la siguiente composición:

Tabla 5

Composición del medio de cultivo F/2 Medium

Componente	Cantidad	Conc. de solución madre	Conc. Final
<i>Macronutrientes</i>			
NaNO ₃	1 ml	7.5 g/100 mL dH ₂ O	880 µM
NaH ₂ PO ₄ •H ₂ O	1 ml	0.5 g/100 mL dH ₂ O	36 µM
Na ₂ SiO ₃ •9H ₂ O	1 ml	3 g/100 mL dH ₂ O	106 µM
<i>Solución de metales traza</i>			
	1 mL/L		
ZnSO ₄ •7H ₂ O	23 mg/L		0.08 µM
MnSO ₄ •H ₂ O	152 mg/L		0.9 µM
Na ₂ MoO ₄ •2H ₂ O	7.3 mg/L		0.03 µM
CoSO ₄ •7H ₂ O	14 mg/L		0.05 µM
CuCl ₂ •2H ₂ O	6.8 mg/L		0.04 µM
Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ •6H ₂ O	4.6 g/L		11.7 µM
Na ₂ EDTA•2H ₂ O	4.4 g/L		11.7 µM
<i>Vitamina B12</i>			
	1 mL/L		
Tampón HEPES pH 7.8	2.4 g/200 mL dH ₂ O	50 mm	
Vitamina B12	0.027 g/200 mL dH ₂ O	0.1 mm	
<i>Solución de vitamina biotina</i>			
	1 mL/L		
Tampón HEPES pH 7.8	2.4 g/200 mL dH ₂ O		
Biotina	0.005 g/200 mL dH ₂ O		
<i>Solución de vitamina tiamina</i>			
	1 mL/L		
Tampón HEPES pH 7.8	2.4 g/200 mL dH ₂ O		
Tiamina	0.067 g/200 mL dH ₂ O		

Nota. Adaptado y traducido de The University of Texas at Austin – Culture Collection of Algae. (UTEX 2023).

iv. Temperatura

La temperatura es indispensable para la disociación de las moléculas de carbono, que serán utilizadas por la fotosíntesis, así mismo, influye en la respiración y fotorrespiración de manera más marcada que en la fotosíntesis. Sin embargo, si el CO₂ o la luz es un factor limitante para la fotosíntesis, la influencia de la temperatura resulta insignificante. (Benavente et al. 2012), hace mención que, según la literatura, la temperatura óptima para el cultivo de microalgas se encuentra generalmente entre los 20 y 24 °C, no obstante, estas pueden variar dependiendo del medio de cultivo, la especie y la especie utilizada.

v. Irradiación

Es considerado como un nutriente más ya que va a convertirse en biomasa, teniendo en cuenta el rango espectral y el fotoperiodo (horas de iluminación y oscuridad) como factores cruciales a ser optimizados para todas las microalgas. Al respecto, la Intensidad de la luz, es importante controlarla para evitar la fotoinhibición por irradiación con fotones que podrían causar daño celular severo. Es por ello, que debe mantenerse entre intensidades de luz de 1000 - 10.000 lux (García 2014).

vi. Intercambio de gases

El intercambio de gases debe asegurar el aporte de CO₂ y la retirada del O₂ fotosintético. El intercambio a través de la superficie del cultivo es insuficiente de manera que es necesario suministrar una corriente de aireación y/o disponer de un adecuado sistema de agitación y mezcla.

Cuando se inyecta CO₂ en un cierto punto del cultivo, un gradiente de concentración se acumula a la vez que es consumido por las células y/o perdido en la atmósfera. De acuerdo con la teoría, la transferencia de masa de CO₂ de la fase gaseosa a la fase celular se produce a través de etapas secuenciales, que trae consigo la absorción metabólica del CO₂ por la célula. (Carvalho, Meireles y Malcata 2006)

vii. Fotobiorreactores

Un fotobiorreactor se puede describir como un sistema de cultivo abierto o cerrado e iluminado diseñado para la producción controlada de biomasa. El fotobiorreactor de sistema cerrado no tiene intercambio directo de gases y contaminantes con el medio ambiente (Benavente et al. 2012; Vergara, Sanclemente y Ararát 2023). Estos fotobiorreactores presentan las siguientes ventajas sobre los sistemas abiertos:

- Minimizan la contaminación y permiten cultivo de una sola especie.
- Ofrecen un mejor control sobre condiciones como el pH, temperatura, luz, concentración de CO₂, etc.
- Conducen a menos pérdidas de CO₂.

- Evitan la evaporación del agua.
- Permiten mayores concentraciones celulares.
- Permiten la producción de biofármacos complejos.

Para (García 2014) , las características deseables en un biorreactor son:

- Ser universal y adecuado para el cultivo de varias especies de microalgas.
- Proporcionar la mayor cantidad de luz posible.
- Proporcionar un buen intercambio gaseoso de CO₂ y O₂.
- Minimizar la sedimentación de las microalgas y su adhesión a la superficie del reactor.
- Poseer una tasa alta de transferencia de masa y temperatura sin dañar a la célula o inhibir su crecimiento.
- Baratos de construir y operar.
- Fácilmente escalables.

En el diseño y ubicación de un reactor se debe tener en cuenta la relación superficie/volumen, la orientación e inclinación, acumulación de oxígeno y difusión de dióxido de carbono, mezclado y temperatura.

Atendiendo a su diseño, los reactores utilizados a gran escala en la producción fotoautótrofa de microalgas se clasifican en abiertos y cerrados:

Para (Tebbani et al. 2020), el sistema abierto se caracteriza por su simplicidad técnica, su facilidad de uso y por tener una larga vida útil. Se trata principalmente de balsas de poca profundidad alimentadas, por ejemplo, por aguas residuales de plantas de tratamiento de residuos y equipadas con un sistema de agitación formado por estructuras giratorias o ruedas de paletas. Los sistemas abiertos tienen una amplia variedad de configuraciones dependiendo del tamaño, profundidad, tipo de material, sistema de agitación y grado de inclinación.

Los sistemas cerrados (fotobiorreactores), permiten un mejor control de los factores externos al bioproceso que los sistemas abiertos. Las microalgas están expuestas a la fuente de luz a través de un material de construcción transparente.

Los fotobiorreactores pueden ser de diversas geometrías (planos, tubulares, horizontales, inclinados, verticales o en espiral), tener diferentes sistemas de agitación y estar contruidos con diferentes tipos de materiales. Su diseño se basa en la optimización de la disponibilidad de energía lumínica por parte de los microorganismos y de la eficiencia de agitación.

2.2.13. Tasa de fijación de dióxido de carbono

La tasa de fijación de CO₂ (R_{CO_2}) es la masa de dióxido de carbono (CO₂) que se fijará para formar parte de la biomasa de la célula (Kassim y Meng 2017), se expresa en g/L/d y se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_{CO_2} = C_{C_b} P_{C_b} \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde: R_{CO_2} : es la tasa de fijación de CO₂, C_{C_b} : es el porcentaje de carbón en la biomasa (% peso/peso), P_{C_b} : es la Productividad de la biomasa, M_{CO_2} : es el peso molecular del dióxido de carbono (44.009 g/mol) y M_C : es el peso molecular del carbono (12.011 g/mol) (International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC 2018).

2.2.14. Eficiencia de utilización de carbono

La eficiencia de utilización de carbono (CUE) por sus siglas en inglés (Carbon utilization efficiency), es la razón entre la cantidad de CO₂ que usará el microorganismo para ser fijado y la cantidad de CO₂ gaseoso suministrado en el fotobiorreactor en forma de burbujeo (Duarte y Costa 2017; Moraes et al. 2016), dicha eficiencia se expresa en porcentaje y se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$CUE = \frac{R_{CO_2} \cdot V_{work}}{\dot{m}_{CO_2}} \times 100\% \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde: R_{CO_2} : es la tasa de fijación de CO₂ diaria en g/L/d, V_{work} : es el volumen de trabajo en el fotobiorreactor en L, \dot{m}_{CO_2} : es la tasa de alimentación diaria de carbono suministrada en forma de CO₂ gaseoso en g/L.

2.2.15. *Microalga Chlorella vulgaris*

Este género se caracteriza por ser cosmopolita, es un alga verde con células de forma elipsoidal de 2 a 10 µm de diámetro que toleran temperaturas entre 15 a 40° C, crece en forma de células simples. Corresponde a la división de las *Chlorophyta* y a la clase *Trebouxiophyceae* que son muy abundantes especialmente en aguas continentales. Esta especie fue cultivada por primera vez en 1975 y procesada con fines biotecnológicos en 1994 (Fierro 2015). Su clasificación taxonómica se describe en la Tabla 6:

Tabla 6

Clasificación taxonómica de la microalga Chlorella vulgaris

Taxón	Descripción
Reino	<i>Plantae</i>
Filo	<i>Chlorophyta</i>
Clase	<i>Trebouxiophyceae</i>
Orden	<i>Chlorellales</i>
Familia	<i>Oocystaceae</i>
Género	<i>Chlorella</i>
Especie	<i>Chlorella vulgaris</i>

Nota. Adaptado de (Instituto del Mar del Perú 2023; Seinet 2023)

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. *Emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial*

Según la Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos, los gases que atrapan el calor en la atmosfera se denominan Gases de Efecto Invernadero, y estos gases son CO₂, CH₄, N₂O y gases fluorados. El efecto de cada gas sobre el ambiente depende de la cantidad existente en la atmosfera, del tiempo de permanencia en la atmosfera y la fuerza de afectación en la atmosfera (potencial de calentamiento global) (USEPA 2023).

Las emisiones de gases de efecto invernadero son los componentes

gaseosos que se liberan a la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en longitudes de onda específicas dentro del espectro de la radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, la propia atmósfera y las nubes; esta propiedad provoca el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los principales gases de efecto invernadero de la atmósfera terrestre. Además, en la atmósfera hay una serie de gases de efecto invernadero de origen totalmente humano, como los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromo, que se tratan en el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, el N₂O y el CH₄, el Protocolo de Kioto se ocupó de los gases de efecto invernadero hexafluoruro de azufre (SF₆), hidrofluorocarburos (HFC) y perfluorocarburos (PFC) (Wuebbles et al. 2017).

Las emisiones de gases de efecto invernadero - GEI son aquellos gases que se liberan a la atmósfera ya sea de manera natural o por causa antrópica (incluye gases sintéticos) y tienen la capacidad de retener la energía proveniente del sol provocando que la temperatura interna de la Tierra se incremente, estos gases son: Vapor de H₂O, CO₂, N₂O, CH₄, O₃, SF₆, HFC, PFC. Los GEI de fuente industrial son aquellos que se liberan a la atmósfera y provienen de los procesos de la quema de combustibles o emisiones fugitivas (perdidas por escape de gases refrigerantes). De las emisiones industriales; el CO₂ es el GEI más común e importante ya que posee una alta concentración en la mezcla gaseosa emitida.

2.3.2. Biofijación de dióxido de carbono con la microalga *Chlorella vulgaris*

El proceso de fijación (secuestro y/o almacenamiento) de carbono es reequilibrar el balance global de las emisiones, desarrollando una estrategia económica basada en emisiones neutras de carbono, así mismo, involucra transportarlo a un lugar de almacenamiento por un periodo largo y que no entre dentro de la atmósfera (García 2014).

La biofijación de CO₂ por microalgas es la vía más prometedora para reducir el impacto del CO₂, ya que estos microorganismos son los más eficientes en la captura de CO₂, en comparación con las plantas terrestres. En presencia de luz, las microalgas son capaces de asimilar el CO₂ para crecer mientras

producen oxígeno y metabolitos secundarios a través de la fotosíntesis. La aplicación medioambiental está dada por su potencial, por las ventajas relacionadas con su tasa de crecimiento y su alta tolerancia a las altas concentraciones de CO₂ (Tebbani et al. 2020).

La biofijación es un mecanismo de captura del dióxido de carbono (CO₂) que emplea el proceso de fotosíntesis, el cual emplea una fuente de luz para fijar el CO₂ y transformarlo en una molécula orgánica llamada glucosa, altamente energética. El proceso fotosintético lo llevan a cabo las plantas, algas (macro y micro) y cianobacterias; lo que desencadena un incremento de la biomasa que se obtiene en un periodo determinado. Para la microalga *Chlorella vulgaris* el incremento celular se obtiene en cortos periodos de tiempo en relación a la masa inicial; por lo general de 7 a 8 días. La fuente de carbono proviene del burbujeo de CO₂ la cual al ser capturada por la microalga llega a formar parte de la biomasa reduciendo así la cantidad de CO₂ que se emite a la atmosfera.

2.4. Definición de términos básicos

ATP: El ATP es el nucleótido adenosina trifosfato y es el intermediario rico en energía más común y universal. Como indica su nombre está formado por un grupo adenosina (adenina + ribosa) y un grupo trifosfato. La principal función del ATP es servir de aporte energético en las reacciones bioquímicas que se producen en el interior de la célula para mantener sus funciones activas (Murray et al. 2011, p. 94).

Autótrofos: Organismos cuyo crecimiento y reproducción son independientes de las fuentes externas de compuestos orgánicos, ya que obtienen el carbono celular por la reducción de CO₂, y la energía celular por la conversión de la energía lumínica a ATP o por la oxidación de compuestos inorgánicos que le proporcionan energía libre para la formación de ATP (Atlas y Bartha 2002, p. 654).

Biomasa: la biomasa significa literalmente “masa de materia viva” y puede expresarse en unidades de masa o unidades de energía por unidad de volumen (Atlas y Bartha 2002, p. 250).

Fijación biológica de CO₂: Es un proceso que es llevado a cabo a través de la fotosíntesis de todas las plantas terrestres y un número inmenso de microorganismos fotosintéticos (Cuellar et al. 2015).

Forzamiento radiativo: Es la medida de la influencia que tiene la alteración del balance entre la radiación solar incidente y la radiación infrarroja saliente en el sistema atmósfera – Tierra, denotado por un cambio en la irradiancia neta en la tropopausa y es expresado en vatios por metro cuadrado (W/m²). Un forzamiento radiativo positivo tiende a calentar la troposfera y uno negativo tiende a enfriarla (Ballesteros y León 2007).

Fotobiorreactor: Son dispositivos diseñados para el cultivo de microalgas, principalmente en cultivos cerrados se puede controlar parámetros como la aireación, pH, temperatura, nutrientes, etc. (Benavente et al. 2012).

Irradiación: Es la energía incidente por unidad de área de una superficie, obtenida por integración de la irradiancia durante un intervalo de tiempo dado, normalmente un día o una hora, en Lux=lumen/m² (Thimijan y Heins 1983).

Microalga: Son organismos microscópicos unicelulares fotosintéticos no vasculares que poseen estructuras reproductoras simples flotando libremente, pero con movilidad limitada y cuya particularidad es su crecimiento en soluciones acuosas (Tebbani et al. 2020, p. 5).

Potencial de calentamiento global PCG: Índice, basado en las propiedades radiativas de los gases de efecto invernadero, que mide el forzamiento radiativo tras una emisión en impulsos de una unidad de masa de un gas de efecto invernadero determinado en la atmósfera actual integrada en un horizonte temporal elegido, en relación con el del dióxido de carbono. El PCA representa el efecto combinado de los diferentes tiempos de permanencia de estos gases en la atmósfera y su eficacia relativa a la hora de provocar un forzamiento radiativo (Wuebbles et al. 2017, p. 464).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis general*

Las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial tendrán una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

3.1.2. *Hipótesis específica*

- La concentración de dióxido de carbono al 0% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.
- La concentración de dióxido de carbono al 5% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.
- La concentración de dióxido de carbono al 20% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

3.1.3. Operacionalización de variables

Tabla 7

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades	Método	Técnica
Independiente: Emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial	Las emisiones de gases de efecto invernadero proceden de una gran variedad de actividades industriales. Las principales fuentes de emisión son las emisiones procedentes de procesos industriales que transforman química o físicamente materiales a partir de combustibles fósiles utilizados como materia prima química para las reacciones y/o obtención de energía. Estos procesos emiten gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO ₂), metano (CH ₄), óxido nitroso (N ₂ O), hidrofluorocarbonos (HFC) y perfluorocarbonos (PFC) (Cai y Ottinger 2019).	Las emisiones de gases de efecto invernadero se analizarán mediante las emisiones de dióxido de carbono, expresados en base a los niveles de concentración de CO ₂ en la mezcla gaseosa, para el cual se empleará la ficha de observación experimental para el registro de la cantidad de CO ₂ suministrada.	Emisiones de dióxido de carbono	Concentración de CO ₂ al 0% <hr/> Concentración de CO ₂ al 5% <hr/> Concentración de CO ₂ al 20%	$\frac{Vol_{CO_2}}{Vol_{gas}}$	Enriquecimiento de aire con CO ₂ puro	Ficha de observación experimental
Dependiente: Biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>)	La biofijación de CO ₂ por microalgas es la vía más prometedora para reducir el impacto del CO ₂ , ya que estos microorganismos son los más eficientes en la captura de CO ₂ , en comparación con las plantas terrestres. En presencia de luz, las microalgas son capaces de asimilar el CO ₂ para crecer mientras producen oxígeno y metabolitos secundarios a través de la fotosíntesis. La aplicación medioambiental está dada por su potencial, por las ventajas relacionadas con su tasa de crecimiento y su alta tolerancia a las altas concentraciones de CO ₂ (Tebani et al. 2020).	El proceso de biofijación de dióxido de carbono con microalgas empleará a la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> para la captura del dióxido de carbono teniendo como indicadores la tasa de fijación y la eficiencia de utilización de carbono, se emplearán fichas de observación experimental para el registro de los datos experimentales.	Captura de dióxido de carbono con microalga (<i>Chlorella vulgaris</i>)	Tasa de Fijación de dióxido de carbono (R_{CO_2}) <hr/> Eficiencia de utilización de carbono (CUE)	$\frac{g_{CO_2}}{L - d}$ $\frac{g C_{biomasa}}{g C_{suministrado}}$	Modelo matemático	Ficha de observación experimental

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

De acuerdo con el tipo que se persigue en la Investigación, es de tipo Básica, para (Hernández, Fernández y Baptista 2010, p. 27) , una Investigación Científica de tipo Básico tiene como finalidad la de producir conocimiento y teorías. En el presente trabajo de investigación se buscó conocer el grado de tratamiento de las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial empleando la técnica de Biofijación con la microalga *Chlorella vulgaris*.

