

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15
			VERSIÓN	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	03/04/2017
			PÁGINA	1 de 92
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTORES:

NOMBRE(S) RENZO JOSÉ **APELLIDOS** PARADA SOLANO

FACULTAD: CIENCIAS BASICAS

PLAN DE ESTUDIOS: MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECTOR:

NOMBRE(S) ANDRÉS FERNANDO **APELLIDOS** BARAJAS SOLANO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): APLICACIÓN DE *Halochlorella rubescens* UFPS012 PARA LA CAPTURA DE CO₂ RESIDUAL DE LA PLANTA COQUIZADORA CT1 DE LA EMPRESA CI EXCOMIN S.A.S

RESUMEN. En este trabajo se ha demostrado que la microalga *Halochlorella rubescens* es capaz de tolerar altas concentraciones de CO₂, obteniendo una biomasa con más de un 60% proteína, 40% de carbohidratos y 15% de lípidos. Se determinó que para establecer las condiciones Óptimas la microalga *Halochlorella rubescens* se debe sembrar a 0,4 schf de CO₂ y 15,615 horas luz, maximizando la fijación de dióxido de carbono y dando el mayor rendimiento de productos.

PALABRAS CLAVES: microalgas, *Halochlorella rubescens*, emisión de gases de efecto invernadero, captura de CO₂, biomasa

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 65 **PLANOS:** **ILUSTRACIONES:** **CD ROOM:**

APLICACIÓN DE *Halochlorella rubescens*_UFPS012 PARA LA CAPTURA DE CO₂
RESIDUAL DE LA PLANTA COQUIZADORA CT1 DE LA EMPRESA CI EXCOMIN S.A.S

RENZO JOSÉ PARADA SOLANO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PLAN DE ESTUDIOS DE MAestrÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

APLICACIÓN DE *Halochlorella rubescens*_UFPS012 PARA LA CAPTURA DE CO₂
RESIDUAL DE LA PLANTA COQUIZADORA CT1 DE LA EMPRESA CI EXCOMIN SAS

RENZO JOSÉ PARADA SOLANO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Magister en Ciencias
Biológicas

Director

ANDRÉS FERNANDO BARAJAS SOLANO

PhD

Co-Director

NÉSTOR ANDRÉS URBINA SUAREZ

MSc

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PLAN DE ESTUDIOS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO

Fecha: 27 de junio de 2023
Hora: 4:00 pm
Lugar: Salón 203 posgrados

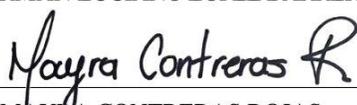
Título del Trabajo: “Aplicación de *Halochlorella rubescens*_UFPS012 para la captura de CO2 residual de la planta coquizadora CT1 de la empresa CI Excomin SAS”

Nombre del estudiante	Código	Calificación	
		Letra	Número
RENZO JOSE PARADA SOLANO	2400022	Cuatro Seis	4.6

Observaciones:

Jurados:

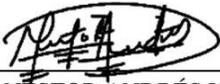

MSc. GERMAN LUCIANO LOPEZ BARRERA 4.6
Nota


PhD. MAYRA CONTRERAS ROJAS 4.6
Nota

DIRECTOR:


PhD. ANDRÉS FERNANDO BARAJAS SOLANO

CODIRECTOR:


MSc. NÉSTOR ANDRÉS URBINA SUAREZ


NESTOR FABIAN GALVIS SERRANO

Coordinador Maestría en Ciencias Biológicas

Tabla de contenido

	pág.
Resumen	10
Abstract	12
Introducción	13
1. Estado del arte	17
1.1 Biofijación de CO ₂	18
1.2 Microalgas que toleran el CO ₂	19
1.3 Medios de cultivo y producción de biomasa	21
1.4 Productos de valor agregado	24
1.5 Análisis de co-ocurrencia	25
1.6 Justificación	28
1.7 Objetivos	29
1.7.1 Objetivo general	29
1.7.2 Objetivos específicos.	29
2. Materiales y métodos	31
2.1 Población y muestra	31
2.1.1 Microorganismos	31
2.2 Fases de la investigación	31
2.2.1 Caracterización de biomasa	31
2.2.2 Efecto del ciclo de luz-oscuridad y concentración de CO ₂ en la producción de biomasa y captura de CO ₂	32
2.2.3 Comprobación del efecto del ciclo de luz-oscuridad y concentración de CO ₂ en la producción de biomasa y captura de CO ₂	33