Para (Hernández, Fernández y Baptista 2010, p. 83) el nivel Explicativo pretende establecer las causas de los eventos, sucesos o fenómenos que se estudian. Se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables. El presente trabajo de investigación se identificó a las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial como el problema ya que sus efectos son negativos para el ambiente y para el ser humano, y a la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) como la técnica de solución para minimizar tales efectos negativos.

De acuerdo con el enfoque, la presente investigación es Cuantitativo que según (Hernández, Fernández y Baptista 2010, p. 4), “... es un conjunto de procesos, es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar o eludir” pasos, el orden es riguroso, aunque, desde luego, podemos redefinir alguna fase...”. En el presente trabajo de investigación se elaboró en procesos (1) concepción de la idea, (2) definición del problema, objetivos e hipótesis, (3) se delimitó el marco teórico, (4) se definió un plan para probar las hipótesis, (5) se midieron las variables, (6) se analizaron las mediciones y (6) se establecieron las conclusiones respecto a las hipótesis planteadas.

El diseño del trabajo de la presente investigación es experimental cuyas características inherentes a este diseño son: Manipulación intencional de variables independientes. Medición de variables dependientes. Existencia de dos

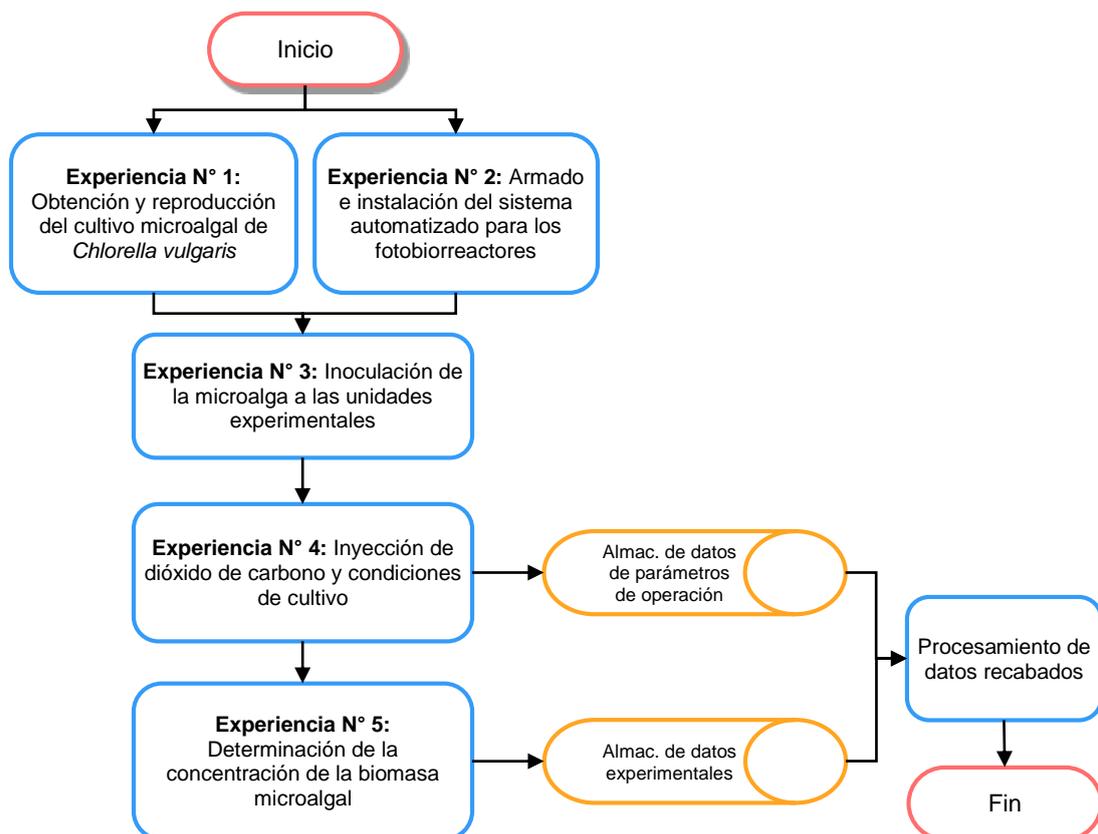
o más grupos de comparación (Hernández, Fernández y Baptista 2010, p. 119). En el presente trabajo de investigación se desarrolló mediante la manipulación de las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial (niveles de concentración de dióxido de carbono) en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*).

4.2. Método de investigación

La investigación se desarrolló en 5 experiencias secuenciales que permitieron obtener los resultados, en la Figura 9 se resume el diagrama de flujo de las experiencias realizadas.

Figura 9

Diagrama de flujo de las experiencias



4.2.1. Obtención y reproducción del cultivo microalgal de *Chlorella vulgaris*

Se obtuvo la microalga del banco de Germoplasma del laboratorio de reproducción microalgal del Instituto del Mar del Perú – IMARPE con un volumen

de muestra de 20 L. Posteriormente a la recolección de la muestra, se reprodujo la microalga hasta la obtención de un inóculo de mayor volumen. Para ello se diluyó la muestra y se cultivaron las microalgas en fotobiorreactores obteniendo un volumen total de 50 L (alta concentración de células). Durante la fase de reproducción los reactores fueron aireados constantemente a razón de 2 L/min y suministro de CO₂ de 3 veces por día.

Figura 10

Obtención de la muestra de microalga Chlorella vulgaris



4.2.2. Armado e instalación del sistema automatizado para los fotobiorreactores

Se construyó una cámara de mezcla de gases (aire y CO₂) y un sistema automatizado que reguló la temperatura, iluminación y fotoperiodo de los fotobiorreactores. En la Figura 10 se detalla el esquema de instalación de los fotobiorreactores, cámara de mezcla, balón de CO₂ y compresor de aire. La automatización de los parámetros de operación como iluminación y temperatura

se realizó con la plataforma ARDUINO, plataforma de creación electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores (Fernández 2022). Es un microcontrolador electrónico, empleando sensores de temperatura e iluminación.

Figura 11

Esquema de instalación del sistema

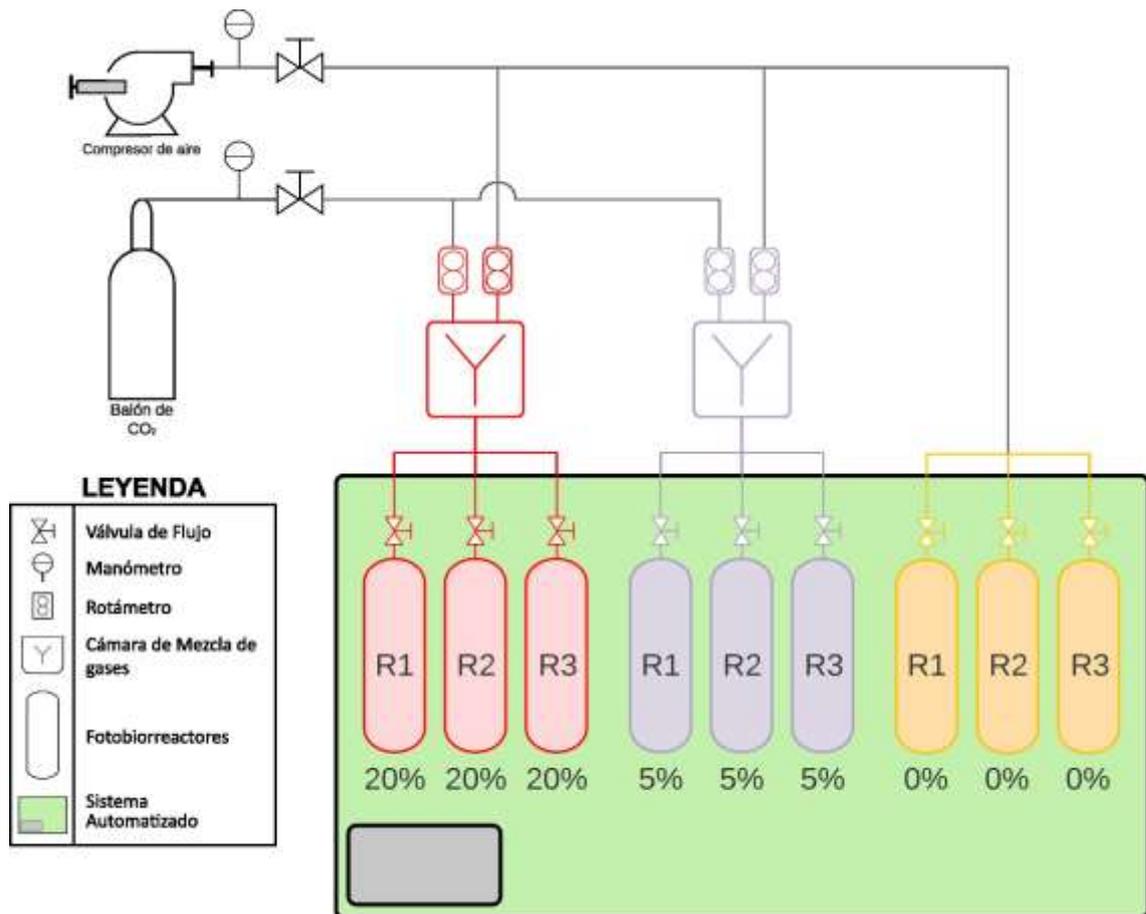


Figura 12

Sistema instalado para la experimentación



4.2.3. Inoculación de la microalga a las unidades experimentales

Una vez alcanzado el volumen total de 50 L de la experiencia N° 1, se procedió a diluir el volumen de la microalga a razón de 30 L de microalga (con alto contenido de microalgas) y 30 L de agua (previamente tratada para eliminar los patógenos y/o bacterias que puedan estar presentes y contaminen el cultivo microalgal) El volumen total de 60 L de la mezcla se agitó hasta obtener una mezcla homogénea y posteriormente se dividió en 9 unidades experimentales (Fotobiorreactores) con 6 L de volumen de trabajo cada una. En esta etapa se determinó la concentración de la biomasa microalgal a partir del volumen no utilizado.

Figura 13

Dilución, mezcla e inoculación en unidades experimentales



Nota. a) Dilución de la microalga concentrada, b) Mezcla de microalga con agua previamente tratada en proporción 1:1, c) Inoculación de microalgas en las unidades experimentales.

4.2.4. Inyección de dióxido de carbono y medición de parámetros de cultivo

Se utilizó un sistema de cultivo en fotobiorreactores tipo Batch con un volumen de trabajo de 6 L por cada unidad y se sometió a una temperatura de 30 °C, irradiancia lumínica de 2500 Lux y un fotoperiodo de 24/0 Luz/oscuridad (Barsanti y Gualtieri 2006).

Se empleó aire comprimido proveniente de la compresora para la agitación de los cultivos, adicionalmente se enriqueció con CO₂ comercial proveniente de un balón de gas puro al 99.9%.

Las concentraciones de CO₂ que se inyectaron a las unidades experimentales fueron de 0% 5% y 20% de CO₂ v/v.

La inyección de la mezcla gaseosa se realizó a través de la cámara de mezcla mencionada anteriormente por una duración de 15 minutos y con una frecuencia de 3 veces por día durante 8 días, manteniéndose una tasa de flujo constante de mezcla gaseosa de 0.25 vvm (volumen de gas por volumen de medio por minuto) (Moraes et al. 2016) con un flujo gaseoso de 1.5 L/min por cada unidad experimental.

Figura 14

Cámara de mezcla y flujómetros para el suministro de aire enriquecido con CO₂



a)

b)

c)

Nota. a) Cámara de mezcla, b) Flujómetro de CO₂, c) Flujómetro de aire.

4.2.5. Determinación de la concentración de la biomasa microalgal

Se determinó la concentración de la biomasa microalgal presente en cada día de análisis, para ello se extrajo un volumen de 5 mL de muestra cada día de cada unidad experimental y se determinó la biomasa mediante gravimetría (filtrado de la muestra y secado a 105 °C por 24 horas) y posteriormente en base a la masa y el volumen de la muestra se determinó la concentración de la biomasa microalgal.

Figura 15

Toma de muestra para el análisis de concentración de biomasa



4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población del presente trabajo de investigación estuvo constituida por todas las especies del género *Chlorella* del banco de germoplasma del Instituto del Mar del Perú - IMARPE (*Chlorella* sp., *Chlorella vulgaris* y *Chlorella ellipsoidea*).

4.3.2. Muestra

La muestra para el desarrollo de la presente investigación estuvo conformada por la especie de microalga *Chlorella vulgaris*, la cual se obtuvo del banco de germoplasma del Instituto del Mar del Perú - IMARPE, con un volumen de cultivo de microalga de 20 L.

La técnica de muestreo fue de tipo no probabilístico o también llamado muestreo por conveniencia (Borja S. 2012), ya que la obtención de la especie de microalga fue de manera directa y no se llevó a cabo una aleatoriedad de la especie.

4.3.3. Lugar del estudio

El trabajo de investigación se desarrolló en el Instituto de Investigación de Especialización en Agroindustria – IIEA, ubicado en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional del Callao.

4.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

La técnica empleada en el trabajo de investigación fue la observación.

Los instrumentos tecnológicos para la recolección de los datos experimentales fueron los siguientes:

- Balanza analítica
- Microscopio electrónico
- Potenciómetro
- Termómetro
- Oxímetro
- Luxómetro

Para la recolección de los datos experimentales se emplearon fichas de observación experimental los cuales se muestran en el Anexo 3.

El instrumento documentario empleado para la medición del porcentaje de carbono en la microalga se analizó en un laboratorio externo, el instrumento que se obtuvo fue el informe de ensayo.

4.5. Análisis y procesamiento de datos

Para la presente investigación se utilizó los softwares de procesamiento de texto (MS Word), hoja de cálculo (MS Excel) y software estadístico (SPSS versión 27).

El procesador de texto permitió la redacción del informe final. Las hojas de cálculo se emplearon por la rápida respuesta a las operaciones matemáticas en una gran cantidad de datos así mismo para la elaboración de tablas y gráficos.

El tratamiento estadístico se realizó con SPSS versión 27, empleando el análisis univariado de varianza (ANOVA) para determinar la veracidad o falsedad

de la hipótesis y la prueba de comparaciones múltiples se empleó para la determinación del mejor tratamiento.

La parte experimental del trabajo de investigación se desarrolló en base al diseño factorial de un solo factor (Variación de la concentración del dióxido de carbono) con 3 repeticiones por cada concentración de dióxido de carbono y 3 réplicas por cada repetición y analizadas por 8 días, el diseño factorial de experimentación se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8

Diseño factorial de experimentación

Orden de experimentación	Concentración de Dióxido de carbono
1	0%
2	5%
3	20%
1	0%
2	5%
3	20%
1	0%
2	5%
3	20%

La secuencia de pasos para el procesamiento de la información y su posterior análisis se realizó de la siguiente manera:

Paso 1: Los datos obtenidos en el laboratorio, se ordenaron de acorde a los tratamientos, réplicas, repeticiones y días de experimentación.

Paso 2: La concentración de la biomasa (C_b) se calculó empleando los datos de la ficha de observación experimental del Anexo 3 (Tabla A3.1 y Tabla A3.2) de acorde con la siguiente ecuación:

$$C_b = \frac{m_{b+f} - m_f}{V_{muestra}} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde: m_{b+f} masa del filtro empleado incluyendo la biomasa de la muestra extraída después del proceso de secado, m_f masa exclusivamente del filtro,

$V_{muestra}$ volumen de la muestra extraída para el análisis.

Paso 3: En base al resultado de la concentración de biomasa del paso anterior se obtuvo la productividad de biomasa (P_{Cb}) y se calculó de acorde con la siguiente ecuación:

$$P_{Cb} = \frac{C_{bi} - C_{b0}}{t_i - t_0} \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde: C_{bi} y C_{b0} son las concentraciones de biomasa en los tiempos t_i y t_0 respectivamente.

Paso 4: La tasa de fijación de dióxido de carbono (R_{CO_2}) se calculó empleando el resultado del paso 3 y el resultado del porcentaje de carbono obtenido del análisis de laboratorio externo (informe de ensayo), para el cual se empleó la siguiente ecuación:

$$R_{CO_2} = C_{Cb} P_{Cb} \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde: R_{CO_2} : es la tasa de fijación de CO_2 , C_{Cb} : es el porcentaje de carbono en la biomasa (% masa/masa), P_{Cb} : es la productividad de la biomasa, M_{CO_2} : es el peso molecular del dióxido de carbono (44.009 g/mol) y M_C : es el peso molecular del carbono (12.011 g/mol) (International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC 2018).

Paso 5: Se calculó la cantidad de masa de CO_2 diaria empleada por cada tratamiento y réplica empleando los datos obtenidos del Anexo 3 (Tabla A3.3), para el cuál se empleó la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{P_{CM} \cdot vvm \cdot V_{work} \cdot [CO_2] \cdot t_{sum} \cdot f_{sum} \cdot \overline{PM}_{CO_2}}{R \cdot T} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde: P_{CM} es la presión en la cámara de mezcla, vvm es la tasa de aireación 0.25 L/L/min, V_{work} es el volumen del fotobiorreactor 6 L, $[CO_2]$ es la concentración en porcentaje del CO_2 presente en la mezcla gaseosa (5% y 20%), t_{sum} es el tiempo de suministro de la mezcla gaseosa 15 minutos, f_{sum} es la cantidad de suministros realizados en un día 3 veces, \overline{PM}_{CO_2} es el peso molecular

del CO₂ 44.01 g/mol. R constante de los gases universales, T temperatura de operación del fotobiorreactor 30 °C (303.15 K), reemplazando los valores tenemos que la masa de CO₂ diaria suministrada es:

$$\dot{m}_{CO_2} = 121.088 \cdot P_{CM} \cdot [CO_2] \quad \text{Ec. 14}$$

Donde: P_{CM} está expresado en bar y $[CO_2]$ en porcentaje.

Paso 6: La eficiencia de utilización de carbono (CUE) se calculó empleando los resultados del paso 4 y paso 5, para el cuál se usó la siguiente ecuación:

$$CUE = \frac{R_{CO_2} \cdot V_{work}}{\dot{m}_{CO_2}} \times 100\% \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde: R_{CO_2} : es la tasa de fijación de CO₂ diaria en g/L/d, V_{work} : es el volumen de trabajo en el fotobiorreactor en L, \dot{m}_{CO_2} : es la tasa de alimentación diaria de carbono suministrada en forma de CO₂ gaseoso en g/L.

Paso 7: Los datos obtenidos, ordenados y tabulados de los pasos anteriores, se calcularon con el software MS Excel. El procesamiento estadístico se realizó empleando el software SPSS versión 27, la cual contempló el modelo lineal general de un solo factor (concentración de CO₂) con bloque (día), y se calcularon los estadísticos paramétricos como el Análisis Univariado de la Varianza y la verificación de los supuestos del modelo. Para determinar el mejor tratamiento se empleó la Prueba de Comparaciones Múltiples. Todos los análisis estadísticos se contemplaron con un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0.05$).

4.6. Aspectos éticos de la investigación

La presente investigación es auténtica y confiable con respecto a la autoría de otros estudios, considerando el código de ética de investigación aprobado por RCU N° 260-2019-CU, así como con la directiva N° 004-2022-R, ambas establecidas por la Universidad Nacional del Callao.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

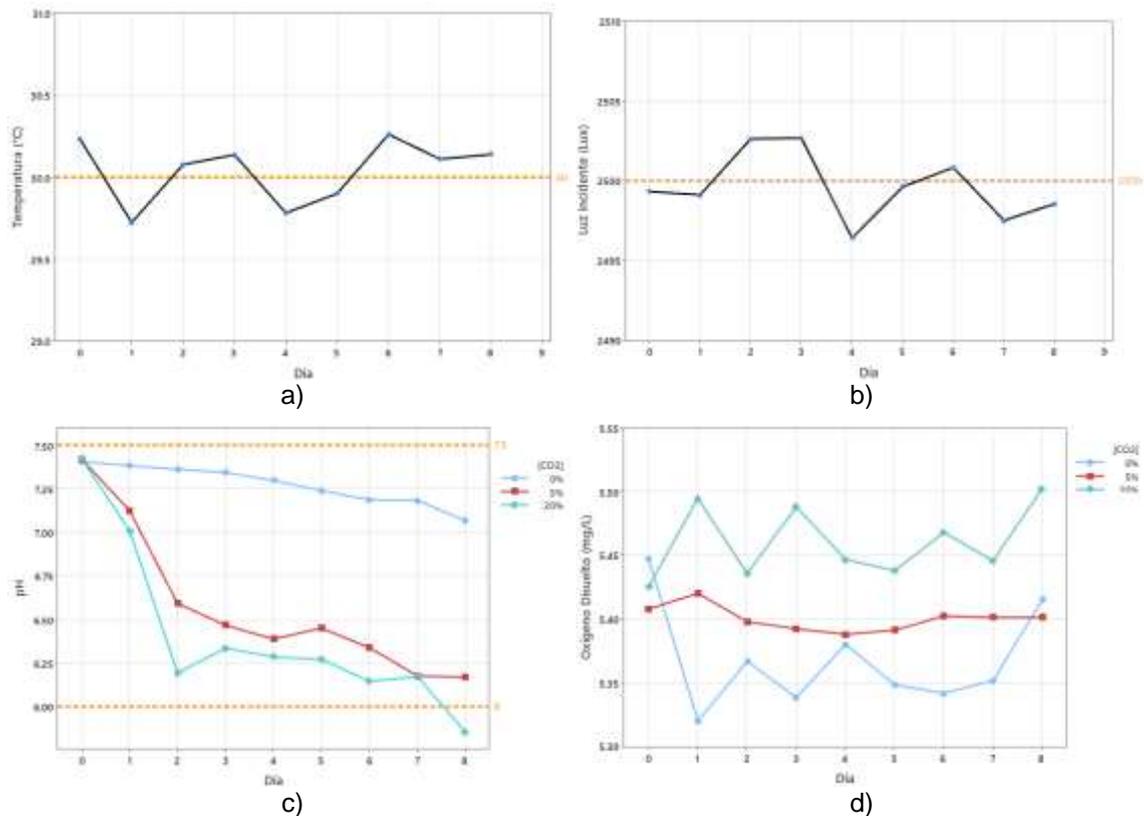
5.1.1. Parámetros de operación

Durante los días que duró la experimentación, se controlaron los parámetros de operación de temperatura, luz, pH y oxígeno disuelto los cuales se detallan en la Figura 16.

La variación de la temperatura a lo largo de los días analizados se mantuvo cercanos al valor de 30 °C establecido como parámetro de control, la media fue de 30.04 °C, de la Figura 16 se aprecia que esta variación no superó los ± 0.5 °C. similar condición tuvo el parámetro de luz incidente que tuvo una media de 2499.62 Lux y según la Figura 16, esta variación no superó los ± 5 Lux, estos dos parámetros se analizaron en el sistema por tratarse de parámetros externos al cultivo.

Figura 16

Evolución de los parámetros de operación respecto al día



Nota. a) Variación de la temperatura en °C, b) Variación de la luz incidente en Lux, c) Variación del pH por concentración de CO₂, d) Variación del oxígeno disuelto en mg/L por concentración de CO₂.

La variación del pH por cada concentración se no sobrepasó el rango establecido para el control entre 6 a 7.5, salvo la concentración del 20% en el día 8, este valor fue debido a que la medición se realizó minutos después de haber suministrado el CO₂, motivo por el cual se volvió a medir 30 minutos después y los valores se encontraron dentro del rango establecido. De la Figura 16 la concentración de oxígeno disuelto se encontró debajo de 14 mg/L para todas las concentraciones de suministro de CO₂. Estos dos parámetros se midieron dentro de los medios de cultivo por ser parámetros propios del medio.

5.1.2. Tasa de fijación de dióxido de carbono - RCO₂

La tasa de fijación de dióxido de carbono fue variable para cada concentración de CO₂ suministrado, asimismo existió también una interacción con el factor bloque día, existiendo medias diferentes para cada día analizado, obteniéndose la mayor media en el día 5 para la concentración de CO₂ de 0% con 307.12 mg/L/d, la mayor media obtenida para la concentración de 5% se dio en el día 4 con 800.84 mg/L/d y para la concentración de 20% se obtuvo la mayor media el día 3 con 1035.48 mg/L/d. La media global fue de 343.50 mg/L/d. En la Tabla 9 se tiene la relación de las medias por cada concentración y día analizado.

Tabla 9

Estadísticos descriptivos para RCO₂ por concentración y día en mg/L/d

Día	Concentración de CO ₂ suministrado								
	0%			5%			20%		
	Media	DS	N	Media	DS	N	Media	DS	N
1	56.66	41.96	3	202.30	35.33	3	495.98	42.21	3
2	164.92	89.05	3	418.89	84.35	3	1010.94	18.98	3
3	76.77	117.77	3	639.97	48.18	3	1035.48	4.67	3
4	256.34	98.60	3	800.84	77.99	3	1005.29	45.85	3
5	307.12	86.75	3	554.58	11.11	3	552.49	60.62	3
6	-15.55	33.19	3	176.71	41.11	3	330.99	9.92	3
7	-1.96	45.28	3	31.65	41.01	3	16.43	40.31	3
8	13.85	83.96	3	92.31	54.36	3	20.92	70.69	3

Nota. DS, Desviación Estándar.

Tabla 10

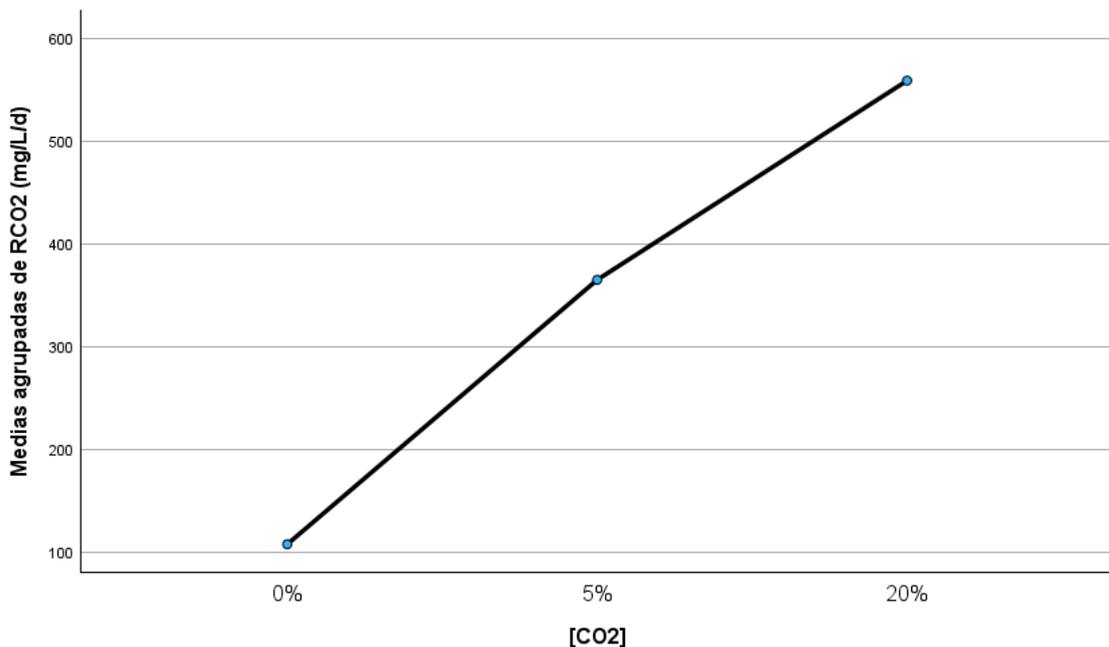
Media por concentración de CO₂ suministrado y global de RCO₂ en mg/L/día

Concentración de CO ₂ suministrado											
0%			5%			20%			Global		
Media	DS	N	Media	DS	N	Media	DS	N	Media	DS	N
107.27	134.52	24	364.66	272.02	24	558.56	408.62	24	343.50	344.34	72

La concentración de suministro de CO₂ influyó en la tasa de fijación de dióxido de carbono, tal como se desprende de la Tabla 10 y cuyo efecto se observa en la Figura 17, donde la RCO₂ para una concentración de 0% se encontró en 107.27 mg/L/d, para la concentración de 5% la media se encontró en 364.66 mg/L/d y para la concentración de 20% fue de 558.56 mg/L/d.

Figura 17

Efecto de la concentración de CO₂ en RCO₂

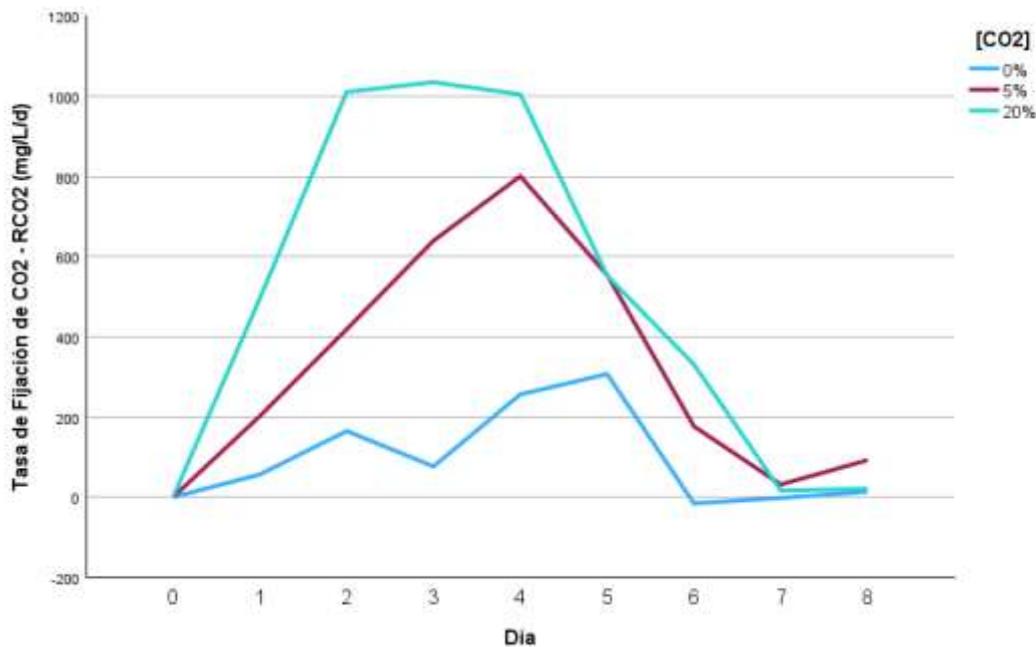


La evolución de la RCO₂, en el tiempo se detalla en la Figura 18, siendo la concentración de CO₂ de 20% la que mayor evolución presentó alcanzando su máximo en el día 3, seguido de la concentración de 5% cuyo valor máximo lo alcanzó en el día 4 y en tercer lugar la concentración de 0% de CO₂ siendo el día 5 en la que alcanzó su mayor valor.

Adicionalmente se aprecia que a partir del día 4 para las concentraciones de 5% y 20% la RCO_2 empezó a decrecer, esto debido a que a partir del día 4 la concentración de la biomasa empezó a estancarse y posteriormente a decrecer. La concentración de 0% tiene una variación diferente, sin embargo, a partir del día 5 la RCO_2 empezó a decrecer, debido a que este día la concentración de la biomasa empezó a estancarse.