2.2.4 Simulación y análisis técnico-económico de planta de captura de CO ₂	33
3. Resultados	34
3.1 Efecto del ciclo de luz-oscuridad y concentración de CO ₂ en la producción de biomasa y captura de CO ₂	34
3.1.1 Análisis ANOVA del diseño	35
3.2 Comprobación en la producción de biomasa y captura de CO ₂	39
3.3 Simulación y análisis técnico-económico de planta de captura de CO ₂	45
4. Conclusiones	51
Referencias	52
Anexos	64

Lista de tablas

	pág.
Tabla 1. Diseño de experimentos central compuesto	32
Tabla 2. ANOVA del diseño central compuesto	36
Tabla 3. Algunas cepas de microalgas estudiadas para la mitigación de CO ₂ ,	42
Tabla 4. Composición bioquímica de algunas microalgas estudiadas	45
Tabla 5. Carga y composición de los gases emitidos por las Chimeneas	47
Tabla 6. Operaciones unitarias utilizadas en la simulación	47
Tabla 7. Costo Total Directo de Planta (TPDC)	48
Tabla 8. Costo Indirecto Total de Planta (TPIC)	49
Tabla 9. Resumen Ejecutivo	50

Lista de figuras

	pág.
Figura 1. Número de documentos publicados. (a) por año, (b) por países hasta la fecha	27
Figura 2. Análisis de co-ocurrencia de la información recopilada	28
Figura 3. Cultivo de <i>Halochlorella rubescens</i> _UFPS0012 según el diseño. Inicio y final.	35
Figura 4. Solución matemática para la maximización de la biomasa	37
Figura 5. Superficies de respuesta en 2D para Desirability (A), y biomasa (g/L) (B).	38
Figura 6. PBR empleados para la comprobación	39
Figura 7. Cinética de producción de A: biomasa y B: metabolitos de la etapa comprobación	41
Figura 8. Producción de A: Biomasa, B: Carbohidratos, C: Lípidos, D: proteínas, y consumo de E: Nitratos y F: Fosfatos, de la etapa comprobación.	44
Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de captación de CO ₂ a partir de una planta coquizadora para la producción de la microalga <i>Halochlorella rubescens</i> obtenido en el simulador SuperPro Designer (vista horizontal).	46

Lista de anexos

	pág.
Anexo 1. Abreviaturas	65

Resumen

En los últimos años, el cambio climático se ha identificado como uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la humanidad, lo que ha llevado a las autoridades a actuar, como lo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente reduciendo la cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera. El proceso de coquización consiste en calentar carbón en ausencia de oxígeno para eliminar los componentes volátiles del carbón mineral, llegando a temperaturas de hasta 1300°C por 48 horas, generando un volumen aproximado de 400 m³/min, y según muestreos isocinéticos realizados, la carga de CO₂ es 4% y de N₂ con otros gases es del 86%. Aunque se han propuesto diferentes estrategias para reducirlo, ninguna solución única será suficiente para solucionarlo. Sin embargo, la implementación de un enfoque de captura biológica de carbono basado en microalgas facilita la mitigación de la huella de carbono. Las microalgas son capaces de duplicar rápidamente su biomasa celular, y lograr captar CO₂ 100 veces más rápido que las plantas terrestres. Esta investigación tiene como objetivo determinar la capacidad de la microalga *Halochlorella rubescens* para capturar CO₂ de la planta coquizadora CT1 en CI Excomin SAS, en un primer momento evaluar la concentración CO₂ y ciclo de luz:oscuridad, por otra parte, analizar la simulación de una planta de captura de CO₂ empleando el software SuperPro Designer. Según los resultados obtenidos, *Halochlorella rubescens* es capaz de tolerar niveles de hasta de 0,05 m³min⁻¹, sin embargo, para una producción óptima de biomasa lo ideal es utilizar 0.1 m³min⁻¹ de CO₂ con un ciclo de 15 horas luz. La simulación de la planta reveló que el sistema de filtración de los gases es rentable y puede generar múltiples alternativas para la reutilización y aprovechamiento de los residuos gaseosos generados en la planta coquizadora.

Palabras claves: *Captación de CO₂, reducción emisiones atmosféricas, microalga, Halochlorella rubescens.*