Figura 18

Evolución de RCO_2 en el tiempo y por concentración de CO_2



5.1.3. Eficiencia de utilización de carbono - CUE

La eficiencia de utilización de carbono fue variable para cada concentración de CO_2 suministrado, asimismo existió también una interacción con el factor bloque día, existiendo medias diferentes para cada día analizado, obteniéndose la mayor media en el día 4 para la concentración de CO_2 de 0% con 38.95%, la mayor media obtenida para la concentración de 5% se dio en el día 4 con 88.92% y para la concentración de 20% se obtuvo la mayor media el día 2 con 84.65%. La media global fue de 34.88%. En la Tabla 11 se tiene la relación de las medias por cada concentración y día analizado.

Tabla 11*Estadísticos descriptivos para CUE por concentración y día en %*

Día	Concentración de CO ₂ suministrado								
	0%			5%			20%		
	Media	DS	N	Media	DS	N	Media	DS	N
1	21.52	15.94	3	56.08	9.79	3	61.95	5.27	3
2	41.76	22.55	3	77.47	15.60	3	84.65	1.59	3
3	14.58	22.37	3	88.70	6.68	3	64.67	0.29	3
4	38.95	14.98	3	88.92	8.66	3	50.39	2.30	3
5	38.88	10.98	3	51.32	1.03	3	23.07	2.53	3
6	-1.69	3.60	3	14.01	3.26	3	11.81	0.35	3
7	-0.19	4.30	3	2.20	2.84	3	0.51	1.26	3
8	1.17	7.09	3	5.69	3.35	3	0.58	1.96	3

Nota. DS, Desviación Estándar

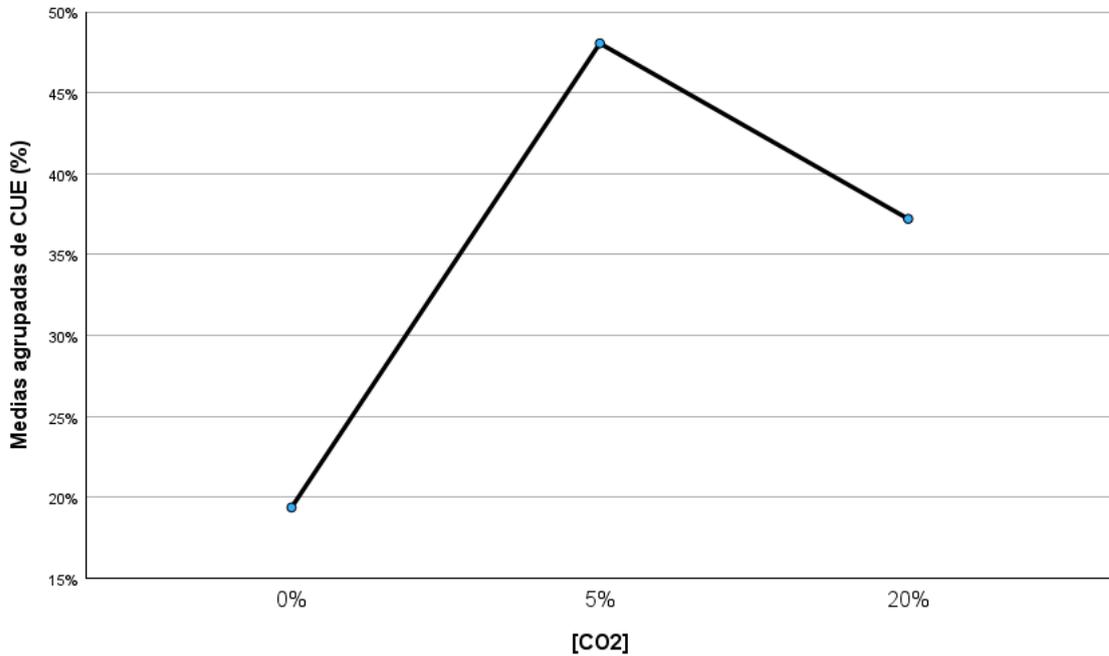
Tabla 12*Media por concentración de CO₂ suministrado y global de CUE en %*

Concentración de CO ₂ suministrado											
0%			5%			20%			Global		
Media	DS	N	Media	DS	N	Media	DS	N	Media	DS	N
19.37	21.60	24	48.05	35.47	24	37.21	30.98	24	34.88	31.80	72

La concentración de suministro de CO₂ influyó en la eficiencia de utilización de carbono, tal como se desprende de la Tabla 12 y el efecto se observa en la Figura 19, donde la CUE promedio para la concentración CO₂ de 0% se encontró en 19.37%, para la concentración de 5% la media se encontró en 48.05% y para la concentración de 20% fue de 37.21%.

Figura 19

Efecto de la concentración de CO₂ en la CUE

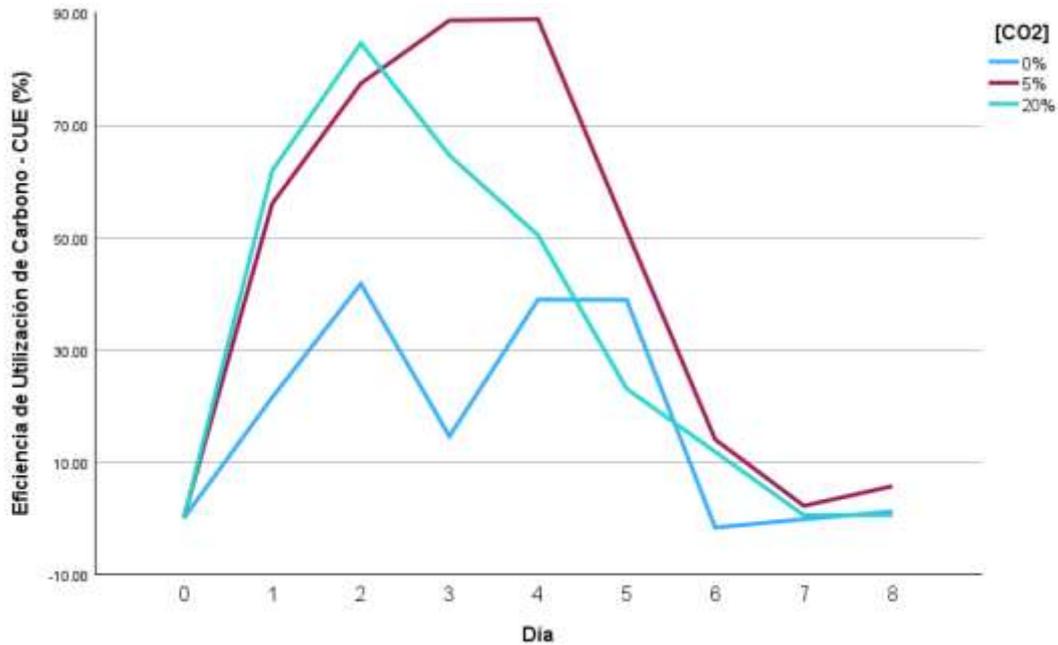


La evolución de la CUE en los días evaluados se detalla en la Figura 20, siendo la concentración de CO₂ de 5% la que mayor evolución presentó alcanzando su máximo en los días 3 y 4, seguido de la concentración de 20% cuyo valor máximo se alcanzó en el día 2 y en tercer lugar la concentración de 0% de CO₂ siendo los días 4 y 5 en la que alcanzó su mayor valor.

Adicionalmente se aprecia que a partir del día 4 para la concentración de 5% la CUE empezó a decrecer, para la concentración de 20% a partir del día 2 la CUE empezó a decrecer, para la concentración de 0% en el día 2 la CUE empezó a decrecer para posteriormente incrementar y llegar a su máximo y se estabilizó en los días 4 y 5 y finalmente a decreció, los valores decrecientes se debieron a que a partir del día en mención la concentración de la biomasa empezó a estancarse y posteriormente a decrecer.

Figura 20

Evolución de CUE en el tiempo y por concentración de CO₂



5.2. Resultados inferenciales

5.2.1. Prueba de igualdad de varianzas de los residuos

Tasa de fijación de dióxido de carbono - RCO₂

Para determinar la igualdad de varianzas para los residuos de RCO₂ se establecieron la hipótesis nula y alterna siguiente:

Ho: Las varianzas de los residuos de los tratamientos son iguales

Ha: Las varianzas de los residuos de los tratamientos no son iguales

Tabla 13

Prueba de igualdad de varianzas de Levene para RCO₂ de los residuos

F	gl1	gl2	p-valor
6.316	23	48	<.001

Nota. F: fuente de variabilidad, gl1: grados de libertad del efecto concentración de CO₂, gl2: grados de libertad del efecto bloque. El diseño se ajusta a la ecuación: $RCO_2 = \mu_{global} + [CO_2] + Día$.

De la Tabla 13, se tiene que el p-valor fue menor 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula que la varianza de los residuos de los tratamientos son iguales para RCO₂.

Eficiencia de utilización de carbono – CUE

Para determinar la igualdad de varianzas para los residuos de CUE se establecieron la hipótesis nula y alterna siguiente:

Ho: Las varianzas de los residuos de los tratamientos son iguales

Ha: Las varianzas de los residuos de los tratamientos no son iguales

Tabla 14

Prueba de igualdad de varianzas de Levene para CUE de los residuos

F	gl1	gl2	p-valor
1.839	23	48	.038

Nota. F: fuente de variabilidad, gl1: grados de libertad del efecto concentración de CO₂, gl2: grados de libertad del efecto bloque. El diseño se ajusta a la ecuación: $CUE = \mu_{global} + [CO_2] + Día$.

De la Tabla 14, se tiene que el p-valor fue menor 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula que la varianza de los residuos de los tratamientos son iguales para CUE.

5.2.2. Análisis univariado de la varianza

Tasa de fijación de dióxido de carbono - RCO₂

Para el análisis de los tratamientos (concentración de CO₂) se plantearon las siguientes hipótesis nula y alterna.

Ho: El efecto de los tratamientos en la RCO₂ son iguales

Ha: El efecto de los tratamientos en la RCO₂ no son iguales

Por otra parte, para el efecto del bloque (día) se establecieron las siguientes hipótesis nula y alterna.

Ho: El efecto del bloque en la RCO₂ no son significativos

Ha: El efecto del bloque en la RCO₂ son significativos

Tabla 15*Análisis univariado de varianza para RCO₂*

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-valor
Modelo corregido	6662471.37	9	740274.60	26.136	<.001
Intersección [CO ₂]	8495274.47	1	8495274.47	299.928	<.001
Día	2460133.94	2	1230066.97	43.428	<.001
Error	4202337.43	7	600333.92	21.195	<.001
Total	1756114.14	62	28324.42		
Total corregido	16913859.98	72			
Total corregido	8418585.51	71			

Nota. $R^2 = 0.791$ (R^2 ajustado = 0.761)

De la Tabla 15 se observó que para el efecto del tratamiento de concentración de CO₂, el p-valor fue menor 0.05 y se rechaza la hipótesis nula, es decir que el efecto de los tratamientos en la RCO₂ son iguales. En otras palabras, la concentración de CO₂ si tuvo efecto en la RCO₂.

De la Tabla 15, para el efecto del bloque día, el p-valor fue menor a 0.05, rechazando la hipótesis nula, por el cual el bloque día sí tuvo un efecto significativo en la RCO₂.

El coeficiente de determinación ajustado del modelo R^2 es de 0.761, lo que significa que 76.1% de los datos se ajustaron o representaron por el modelo $RCO_2 = \mu_{global} + [CO_2] + Día$, se empleó el coeficiente ajustado debido a que en el modelo no se consideró el efecto de la interacción entre el tratamiento de concentración de CO₂ y el bloque día.

Eficiencia de utilización de carbono - CUE

Para el análisis de los tratamientos (concentración de CO₂) se plantearon las siguiente hipótesis nula y alterna.

Ho: El efecto de los tratamientos en la CUE son iguales

Ha: El efecto de los tratamientos en la CUE no son iguales

Por otra parte, para el efecto del bloque (día) se establecieron las siguientes hipótesis nula y alterna.

Ho: El efecto del bloque en la CUE no son significativos

Ha: El efecto del bloque en la CUE son significativos

Tabla 16*Análisis univariado de varianza para CUE*

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-valor
Modelo corregido	56991.39	9	6332.38	26.514	<.001
Intersección	87574.90	1	87574.90	366.687	<.001
Conc.CO2	10062.57	2	5031.28	21.067	<.001
Día	46928.82	7	6704.12	28.071	<.001
Error	14807.31	62	238.83		
Total	159373.60	72			
Total corregido	71798.70	71			

Nota. $R^2 = 0.794$ (R^2 ajustado = 0.764)

De la Tabla 16 se observó que para el efecto del tratamiento de concentración de CO₂, el p-valor fue menor a 0.05 y se rechazó la hipótesis nula, es decir que el efecto de los tratamientos en la CUE son iguales. En otras palabras, la concentración de CO₂ si tuvo efecto en la CUE.

De la Tabla 16, para el efecto del bloque día, el p-valor fue menor a 0.05, rechazando la hipótesis nula, por el cual el bloque día sí tuvo un efecto significativo en la CUE.

El coeficiente de determinación ajustado del modelo R^2 fue de 0.764, lo que significa que 76.4% de los datos se ajustaron o representaron el modelo $CUE = \mu_{global} + [CO_2] + Día$, se empleó el coeficiente ajustado debido a que en el modelo no se consideró el efecto de la interacción entre el tratamiento de concentración de CO₂ y el bloque día.

5.2.3. Comparaciones múltiples entre tratamientos

Tasa de fijación de dióxido de carbono - RCO₂

Como las varianzas de los residuos no son iguales para el indicador RCO₂ tal como se demostró en la Tabla 13, las comparaciones múltiples se realizaron con el estadístico T2 de Tamhane para varianzas no iguales.

Las pruebas de hipótesis nula y alternativa para las comparaciones múltiples fueron:

Ho: Los resultados de RCO₂ son estadísticamente iguales para cada tratamiento de CO₂

Ha: Los resultados de RCO₂ no son estadísticamente iguales para cada tratamiento de CO₂

Tabla 17

Prueba T2 de Tamhane para comparaciones múltiples de RCO₂

Estadístico	[CO ₂]	[CO ₂]	Diferencia de medias ^(a)	Desv. Error	p-valor
Tamhane	0%	5%	-257.39	61.94	<.001
		20%	-451.30	87.81	<.001
	5%	0%	257.39	61.94	<.001
		20%	-193.91	100.20	.017
	20%	0%	451.30	87.81	<.001
		5%	193.91	100.20	.017

Nota. (a) Significancia de diferencias de medias para $\alpha = 0.05$.

De la Tabla 17 se tuvo que el p-valor para cada comparación entre los niveles de concentración CO₂ fue menor a 0.05 para el indicador RCO₂, rechazando la hipótesis nula, siendo los resultados diferentes entre sí, las diferencias de medias entre un grupo de comparación (columna 3) indicó el grado en que la RCO₂ es mejor, siendo el mayor valor entre la comparación de 20% y 0% con 451.30 mg/L/d, seguido de la comparación entre 5% y 0% con 257.39 mg/L/d, es decir que el mejor tratamiento para la RCO₂ fue la concentración de 20% de CO₂ suministrado, el segundo mejor tratamiento fue la concentración de suministro de 5% y por último la concentración de 0% de CO₂.

Eficiencia de utilización de carbono - CUE

En la Tabla 14 se demostró que las varianzas de los residuos no son iguales para el indicador CUE, bajo dicha premisa las comparaciones múltiples se realizaron con el estadístico T2 de Tamhane para varianzas no iguales.

Las pruebas de hipótesis nula y alternativa para las comparaciones múltiples fueron:

Ho: Los resultados de CUE son estadísticamente iguales para cada tratamiento de CO₂

Ha: Los resultados de CUE no son estadísticamente iguales para cada tratamiento de CO₂

Tabla 18*Prueba T2 de Tamhane para comparaciones múltiples de CUE*

Estadístico	[CO ₂]	[CO ₂]	Diferencia de medias ^(a)	Desv. Error	p-valor
Tamhane	0%	5%	-28.68	8.48	.005
		20%	-17.83	7.71	.007
	5%	0%	28.68	8.48	.005
		20%	10.84	9.61	.003
	20%	0%	17.83	7.71	.007
		5%	-10.84	9.61	.003

Nota. (a) Significancia de diferencias de medias para $\alpha = 0.05$.

De la Tabla 18 se tuvo que el p-valor para cada comparación entre los niveles de concentración CO₂ fue menor a 0.05 para el indicador RCO₂, rechazando la hipótesis nula, siendo los resultados diferentes entre sí, las diferencias de medias entre un grupo de comparación (columna 3) indicó el grado en que la CUE fue mejor, siendo el mayor valor entre la comparación de 5% y 20% con 28.68%, seguido de la comparación entre 20% y 0% con 17.83%, es decir que el mejor tratamiento para la CUE fue la concentración de 5% de CO₂ suministrado, el segundo mejor tratamiento fue la concentración de suministro de 20% y por último la concentración de 0% de CO₂.

5.3. Otro tipo de resultados estadísticos

5.3.1. Prueba de normalidad para errores

Para determinar la normalidad de los errores o residuos, se empleó la prueba de Shapiro-Wilk, las hipótesis nula y alternativa fueron:

Ho: Los residuos tienen una distribución normal

Ha: Los residuos no tienen una distribución normal

Tabla 19*Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los errores de RCO₂ y CUE*

Residuo del Indicador	Estadístico	gl	p-valor
RCO ₂ (mg/L/d)	.979	72	.285
CUE (%)	.978	72	.226

De la Tabla 19 el p-valor fue mayor a 0.05 para el indicador de RCO_2 , para el cual se aceptó la hipótesis nula. Que los residuos tienen una distribución normal. Asimismo, para el indicador CUE, el p-valor fue mayor a 0.05, aceptando la hipótesis nula, que los residuos tienen una distribución normal.

Comprobando el supuesto de normalidad de los residuos que son exigidos por el análisis univariado de varianza.

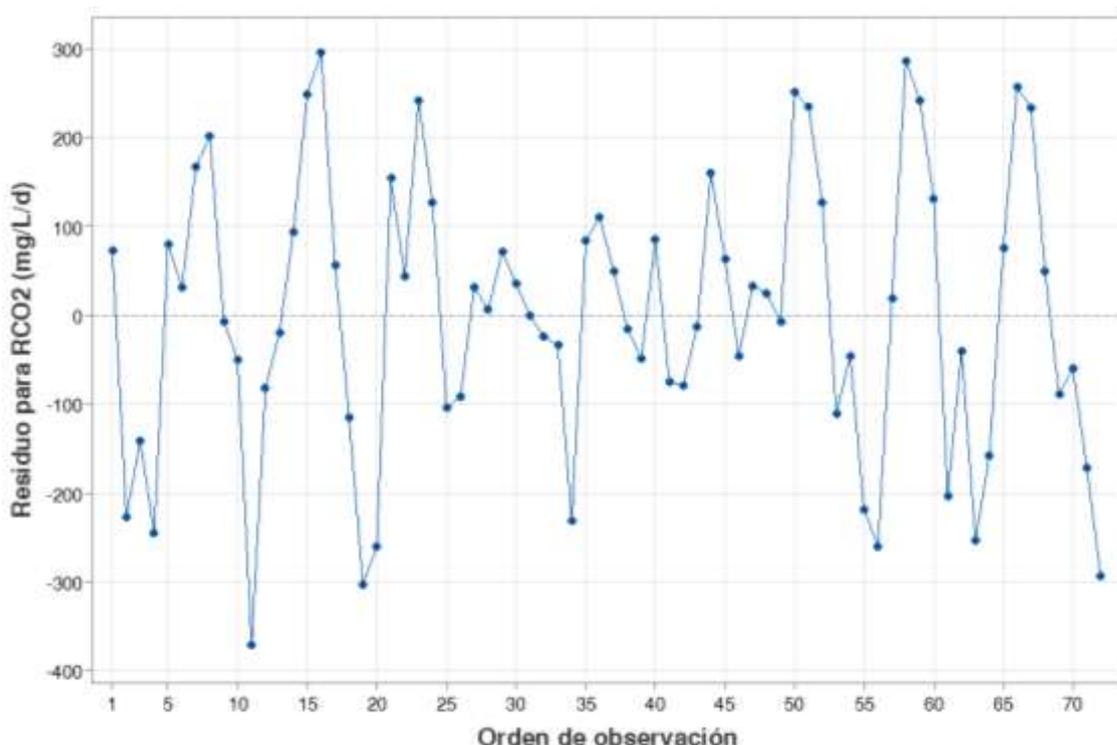
5.3.2. Prueba de independencia de los residuos

Para el análisis de la independencia de los residuos, se empleó la gráfica de los residuos versus el orden de muestreo o de observación realizado, en ese sentido la distribución de esta nube de puntos no debe tender a una línea, un embudo u otra distribución conocida.

Para el indicador RCO_2 (Figura 21), el orden de observación no influyó en los residuos mostrando una aleatoriedad en la distribución de la nube de puntos sin que los puntos se alineen a una forma conocida de distribución, de esta manera se cumple el supuesto de independencia de los residuos exigido por el análisis univariado de varianza para el indicador de RCO_2 .

Figura 21

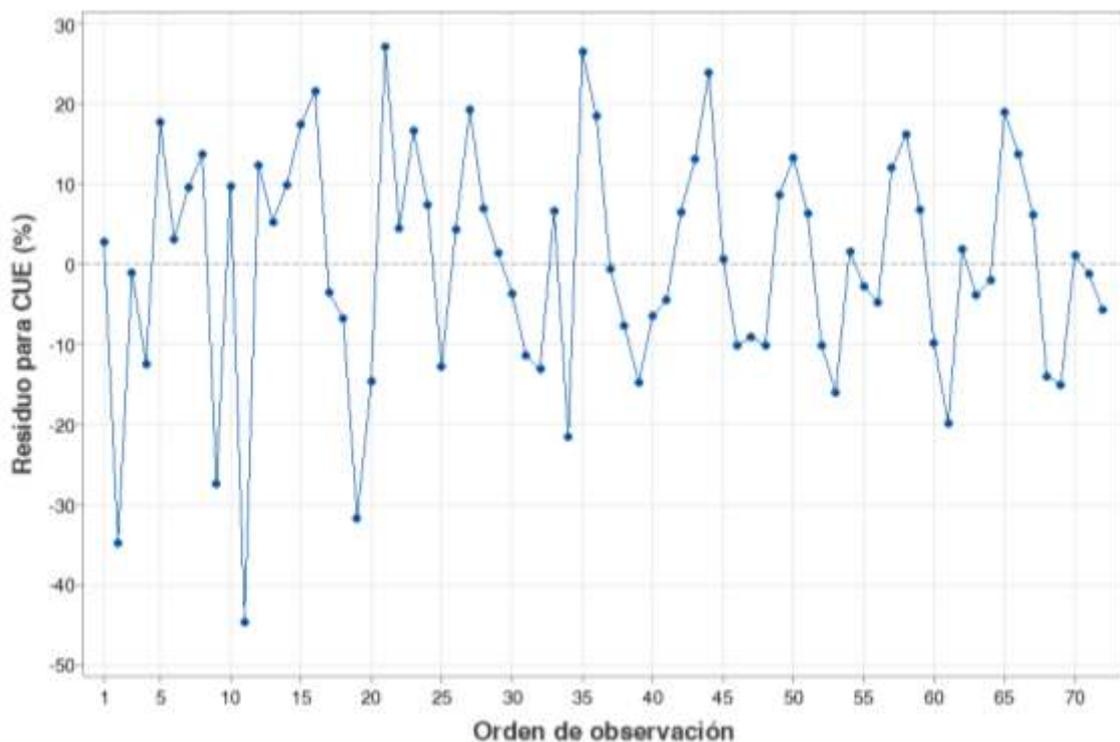
Residuos vs orden de observación para RCO_2



Para el indicador CUE (Figura 22), el orden de observación no influyó en los residuos mostrando una aleatoriedad en la distribución de la nube de puntos sin que los puntos se alineen a una forma conocida de distribución, de esta manera se cumple el supuesto de independencia de los residuos exigido por el análisis univariado para el indicador CUE.

Figura 22

Residuos vs orden de observación para CUE

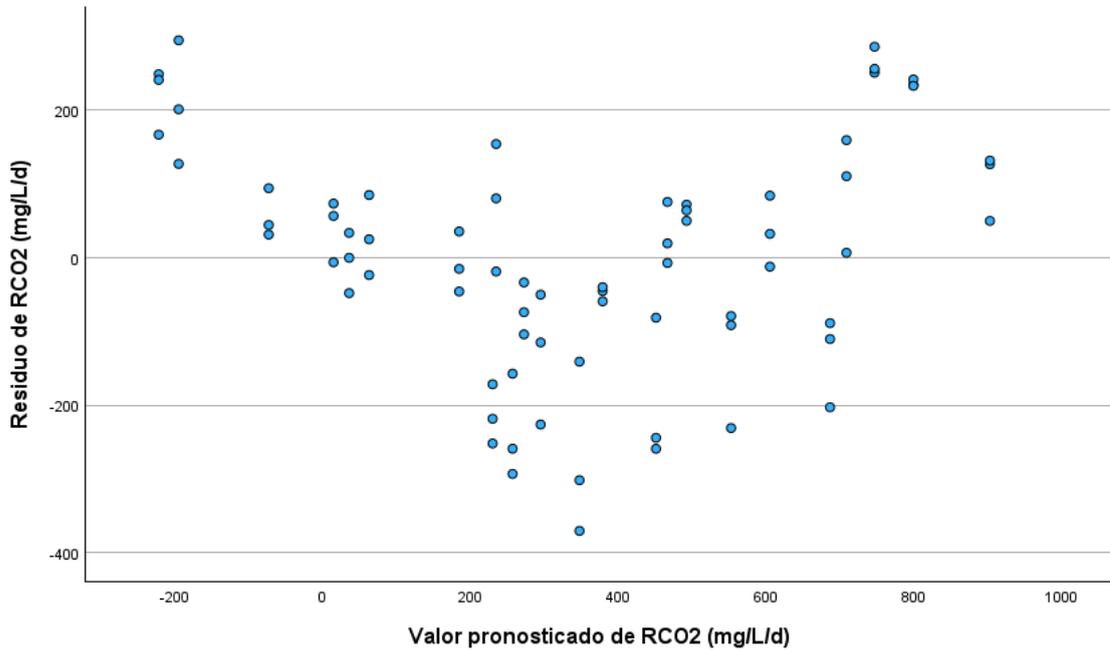


5.3.3. Homogeneidad de varianzas de los errores

Otra comprobación de los supuestos del análisis univariado es la homogeneidad de varianzas, en esta prueba se grafica los valores pronosticados del modelo vs los residuos, en esta gráfica los puntos no deben mostrar una tendencia clara de linealidad, una distribución de embudo u otra forma de distribución conocida, en la Figura 23 no se observa una distribución lineal u otra dependencia entre los valores pronosticados versus los residuos para el indicador RCO₂, de esta manera se cumple la homogeneidad de las varianzas de los errores exigidos en el análisis univariado de varianza para este indicador.

Figura 23

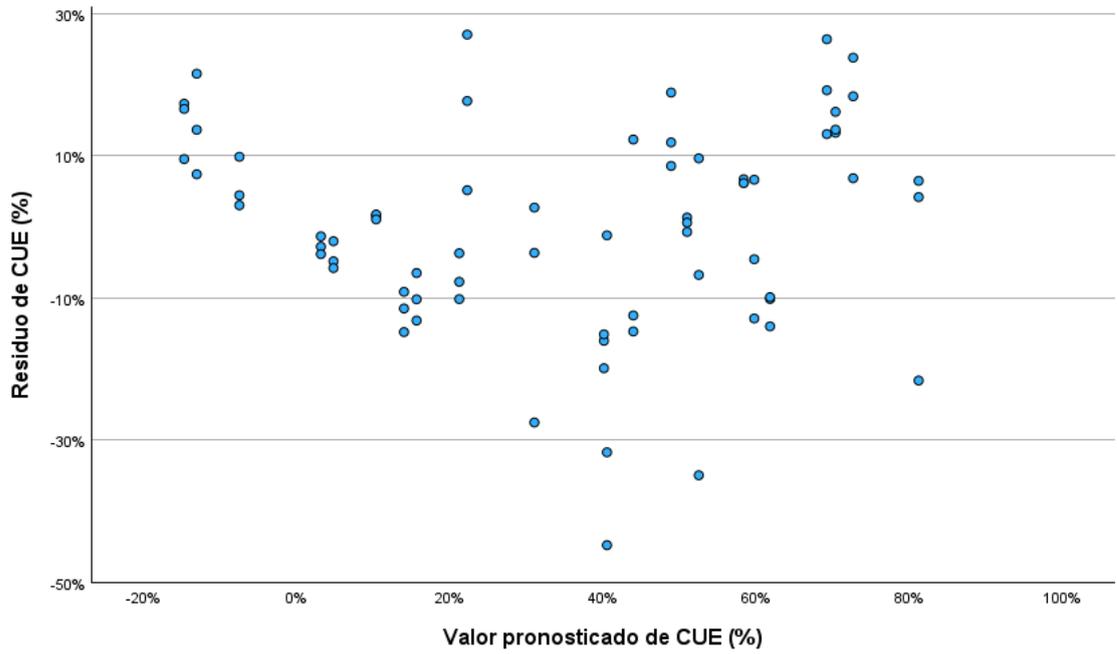
Valores pronosticados vs residuos para RCO₂



De la misma manera, la gráfica de los valores pronosticados del modelo vs los residuos de la Figura 24 no se observó una distribución lineal u otra dependencia entre los valores pronosticados versus los residuos para el indicador CUE, de esta manera se cumple la homogeneidad de las varianzas de los residuos exigidos por el análisis de univariado de varianza para este indicador.

Figura 24

Valores pronosticados vs residuos para CUE



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Hipótesis General: Las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial tendrán una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

De nuestros resultados inferenciales se demostró estadísticamente que las emisiones de gases de efecto invernadero tuvieron una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*), representados por los indicadores de RCO₂ y CUE, que para ambos casos mediante el análisis univariado de varianza el p-valor fue menor a 0.05, demostrando la influencia.

Hipótesis específica 1: La concentración de dióxido de carbono al 0% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

De acuerdo con la prueba de comparaciones múltiples, se demostró que la concentración de dióxido de carbono al 0% tuvo la menor influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) tanto para el indicador de RCO₂ y CUE, en comparación con las concentraciones de 5% y 20%, corroborado por el p-valor menor a 0.05 (Tablas 17 y 18) de comparación de las medias para ambos indicadores.

Hipótesis específica 2: La concentración de dióxido de carbono al 5% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

La concentración de dióxido de carbono al 5% tuvo la mayor influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) para el indicador de CUE con la mayor diferencia de media a 0% y 20% (ver Tabla 18) donde el p-valor el menor a 0.05 para ambos casos. Para el indicador RCO₂ la concentración de 5% se tuvo como el segundo mejor tratamiento (ver Tabla 17) obteniendo un p-valor menor a 0.05 en comparación a la concentración de 0% y 20% según la prueba de comparaciones múltiples.

Hipótesis específica 3: La concentración de dióxido de carbono al 20% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas

(*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor a nivel piloto.

La concentración de dióxido de carbono al 20% tuvo la mayor influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (*Chlorella vulgaris*) para el indicador de RCO₂ con la mayor diferencia de media a 0% y 5% (ver Tabla 17) donde el p-valor el menor a 0.05 para ambos casos. Para el indicador CUE la concentración de 20% se tuvo como el segundo mejor tratamiento (ver Tabla 18) obteniendo un p-valor menor a 0.05 en comparación a la concentración de 0% y 5% según la prueba de comparaciones múltiples.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Los resultados obtenidos en relación con la tasa de fijación de dióxido de carbono indican que, el mejor tratamiento fue el de 20% con un valor de 558.56 mg/L/d, lo cual demostró una mayor fijación de CO₂ convertido en biomasa, de caso contrario, al 5% se obtuvo un CUE máximo de 48.05% con respecto al CO₂ suministrado durante la investigación. Este resultado es similar al obtenido por Vergara, Sanclemente y Ararát (2023) donde se evaluó la fijación de CO₂ mediante la microalga *Chlorella vulgaris* a 0.36, 11.44 y 22.62 g/d; en el cual el resultado en relación a la tasa de fijación de CO₂ fue superior a un suministro de CO₂ moderado (11.44 g/d) con un valor de 161.79 ± 4.72 mg/L/d y una remoción de CO₂ a un suministro menor de CO₂ de (0.36 g/d) con un valor de 49.80 ± 3.16%, lo cual se intuye que a mayor concentración de CO₂ puede haber mayor conversión a biomasa pero de caso contrario la capacidad de utilización del carbono puede ser contraria, puesto que no todo el CO₂ pudo ser fijado habiéndose quedado dentro del cultivo o escapado por burbujeo.

Nuestros resultados obtenidos a nivel experimental con la microalga *Chlorella vulgaris* se obtuvo una tasa de biofijación de dióxido de carbono de 558.56 mg/L/d a una concentración de 20% v/v con una tasa de aireación de 1500 mL/min en un tiempo de aireación de 24 h/d, bajo estas condiciones de estudio se obtuvo una mayor biofijación en contraste a lo investigado por Zheng et al. (2020) donde obtuvo su mayor tasa de fijación de 454 mg/L/d al 5% de CO₂ con una tasa de aireación de 1500 mL/min en 24 h/d, lo que se atribuye que a una tasa mayor de aireación y circulación de aire en el medio favorece a una mayor productividad y absorción del CO₂ suministrado.

Los resultados obtenidos en la investigación para la eficiencia de

utilización de carbono dio como resultado un valor de 48.05% presentándose en un suministro del 5% de concentración de CO₂ inyectado a un flujo de 0.25 vvm bajo condiciones de 2500 LUX y 24 horas (día-noche), que es similar a Bustos y Fabio (2022) cuya investigación arrojó el valor de 27% de capacidad de utilización de carbono al 5% de concentración de CO₂, lo cual determina que la eficiencia no se obtiene a mayor producción de biomasa, por el contrario, está determinada por las condiciones operación tanto como la energía lumínica, el pH, la especie de microalgas y la concentración de nutrientes.

Para el estudio de Jain et al. (2018) en el cual se determinó que la tasa de fijación para los suministros constantes al 5%, 10% y 20% fueron 149 mg/L/d, 430 mg/L/d y 236 mg/L/d respectivamente; de manera que la mayor biofijación de CO₂ convertida en biomasa por un periodo de 4 días fue el suministro de 10% con una productividad de biomasa 264.58 ± 8.8 mg/L/d. En base a ello, se demostró que un suministro de CO₂ con un aumento moderado de la concentración durante un tiempo de periodo más corto mejoran la productividad de la biomasa. Para la presente investigación, se pudo reflejar el mismo comportamiento con relación a la tasa de fijación, ya que el suministro óptimo de CO₂ fue el de 20% en el que se demuestra que la mayor evolución alcanzada fue en el día 3 para luego decrecer y estancarse a partir del día 4.

Similar al estudio realizado por Hartwig et al. (2017), en el cual tuvo como objetivo mitigar las emisiones de CO₂ provenientes de centrales eléctricas mediante la mitigación biológica con *Chlorella fusca* y *Spirulina sp.* De manera que la máxima biofijación de CO₂ se obtuvo con la microalga *Chlorella fusca*, fijando 2.6 veces más CO₂ que la *Spirulina sp.*; corroborando la elección de la microalga del género *Chlorella* para el desarrollo de la presente investigación.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes

En la presenta investigación se consideran los lineamientos establecidos en el Código de Ética de Investigación de la Universidad Nacional del Callao mediante Resolución de Consejo Universitario N°260-2019-CU.

Asimismo, se consideraron los lineamientos del Reglamento de Propiedad Intelectual mediante Resolución N°1206-2019-R, de manera que se respetaron los derechos de propiedad y autoría intelectual.

Los autores asumen total responsabilidad del contenido de la presente investigación, de manera que no se falsificaron, ni se modificaron datos o resultados de manera parcial o total durante su desarrollo.

VII. CONCLUSIONES

- Se concluye que las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial tuvieron un efecto en la biofijación de dióxido de carbono con la microalga *Chlorella vulgaris* puesto que a medida que varía la concentración de dióxido de carbono, se tuvo una biofijación diferente en cada tratamiento, corroborado con el p-valor (0.001 menor a 0.05) del análisis univariado de varianza para los dos indicadores (tasa de fijación de CO₂ y eficiencia de utilización de carbono).
- Se determinó que la concentración de dióxido de carbono al 0% tuvo una baja influencia en la biofijación con microalgas *Chlorella vulgaris*, puesto que para la tasa de fijación de CO₂, esta tuvo un valor (107.27 mg/L/día) menor al promedio (343.5 mg/L/día). El mismo comportamiento se obtuvo para el indicador de eficiencia de utilización de carbono registrando una eficiencia de 19.37% en comparación con la media global 34.88%.
- Se determinó que la concentración de dióxido de carbono al 5% tuvo la mayor influencia en la biofijación con microalgas *Chlorella vulgaris* para el indicador de eficiencia de utilización de carbono, obteniéndose como mejor tratamiento con un valor de 48.05%. Para el indicador de tasa de fijación de CO₂, se obtuvo como el segundo mejor tratamiento con un valor de 364.66 mg/L/día, según el análisis de comparaciones múltiples.
- Se determinó que la concentración de dióxido de carbono al 20% tuvo la mayor influencia en la biofijación con microalgas *Chlorella vulgaris* para el indicador de tasa de fijación de CO₂, obteniéndose como mejor tratamiento con un valor de 558.56 mg//día. Para el indicador de eficiencia de utilización de carbono, se obtuvo como el segundo mejor tratamiento con un valor de 37.21%, según el análisis de comparaciones múltiples.
- Durante el desarrollo del trabajo de investigación se controló los parámetros de operación manteniéndose la temperatura en 30 °C, pH entre 6.0 a 7.5, luz incidente en 2500 Lux y oxígeno disuelto menor a 14 mg/L.

VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que se mida las variables de intercambio gaseoso en el cultivo ya que es importante para hacer seguimiento al metabolismo de las microalgas.
- A pesar de encontrar en otros estudios volúmenes de las unidades experimentales menores a 1 L, es preferible siempre utilizar grandes volúmenes con el fin de poder obtener muestreos seguidos sin necesidad de alterar el cultivo por la pérdida de volumen.
- Con el fin de complementar los estudios de emisiones de GEI de fuente industrial, se recomienda adicionar junto con el CO₂ los contaminantes como SO_x, NO_x y cenizas provenientes de los gases de combustión que están presentes en estos flujos para tener un conocimiento si estos afectan el proceso de biofijación de las microalgas.
- Se recomienda, durante la fase de reproducción y crecimiento de las microalgas, mantener la limpieza del entorno, así como la esterilización de todos los equipos y materiales empleados que entren en contacto con la microalga, para evitar la contaminación con otros microorganismos como los protozoarios.
- Se recomienda controlar los parámetros de operación (luz, temperatura y pH) de manera correcta, ya que su desbalance podría provocar estrés en las microalgas facilitando el desarrollo de microorganismos depredadores.
- Se recomienda seguir con la línea de investigación con diferentes especies de microalgas (pudiendo aislarse de un entorno específico del país), variar los parámetros de operación (luz, temperatura, fotoperiodo, flujo de gas, entre otros) y búsqueda de alternativas medio ambientales a partir de la biomasa como producción de biodiesel a partir de la extracción de lípidos, generación de suplementos alimenticios en base a la caracterización energética y proteica de la microalga.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIR PRODUCTS, 2017. *Ficha de datos de seguridad del Dióxido de Carbono - CO₂*. Barcelona. S.E. de Carburos Metálicos S.A. 1.22.
- ARGENTINA.GOB.AR, 2023. Mitigación o reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero. [en línea]. 2023. Recuperado a partir de: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/mitigacion> [consultado 23 julio 2023].
- ARROYO GÓMEZ, Citlalli Adelaida, 2015. *Biofijación de CO₂, NO y SO₂ presentes en los gases de Plantas Termoeléctricas utilizando Microalgas*.
- ATLAS, Ronald M. y BARTHA, Richard, 2002. *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. 4. Madrid: Pearson Education S.A.
- BALLESTEROS BENAVIDES, Oswaldo Henry y LEÓN ARISTIZABAL, Gloria Esperanza, 2007. *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y cambio climático*.
- BARSANTI, Laura y GUALTIERI, Paolo, 2006. *Algae Anatomy, Biochemistry and Biotechnology*. 1° Ed. Boca Ratón, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group. ISBN 9780849314674.
- BENAVENTE VALDÉS, J. R. et al., 2012. Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*.
- BORJA S., Manuel, 2012. *Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros*. Chiclayo: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- BUSTOS TORRES, Abraham Korman, Diego y FABIO ROLDÁN, Codirector, 2022. *Evaluación del efecto de la concentración de CO₂*.
- CAI, Bofeng y OTTINGER, Deborah A., 2019. Industrial Processes and Product Use. En: IPCC (ed.), *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

- CALDERÓN LUJAN, Rubén Javier, 2022. *EVALUACIÓN DE LA DEPURACIÓN DE CO₂, H₂S Y LA CONCENTRACION DE CH₄, MEDIANTE EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO CON MICROALGAS (Chlorella vulgaris SP) PARA OBTENCIÓN DE BIOMETANO, A PARTIR DEL BIOGÁS GENERADO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA EXTRACTORA DE PALMA DE ACEITE INDOLMASA.*
- CARVALHO, Ana P, MEIRELES, A y MALCATA, F Xavier, 2006. Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. Núm. ii, pp. 1490–1506.
- CUELLAR BERMUDEZ, Sara P. et al., 2015. Photosynthetic bioenergy utilizing CO₂: An approach on flue gases utilization for third generation biofuels. *Journal of Cleaner Production.*
- DAWIDOWSKI, Laura, SÁNCHEZ CCOYLLO, Odón y ALARCÓN, Nadietska, 2014. Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana. *SENAMHI / SAEMC.*
- DOE, 2021. *Carbon Dioxide 101* [en línea]. 2021. Recuperado a partir de: <https://netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-dioxide-101> [consultado 24 enero 2022].
- DUARTE, Jessica Hartwig y COSTA, Jorge Alberto Vieira, 2017. Synechococcus Nidulans from a Thermoelectric Coal Power Plant as a Potential CO₂ Mitigation in Culture Medium Containing Flue Gas Wastes. *Bioresource Technology.*
- EL COMERCIO, 2014. CO₂ que Perú Emite a Diario Equivale a 380 Mil Globos de Una Tonelada. *Diario El Comercio* [en línea]. 2014. Recuperado a partir de: <http://elcomercio.pe/lima/co2-peru-emite-diario-equivale-380-mil-globos-306972>
- EXITOSA, 2023. Perú buscará reducir un 40% sus emisiones de gases de efecto invernadero al 2030. *Exitosa Noticias* [en línea]. 9 enero 2023. Recuperado a partir de: <https://www.exitosanoticias.pe/actualidad/peru-buscara-reducir-40-sus-emisiones-gases-efecto-invernadero-2030-n41928> [consultado 19 julio 2023].

- FERNÁNDEZ, F Gabriel Acién, 2012. Conversion of CO₂ into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO₂ removal?. pp. 577–586. DOI 10.1007/s00253-012-4362-z.
- FERNÁNDEZ, Yúbal, 2022. *Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno* [en línea]. Xataka. Recuperado a partir de: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>
- FIERRO MORÁN, Evelyn Johanna, 2015. *Respuesta de Col China (Brassica rapa L. ssp. pequinensis (Lour Hanelt.) y Culantro (Coriandrum sativum L.) a la aplicación al suelo del consorcio de microalgas (Chlorella sp.) y (Scenedesmus sp.)*. Universidad Central del Ecuador.
- FILALI, Rayen et al., 2011. Growth modeling of the green microalga *Chlorella vulgaris* in an air-lift photobioreactor. En: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, pp. 10603–10608. IFAC Secretariat. 2011. ISBN 9783902661937. DOI 10.3182/20110828-6-IT-1002.01955.
- GARCÍA CUBERO, Rafael, 2014. *Producción de Biomasa de Microalgas Rica en Carbohidratos Acoplada a la Eliminación Fotosintética de CO₂*. Universidad de Sevilla.
- GARCÍA PORTERO, J., 2020. Emisiones de CO₂: revisión histórica, emisiones acumuladas, situación actual y estimaciones de futuro. *Industria Química*. Vol. 79, pp. 52–73.
- GIRALDO, Clara, 2022. Día Mundial sin Auto en Perú: 70% de la contaminación ambiental proviene de los vehículos. *Infobae* [en línea]. 22 septiembre 2022. Recuperado a partir de: <https://www.infobae.com/america/peru/2022/09/22/dia-mundial-sin-auto-en-peru-70-de-la-contaminacion-ambiental-proviene-de-los-vehiculos/> [consultado 19 julio 2023].
- GIRALDO RAVE, Alejandra, 2013. *Evaluación de Cepas de Microalgas para Captura de CO₂*. Universidad EAFIT.

- GRUPO BANCO MUNDIAL, 2023. Emisiones de CO₂ (kt). [en línea]. 2023. Recuperado a partir de: https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2020&most_recent_year_desc=true&start=2020&type=shaded&view=map&year=2020 [consultado 23 julio 2023].
- HARTWIG DUARTE, Jessica y VIEIRA COSTA, Jorge Alberto, 2017. *Synechococcus Nidulans* from a thermoelectric coal power plant as a potential CO₂ mitigation in culture medium containing flue gas wastes. *Bioresource Technology*.
- HARTWIG DUARTE, Jessica et al., 2017. Biological CO₂ mitigation from coal power plant by *Chlorella fusca* and *Spirulina* sp. *Bioresource Technology*. Vol. 234, pp. 472–475. DOI 10.1016/j.biortech.2017.03.066.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar, 2010. *Metodología de la Investigación*. 5° Ed. Mexico DF: Mc Graw Hill Interamericana.
- HO, Shih Hsin et al., 2011. Perspectives on microalgal CO₂ - emission mitigation systems - A review. *Biotechnology Advances*.
- INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ, 2023. Catálogo de Cepas. *Banco de Germoplasma - IMARPE* [en línea]. 2023. Recuperado a partir de: <https://www.imarpe.gob.pe/imarpe/servicios/banco-germoplasma#> [consultado 18 julio 2023].
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2019. *Global Energy & CO₂ Status Report 2019* [en línea]. Paris: IEA, Paris. Recuperado a partir de: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019> [consultado 27 noviembre 2021].
- INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY - IUPAC, 2018. *IUPAC Periodic Table of the Elements*. Carolina del Norte: IUPAC.
- IPCC, 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*.
- IVERSON, Tina M, 2006. Evolution and unique bioenergetic mechanisms in oxygenic photosynthesis. *Bioinorganic chemistry*. pp. 91–100. DOI 10.1016/j.cbpa.2006.02.013.

- JAIN, Deepti et al., 2018. CO₂ fixation and production of biodiesel by *Chlorella vulgaris* NIOCCV under mixotrophic cultivation. *Bioresource Technology*.
- JERÍ GARCIA, Nathaly Jazmín, 2018. *Efecto de la concentración de dióxido de carbono y agitación del cultivo sobre la fijación de carbono por la microalga Phaeodactylum tricornutum*, 2018.
- KASSIM, Mohd Asyraf y MENG, Tan Keang, 2017. Carbon Dioxide (CO₂) Biofixation by Microalgae and its Potential for Biorefinery and Biofuel Production. *Science of the Total Environment*. Vol. 584–585, pp. 1121–1129.
- KOLLER, Martin et al., 2012. Characteristics and potential of micro algal cultivation strategies: a review. Vol. 37, pp. 377–388. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.07.044.
- LUMITOS, 2023. Óxido de carbono (IV). *Química.es* [en línea]. 2023. Recuperado a partir de: https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%93xido_de_carbono_%28IV%29.html#:~:text=El%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%2C%20tambi%C3%A9n,f%C3%B3rmula%20qu%C3%ADmica%20es%20CO2. [consultado 18 julio 2023].
- MARTÍNEZ GARCÍA, Lorena, 2008. *Eliminación de CO₂ con Microalgas Autóctonas*. Universidad de León.
- MIHELIC, James R. y ZIMMERMAN, Julie Beth, 2012. *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidad y Diseño*. México DF: Alfaomega. ISBN 9786077073178.
- MINAM, 2021a. *POLITICA NACIONAL DEL AMBIENTE AL 2030.pdf*. Lima.
- MINAM, 2021b. *GUIA PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA HUELLA DE CARBONO PERÚ*. Lima. Segunda versión.
- MINAM, 2023. *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000-2019*. Lima.
- MORAES, Luiza et al., 2016. Microalgal biotechnology for greenhouse gas control: Carbon dioxide fixation by *Spirulina* sp. at different diffusers. *Ecological Engineering*. Vol. 91, pp. 426–431.

- MURRAY, Robert K. et al., 2011. *Harper. Bioquímica Ilustrada*. 28. México DF: Mc Graw Hill.
- PFAFFLIN, James R. y ZIEGLES, Edward N., 2006. *ENCYCLOPEDIA OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND ENGINEERING*. 5. Boca Ratón, Florida: CRC Taylor & Francis. ISBN 9780849398438.
- POURJAMSHIDIAN, Reza et al., 2019. Carbon dioxide biofixation by *Chlorella* sp. In a bubble column reactor at different flow rates and CO₂ concentrations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 36, número 2, pp. 639–645. DOI 10.1590/0104-6632.20190362s20180151.
- PRAXAIR, 2014. *Hoja de datos de seguridad del producto CO₂*. Callao.
- RAVEN, John A, 1997. The role of marine biota in the evolution of terrestrial Atmospheric composition and evolution of terrestrial biota. pp. 139–164.
- RICHMOND, Amos, 2004. *HandBook of Microalgal Culture: Biotechnology and applied phycology*. Blackwell Science.
- RTVE, 2022. El nuevo récord de las emisiones de CO₂ complica cumplir con el objetivo de un calentamiento global de 1,5 grados. *Cambio Climático* [en línea]. 11 noviembre 2022. Recuperado a partir de: <https://www.rtve.es/noticias/20221111/emisiones-globales-co2-record-2022/2408743.shtml> [consultado 19 julio 2023].
- RUCOBA LUARTE, Jorge Luciano, 2017. *Eficiencia en la captura de carbono atmosférico a partir de cuatro géneros de algas fotosintéticas en el distrito de Moyobamba-2015*. Moyobamba.
- SANTOS SANCHEZ, Alberto, ESQUIVIAS FEDRIANI, Luis María y AJBARY, Mohamed, 2020. *USO DE POLVO DE LARNITA EN EL ALMACENAMIENTO Y FIJACIÓN DE GASES*. Patent special issue y special section 13 mayo 2020/13 mayo 2020. España.
- SEIJAS VELÁSQUEZ, Segundo et al., 2012. Escalamiento de fotobiorreactor solar secuestrante de CO₂ de gases de combustión optimizando producción de “espirulina”. *SCIÉND*O. Vol. 15, pp. 1–15.

- SEINET, 2023. Taxonomy Explorer. [en línea]. 2023. Recuperado a partir de: <https://swbiodiversity.org/seinet/taxa/taxonomy/taxonomydynamicdisplay.php> [consultado 18 julio 2023].
- SIMBECK, D R, 2003. CO₂ CAPTURE AND STORAGE - THE ESSENTIAL BRIDGE TO THE HYDROGEN ECONOMY. *Greenhouse Gas Control Technologies*. Vol. 1, pp. 25–30.
- SKJANES, Kari, LINDBLAD, Peter y MULLER, Jiri, 2007. BioCO₂ - A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO₂ while producing H₂ and high value products. *Biomolecular Engineering*.
- TEBBANI, Sihem et al., 2020. *Biofijación de CO₂ por microalgas*. 1. Reino Unido: ISTE International. ISBN 9781800280649.
- THIMIJJAN, Richard y HEINS, Royal, 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. *Horticultural Science*. Vol. 18, número 6, pp. 818–822.
- USEPA, 2023. Descripción general de los gases de efecto invernadero. *La energía y el medioambiente* [en línea]. julio 2023. Recuperado a partir de: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero> [consultado 15 enero 2024].
- UTEX, 2023. Algal Culture Media - F/2 Medium. *Algal Culture Media* [en línea]. 2023. Recuperado a partir de: <https://utex.org/> [consultado 22 julio 2023].
- VERGARA PATIÑO, Leonardo, SANCLEMENTE REYES, Oscar Eduardo y ARARÁT OROZCO, Milton César, 2023. Biofijación de CO₂ por dos especies de microalgas cultivadas en fotobiorreactores. *Acta Biológica Colombiana*. Vol. 28, núm. 1, pp. 5–11. DOI 10.15446/abc.v28n1.90353.
- VIEIRA COSTA, Jorge Alberto et al., 2000. Modelling of growth conditions for cyanobacterium *Spirulina platensis* in microcosms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*.
- WUEBBLES, Donald J. et al., 2017. *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. Washington, DC. DOI 10.7930/J0J964J6.

ZHENG, Mingmin et al., 2020. Simultaneous fixation of carbon dioxide and purification of undiluted swine slurry by culturing *Chlorella vulgaris* MBFJNU-1. *Algal Research*. Vol. 47. DOI 10.1016/j.algal.2020.101866.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

TITULO: "EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE FUENTE INDUSTRIAL EN LA BIOFIJACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (<i>Chlorella vulgaris</i>) EN UN FOTOBIORREACTOR A NIVEL PILOTO"						
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general				
¿En qué medida las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial influyen en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto?	Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto.	Las emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial tendrán una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto.	Independiente: Emisiones de gases de efecto invernadero de fuente industrial	Emisiones de dióxido de carbono	Nivel de concentración de CO ₂ al 0% Nivel de concentración de CO ₂ al 5% Nivel de concentración de CO ₂ al 20%	Tipo: Básico Nivel: Explicativo Enfoque: Cuantitativo Diseño: Experimental Población: La población está constituida por todas las especies del género <i>Chlorella</i> existentes en el banco de germoplasma de IMARPE. Muestra: Está conformada por un volumen de cultivo de 20 L de la especie de microalga <i>Chlorella vulgaris</i> obtenida del Área de Germoplasma de la IMARPE. La técnica de
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas				
<ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál será la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 0% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto? • ¿Cuál será la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 5% en la biofijación de dióxido de carbono con 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 0% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto. • Determinar la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 5% en la biofijación de dióxido de carbono con 	<ul style="list-style-type: none"> • La concentración de dióxido de carbono al 0% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto. • La concentración de dióxido de carbono al 5% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con 	Dependiente: Biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>)	Captura de dióxido de carbono con microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	Tasa de Fijación de dióxido de carbono (R_{CO_2}) Eficiencia de fijación de carbono (CUE)	

TITULO: “EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE FUENTE INDUSTRIAL EN LA BIOFIJACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN FOTOBIORREACTOR A NIVEL PILOTO”

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto?</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál será la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 20% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto? 	<p>microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la influencia de la concentración de dióxido de carbono al 20% en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto. 	<p>microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La concentración de dióxido de carbono al 20% tendrá una influencia en la biofijación de dióxido de carbono con microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>) en un fotobiorreactor a nivel piloto. 				<p>muestreo es de tipo no probabilístico o también llamado muestreo por conveniencia.</p> <p>Lugar de estudio: Instituto de Investigación de Especialización en Agroindustria - IIEA - Ciudad Universitaria - UNAC</p>

Anexo 2: Instrumentos validados

Validación del instrumento

I. DATOS GENERALES DEL EXPERTO

I.1. Apellido y nombres: GONZALEZ MADUEÑO, CONSUELO

I.2. Cargo e institución donde labora: Docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental en la Universidad Nacional de Ingeniería.

I.3. Especialidad o línea de investigación: Especialista en Impacto Ambiental

I.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: "Instrumento para recopilar información de datos experimentales del trabajo de investigación: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PARA LA BIOFIJACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN FOTOBIOREACTOR A NIVEL PILOTO"

I.5. Autores del instrumento: Aguirre Aliaga Jhonny Máximo, Carrasco Miñan Renzo Frank, Cuadros Gómez Susan Pamela

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Criterios	Indicadores	Inaceptable					Minimamente aceptable			Aceptable				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. Claridad	Esta formulado con lenguaje comprensible.												X	
2. Objetividad	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.												X	
3. Actualidad	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.												X	
4. organización	Existe una organización lógica.												X	
5. Suficiencia	Toma en cuenta aspectos metodológicos esenciales.												X	
6. Intencionalidad	Esta adecuado para valorar las variables de la hipótesis.												X	
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y científicos.												X	
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas, objetivos, hipótesis, variables e indicadores.												X	
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicado para lograr probar la hipótesis.												X	
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al método científico.												X	

III. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación

SI


 DNI: 09992352
 Arqueóloga
 Mtro. Educación con
 mención en
 Docencia Universitaria

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

95%

Lima, 18 de setiembre de 2023

Validación del instrumento

I. DATOS GENERALES DEL EXPERTO

I.1. Apellido y nombres: VASQUEZ PERDOMO, FERNANDO

I.2. Cargo e institución donde labora: Docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental en la Universidad Nacional del Callao.

I.3. Especialidad o línea de investigación: Doctor Especialista en Desarrollo Sostenible

I.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: "Instrumento para recopilar información de datos experimentales del trabajo de investigación: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PARA LA BIOFIJACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN FOTOBIOREACTOR A NIVEL PILOTO"

I.5. Autores del instrumento: Aguirre Aliaga Jhonny Máximo, Carrasco Miñan Renzo Frank, Cuadros Gómez Susan Pamela

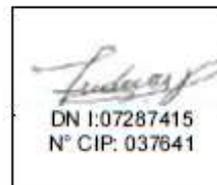
II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Criterios	Indicadores	Inaceptable					Minimamente aceptable			Aceptable				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. Claridad	Esta formulado con lenguaje comprensible.												X	
2. Objetividad	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.												X	
3. Actualidad	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.												X	
4. organización	Existe una organización lógica.												X	
5. Suficiencia	Toma en cuenta aspectos metodológicos esenciales.												X	
6. Intencionalidad	Esta adecuado para valorar las variables de la hipótesis.												X	
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y científicos.												X	
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas, objetivos, hipótesis, variables e indicadores.												X	
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicado para lograr probar la hipótesis.												X	
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al método científico.												X	

III. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación

SI



IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

95%

Lima, 11 de setiembre de 2023

Validación del instrumento

I. DATOS GENERALES DEL EXPERTO

1.1. Apellido y nombres: **TOPE RAMOS, CARLOS**

1.2. Cargo e institución donde labora: **DOCENTE DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL EN LA UNAC.**

1.3. Especialidad o línea de investigación: **BIOREMEDIACIÓN, BIOTECNOLOGÍA, MICROBIOLOGÍA.**

1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: "Instrumento para recopilar información de datos experimentales del trabajo de investigación: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PARA LA BIOFIJACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO CON MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN FOTOBIOREACTOR A NIVEL PILOTO"

1.5. Autores del instrumento: **Aguirre Aliaga Jhonny Máximo, Carrasco Miñan Renzo Frank, Cuadros Gómez Susana Pamela**

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Criterios	Indicadores	Inaceptable					Minimamente aceptable					Aceptable			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. Claridad	Esta formulado con lenguaje comprensible												X		
2. Objetividad	Esta adecuado a las leyes y principios científicos												X		
3. Actualidad	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación												X		
4. organización	Existe una organización lógica												X		
5. Suficiencia	Toma en cuenta aspectos metodológicos esenciales												X		
6. Intencionalidad	Esta adecuado para valorar las variables de la hipótesis												X		
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y científicos												X		
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas, objetivos, hipótesis, variables e indicadores												X		
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicado para lograr probar la hipótesis												X		
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al método científico												X		

III. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación

SI


 DNI: 07685630
 N° CIP: 8425

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

95%

Lima, 29 de setiembre de 2023

Anexo 3: Base de datos

Tabla A3.1

Registro de masa para determinación de biomasa inicial (concentración inicial D0)

Día	C0R1		C0R2		C0R3	
	MF	MF+M	MF	MF+MM	MF	MF+MM
D0	0.0379	0.0399	0.0376	0.0396	0.0378	0.0398
	0.0380	0.0401	0.0378	0.0398	0.0380	0.0400
	0.0380	0.0399	0.0376	0.0397	0.0376	0.0396

Nota. C0 Representa la Concentración inicial de Microalga, R1, R2 y R3 son las réplicas de la misma concentración, MF es la masa del filtro después del secado, MF+M es la masa de filtro más la Muestra (biomasa) seca, medido en la mezcla del cultivo inicial.

Tabla A3.2

Registro de masa para determinación de biomasa (experimentación D1-D8)

Muestra	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8	
	MF	MF+M	MF	MF+M	MF	MF+M	MF	MF+M	MF	MF+M	MF	MF+M	MF	MF+M	MF	MF+M
CBB1R1	0.038	0.04	0.038	0.04	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.043	0.038	0.043	0.038	0.042	0.038	0.042
CBB1R2	0.038	0.04	0.038	0.04	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.043	0.038	0.043	0.038	0.042	0.038	0.043
CBB1R3	0.038	0.04	0.038	0.041	0.038	0.041	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.042	0.038	0.043	0.038	0.042
CBB2R1	0.038	0.04	0.038	0.041	0.038	0.04	0.038	0.042	0.038	0.042	0.038	0.042	0.038	0.042	0.038	0.043
CBB2R2	0.038	0.04	0.038	0.041	0.038	0.04	0.038	0.042	0.038	0.043	0.038	0.042	0.038	0.042	0.038	0.042
CBB2R3	0.038	0.04	0.038	0.041	0.038	0.041	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.043	0.038	0.043	0.038	0.044

Muestra	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8	
	MF	MF+M														
C1B1R1	0.038	0.040	0.038	0.041	0.038	0.040	0.038	0.041	0.038	0.043	0.038	0.042	0.038	0.043	0.038	0.043
C1B1R2	0.038	0.040	0.038	0.040	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.043	0.038	0.043	0.038	0.042	0.038	0.042
C1B1R3	0.038	0.040	0.038	0.041	0.038	0.041	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.042	0.038	0.042	0.038	0.042
C1B2R1	0.038	0.040	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.046	0.038	0.048	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049
C1B2R2	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.046	0.038	0.048	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049
C1B2R3	0.038	0.040	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.047	0.038	0.048	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049
C1B3R1	0.038	0.040	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.046	0.038	0.048	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049
C1B3R2	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.046	0.038	0.048	0.038	0.048	0.038	0.048	0.038	0.049
C1B3R3	0.038	0.040	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.046	0.038	0.048	0.038	0.049	0.038	0.048	0.038	0.050
C2B1R1	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.047	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049
C2B1R2	0.038	0.041	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.047	0.038	0.048	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.050
C2B1R3	0.038	0.040	0.038	0.042	0.038	0.044	0.038	0.046	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049	0.038	0.049
C2B2R1	0.038	0.041	0.038	0.044	0.038	0.048	0.038	0.051	0.038	0.053	0.038	0.054	0.038	0.054	0.038	0.054
C2B2R2	0.038	0.041	0.038	0.044	0.038	0.048	0.038	0.051	0.038	0.053	0.038	0.054	0.038	0.054	0.038	0.053
C2B2R3	0.038	0.041	0.038	0.044	0.038	0.048	0.038	0.051	0.038	0.053	0.038	0.054	0.038	0.054	0.038	0.054
C2B3R1	0.038	0.041	0.038	0.045	0.038	0.048	0.038	0.051	0.038	0.053	0.038	0.054	0.038	0.054	0.038	0.054
C2B3R2	0.038	0.041	0.038	0.045	0.038	0.048	0.038	0.051	0.038	0.053	0.038	0.054	0.038	0.054	0.038	0.054
C2B3R3	0.038	0.042	0.038	0.045	0.038	0.048	0.038	0.051	0.038	0.053	0.038	0.054	0.038	0.053	0.038	0.054

Nota. CB Concentración de aire puro sin enriquecimiento de CO_2 , C1 Concentración de aire enriquecido al 5% de CO_2 , C2 Concentración de aire enriquecido al 20% de CO_2 , B1, B2 y B3 son el número de repeticiones de la misma concentración de aire enriquecido, R1, R2 y R3 réplicas de la misma repetición, MF Masa del filtro después del secado, MF+M Masa de filtro más Muestra (biomasa) después del secado, medido en las unidades experimentales.

Tabla A3.3

Cuadro de registro de suministro de CO₂

DÍA	C1					C2				
	Hora Inicio	Hora Fin	Q CO ₂ (LPM)	Q Aire (LPM)	Presión Cam. Mezcla (BAR)	Hora Inicio	Hora Fin	Q CO ₂ (LPM)	Q Aire (LPM)	Presión Cam. Mezcla (BAR)
D0	8:03	8:18	0.23	4.28	0.50	8:23	8:38	0.90	3.60	0.70
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.50	12:50	13:05	0.90	3.60	0.70
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.48	17:50	18:05	0.90	3.60	0.65
D1	8:00	8:15	0.23	4.28	0.50	8:20	8:35	0.90	3.60	0.70
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.50	12:50	13:05	0.90	3.60	0.65
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.70
D2	8:05	8:20	0.23	4.28	0.48	8:25	8:40	0.90	3.60	0.65
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.50	12:50	13:05	0.90	3.60	0.65
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.70
D3	8:05	8:20	0.23	4.28	0.50	8:25	8:40	0.90	3.60	0.70
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.50	12:50	13:05	0.90	3.60	0.70
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.70
D4	8:01	8:16	0.23	4.28	0.48	8:21	8:36	0.90	3.60	0.65
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.48	12:50	13:05	0.90	3.60	0.65
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.70
D5	8:10	8:25	0.23	4.28	0.50	8:30	8:45	0.90	3.60	0.70
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.48	12:50	13:05	0.90	3.60	0.70
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.65
D6	8:02	8:17	0.23	4.28	0.50	8:22	8:37	0.90	3.60	0.70
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.50	12:50	13:05	0.90	3.60	0.70
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.70

DÍA	C1					C2				
	Hora Inicio	Hora Fin	Q CO ₂ (LPM)	Q Aire (LPM)	Presión Cam. Mezcla (BAR)	Hora Inicio	Hora Fin	Q CO ₂ (LPM)	Q Aire (LPM)	Presión Cam. Mezcla (BAR)
D7	7:58	8:13	0.23	4.28	0.50	8:18	8:33	0.90	3.60	0.70
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.50	12:50	13:05	0.90	3.60	0.70
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.70
D8	8:08	8:23	0.23	4.28	0.50	8:28	8:43	0.90	3.60	0.70
	12:30	12:45	0.23	4.28	0.50	12:50	13:05	0.90	3.60	0.65
	17:30	17:45	0.23	4.28	0.50	17:50	18:05	0.90	3.60	0.65

Nota. C1 Concentración de aire enriquecido al 5% de CO₂, C2 Concentración de aire enriquecido al 20% de CO₂, Q caudal de gas, medidos en la cámara de mezcla.

Tabla A3.4

Registro de pH y Oxígeno Disuelto

FBR	D0		D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8	
	pH	OD																
CBB1	7.40	5.95	7.41	5.35	7.38	5.34	7.35	5.33	7.30	5.35	7.25	5.38	7.22	5.35	7.19	5.32	7.08	5.44
	7.40	5.35	7.38	5.28	7.37	5.42	7.35	5.34	7.28	5.32	7.22	5.29	7.19	5.30	7.17	5.28	7.07	5.45
	7.40	5.31	7.35	5.29	7.34	5.38	7.32	5.30	7.31	5.43	7.24	5.28	7.15	5.35	7.18	5.45	7.05	5.40
CBB2	7.41	5.33	7.42	5.28	7.38	5.30	7.36	5.27	7.29	5.41	7.26	5.37	7.21	5.43	7.20	5.31	7.07	5.42
	7.40	5.41	7.37	5.30	7.36	5.43	7.34	5.44	7.29	5.43	7.21	5.41	7.20	5.29	7.16	5.40	7.08	5.39
	7.42	5.43	7.35	5.42	7.33	5.33	7.33	5.35	7.30	5.34	7.25	5.36	7.14	5.33	7.19	5.35	7.04	5.39
C1B1	7.38	5.37	7.42	5.32	7.38	5.32	7.36	5.30	7.30	5.38	7.26	5.38	7.22	5.39	7.20	5.32	7.08	5.43
	7.41	5.42	7.38	5.29	7.37	5.43	7.35	5.39	7.29	5.38	7.22	5.35	7.20	5.30	7.17	5.34	7.08	5.42
	7.41	5.45	7.35	5.36	7.34	5.36	7.33	5.33	7.31	5.39	7.25	5.32	7.15	5.34	7.19	5.40	7.05	5.40

FBR	D0		D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8	
	pH	OD																
C1B2	7.43	5.45	7.40	5.45	6.75	5.45	6.70	5.36	6.55	5.40	6.57	5.38	6.42	5.37	6.25	5.39	6.22	5.46
	7.42	5.45	7.12	5.39	6.66	5.42	6.42	5.33	6.32	5.42	6.46	5.48	6.32	5.38	6.18	5.44	6.17	5.37
	7.42	5.32	6.91	5.50	6.39	5.35	6.31	5.39	6.28	5.39	6.35	5.33	6.25	5.33	6.12	5.43	6.12	5.49
C1B3	7.43	5.43	7.41	5.47	6.74	5.43	6.68	5.30	6.60	5.47	6.58	5.34	6.47	5.49	6.24	5.35	6.23	5.41
	7.43	5.39	7.13	5.44	6.63	5.43	6.37	5.48	6.35	5.33	6.43	5.40	6.37	5.36	6.17	5.46	6.18	5.41
	7.42	5.44	6.87	5.33	6.42	5.31	6.30	5.34	6.27	5.32	6.34	5.36	6.23	5.37	6.13	5.35	6.14	5.31
C2B1	7.40	5.39	7.40	5.35	6.71	5.31	6.74	5.50	6.57	5.40	6.57	5.46	6.43	5.50	6.24	5.42	6.21	5.50
	7.40	5.35	7.00	5.45	6.64	5.47	6.40	5.39	6.31	5.33	6.42	5.42	6.34	5.42	6.15	5.43	6.15	5.31
	7.40	5.45	6.87	5.40	6.39	5.41	6.29	5.44	6.25	5.43	6.34	5.35	6.22	5.40	6.12	5.34	6.12	5.35
C2B2	7.42	5.40	7.28	5.39	6.35	5.54	6.40	5.53	6.40	5.36	6.42	5.40	6.27	5.48	6.25	5.44	6.00	5.44
	7.41	5.38	7.05	5.50	6.26	5.41	6.25	5.36	6.31	5.41	6.28	5.48	6.12	5.47	6.17	5.56	5.87	5.47
	7.42	5.37	6.27	5.55	6.18	5.42	6.11	5.46	6.15	5.54	6.12	5.37	6.05	5.44	6.10	5.38	5.70	5.45
C2B3	7.43	5.48	7.38	5.51	5.87	5.38	6.80	5.55	6.41	5.43	6.43	5.37	6.28	5.52	6.26	5.42	6.01	5.57
	7.43	5.42	7.01	5.52	6.07	5.40	6.26	5.41	6.32	5.35	6.29	5.51	6.13	5.47	6.18	5.40	5.88	5.41
	7.43	5.50	6.89	5.52	6.30	5.40	6.12	5.54	6.16	5.55	6.13	5.51	6.06	5.39	6.11	5.50	5.71	5.51

Nota. pH: Potencial de hidrogeno sin unidades, OD: Oxígeno Disuelto en mg/L, CB Concentración de aire puro sin enriquecimiento de CO₂, C1 Concentración de aire enriquecido al 5% de CO₂, C2 Concentración de aire enriquecido al 20% de CO₂, B1, B2 y B3 son el número de repeticiones de la misma concentración de aire enriquecido, medidos en las unidades experimentales.

Tabla A3.5*Registro de Temperatura y Luz*

Día	Registro 1		Registro 2		Registro 3		Registro 4		Registro 5	
	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L
0	30.49	2512.06	30.19	2501.30	30.07	2491.69	30.27	2498.61	30.12	2492.92
1	29.31	2510.80	30.21	2499.53	29.74	2491.40	29.35	2499.33	30.01	2494.47
2	30.50	2502.73	30.48	2506.40	29.98	2504.13	29.90	2497.40	29.52	2502.40
3	29.12	2504.60	30.50	2500.93	30.57	2501.73	30.15	2502.07	30.34	2503.93
4	30.58	2499.53	29.94	2495.07	29.39	2495.93	29.50	2499.87	29.50	2491.60
5	29.15	2499.47	29.64	2500.80	30.50	2497.93	30.03	2507.80	30.18	2492.07
6	30.90	2504.47	30.50	2493.33	29.57	2495.07	29.57	2507.53	30.76	2503.67
7	29.83	2495.40	29.58	2505.67	30.22	2497.47	30.42	2498.67	30.50	2490.33
8	30.32	2497.13	30.30	2494.47	29.50	2506.13	30.07	2498.53	30.50	2496.47

Nota. T: Temperatura en °C, L: Irradiancia en Lux.

Anexo 4: Informe de ensayo de composición de carbono en la microalga *Chlorella vulgaris*



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



INFORME DE ENSAYOS LASAQ N°014-2019-DQ

SOLICITANTE : Renzo Carrasco Miñan
PRODUCTO DECLARADO : Microalga (*Chlorella vulgaris*)
NÚMERO DE MUESTRAS : 01
CANTIDAD RECIBIDA : 10 g
MARCA : sin marca
FORMA DE PRESENTACIÓN : En bolsa de plástico
MUESTREADO POR : Muestra proporcionada por el solicitante.
FECHA DE RECEPCIÓN : 17 de mayo del 2019
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 21 de mayo del 2019
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO/QUÍMICO

ENSAYO	RESULTADOS
1.- Humedad (%)	6.47
2.- Cenizas Totales (% MS)	25.1
3.- Carbono Orgánico Total (% MS)	43.4

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:

- 1.- BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.8.2
- 2.- ASTM American Society for testing and materials 1998 D 5142-90
- 3.- BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.1.3 (Por Cálculo)

Atentamente:


Mg. Sc. Diego Suarez Ramos
JEFE DEL LABORATORIO DE
ANÁLISIS QUÍMICO


Mg. Sc. Juan Carlos Palma
DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO
ACADÉMICO DE QUÍMICA

Anexo 5: Panel Fotográfico



Reproducción de microalgas previa a la experimentación



Microalga concentrada para el proceso de experimentación



Tratamiento del agua con cloro y posterior adición de tiosulfato previo a la dilución e inoculación a las unidades experimentales



Adición de nutriente foliar a las unidades de experimentación



Secado de microalga y microalga pulverizada para análisis en el laboratorio



Sistema de suministro de aire y CO₂ y equipo automatizado



Vista interior del sistema automatizado

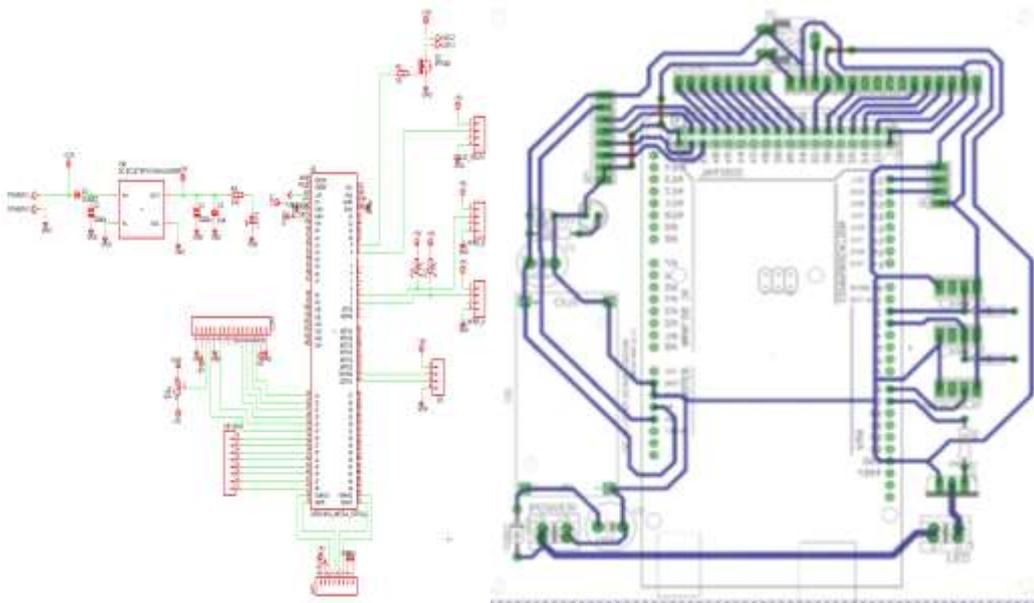
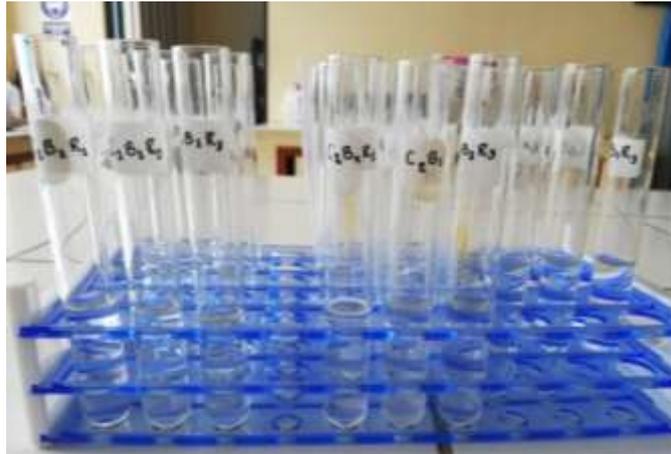


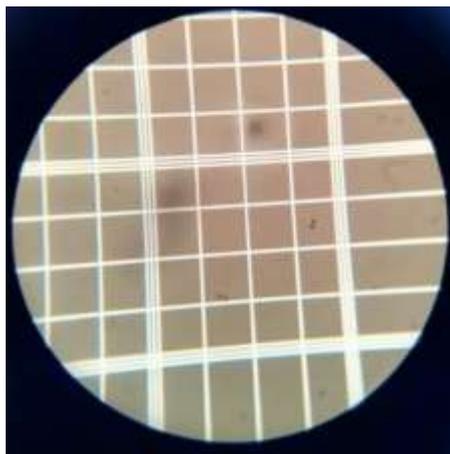
Diagrama de conexión y placa PCB para sistema automatizado con Arduino



Muestra diluida de microalga con Lugol para conteo celular



Conteo celular en microscopio



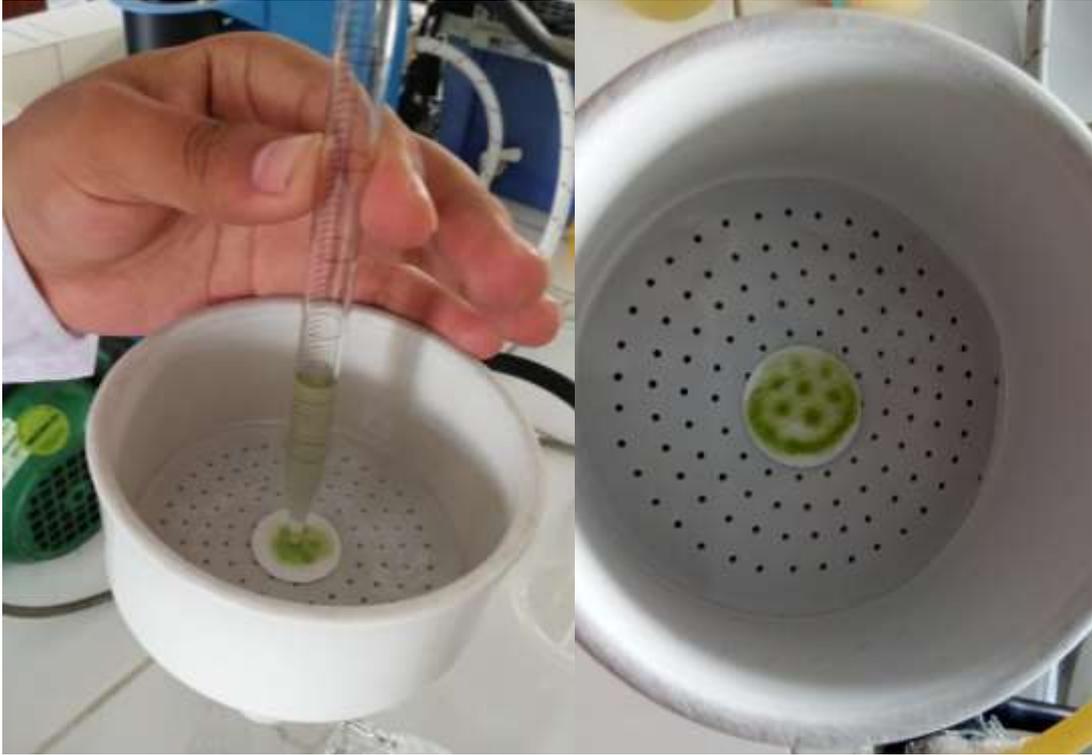
Vista microscópica de la microalga Chlorella vulgaris (40x) en la Cámara de Neubauer



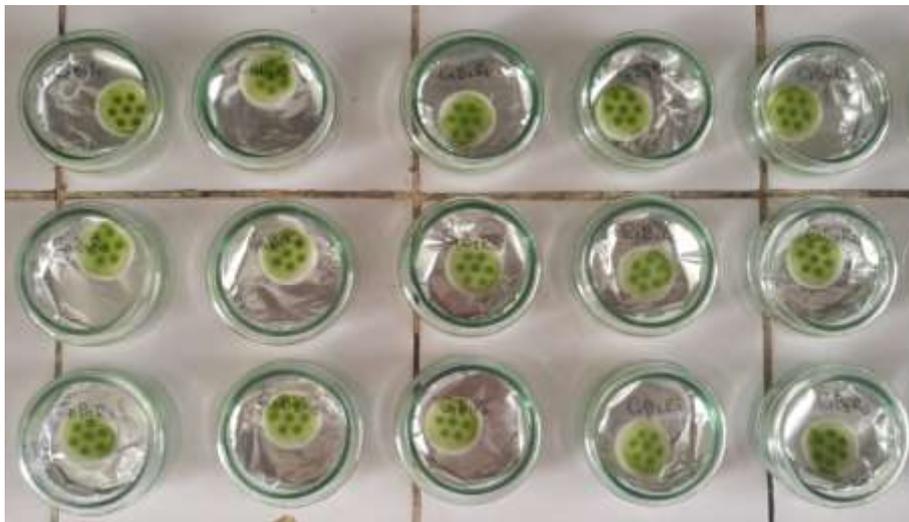
Cámara de Neubauer para conteo celular



Filtros listos para el proceso de filtración de la muestra



Proceso de filtración de la muestra microalgal



Muestras extraídas y filtradas previo al proceso de secado



Proceso de determinación de la masa de la microalga después del secado de 24h