Abstract

In recent years, climate change has been identified as one of the major problems facing humanity, which has led authorities to act, such as reducing greenhouse gas emissions, particularly by reducing the amount of CO₂ released into the atmosphere. The coking process consists of heating coal in the absence of oxygen to eliminate the volatile components of the mineral coal, reaching temperatures of up to 1300°C for 48 hours, generating a volume of approximately 400 m³/min, and according to isokinetic sampling, the CO₂ load is 4% and N₂ with other gases is 86%. Although different strategies have been proposed to reduce it, no single solution will be sufficient to solve it. However, the implementation of a microalgae-based biological carbon sequestration approach facilitates carbon footprint mitigation. Microalgae can rapidly double their cell biomass and manage to capture CO₂ 100 times faster than terrestrial plants. This research aims to determine the ability of the microalgae *Halochlorella rubescens* to capture CO₂ from the coking plant CT1 at CI Excomin SAS, first to evaluate the CO₂ concentration and light:dark cycle, and secondly, to analyze the simulation of a CO₂ capture plant using SuperPro Designer software. According to the results obtained, *Halochlorella Rubescens* can tolerate levels of up to 0,05 m³min⁻¹, however, for optimal biomass production the ideal is to use 0.1 m³min⁻¹ of CO₂ with a cycle of 15 hours light. The simulation of the plant revealed that the gas filtration system is profitable and can generate multiple alternatives for the reuse and utilization of the gaseous waste generated in the coking plant.

Keywords: CO₂ capture, reduction of atmospheric emissions, microalgae, *Halochlorella Rubescens*.

Introducción

En los últimos años, las actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural), la deforestación y la generación de energía han provocado una intensa emisión de gases de efecto invernadero. (Cheah et al., 2015). La batalla contra el cambio climático catastrófico nunca ha sido más ardua, ya que el año 2020 concluyó como uno de los años más calurosos de la historia registrada. (NOAA., 2020). En comparación con diciembre de 2019, el CO₂ relacionado con la energía global, las emisiones fueron un 2% más altas en diciembre de 2020, ya que las economías luchan por recuperarse después de un año de contracción causada por COVID-19. (Global Energy Review., 2021). El aumento de la concentración de CO₂ atmosférico es el principal componente de las emisiones de gases de efecto invernadero, plantea grandes desafíos para el medio ambiente y la sostenibilidad en todo el mundo. (Zeng et al., 2011). Aunque se han propuesto diferentes estrategias para reducirlo, ninguna solución única será suficiente para solucionarlo. Sin embargo, la implementación de un enfoque de captura biológica de carbono basado en microalgas facilita la mitigación de la huella de carbono y la producción de bioenergía, lo que hace que el concepto sea un CO₂ sustituto neutro de los combustibles fósiles. (Choi et al., 2019). Curiosamente, la captura biológica y el secuestro de carbono mediante microalgas han sido reconocidos como uno de los métodos de secuestro de carbono más importantes y eficaces del mundo. (Moreira y Pires, 2016; Alami y col., 2021).

Las microalgas han sido de gran interés a nivel mundial durante mucho tiempo, ya que tienen numerosas ventajas sobre las plantas terrestres (Choi et al., 2019), comparado con la absorción química y el secuestro geológico de CO₂, la captura de CO₂ biológico mediante

microalgas se ha considerado un nuevo método prometedor para reducir el CO₂ emitido. (Wang et al., 2018a). Las microalgas son microorganismos fotosintéticos, las plantas básicas presentes en abundancia en la naturaleza, son capaces de duplicar muy rápidamente su biomasa celular, y lograrlo 100 veces más rápido que las plantas terrestres. (Lam et al., 2012). Estos microorganismos son capaces de convertir la energía solar en energía química activa mediante una reacción lumínica y convierten la energía química activa y el CO₂ en energía química estable de materia orgánica a través de una reacción oscura sin contaminación secundaria. (Vuppaladadiyam et al., 2018).

La captura de CO₂ mediado por microalgas está ganando terreno en todo el mundo debido a sus ventajas, como una mayor eficiencia fotosintética (10 a 50 veces) que las plantas terrestres (Cheah et al., 2015), ciclo de vida corto de las microalgas (4 a 10 días), fuerte adaptabilidad ambiental (Khan et al., 2018), posibilidad de utilizar agua de mar y aguas residuales para el cultivo y evitar la competencia con los cultivos. (Tongprawhan et al., 2014). Varios factores importantes influyen en el crecimiento de microalgas y la tasa de biofijación de CO₂ como la disponibilidad de macro y micronutrientes en los medios de cultivo, tanto en deficiencia como en exceso, también afecta fuertemente el mantenimiento biológico, el crecimiento y la eficiencia fotosintética. Por otra parte, también influyen los fotoperíodos, los tiempos de períodos claros / oscuros requeridos suelen oscilar entre 12/12 y 16/8 h, estos períodos de luz / oscuridad son importantes ya que el daño fotoinducido causado por la iluminación excesiva del flujo de fotones excesivo puede repararse durante el período de oscuridad. (Daneshvar et al., 2022).

A diferencia de los cultivos tradicionales, las microalgas están libres de problemas éticos en aplicaciones posteriores porque no necesitan sitios arables para el cultivo y no están envueltas en

debates sobre "alimentos contra combustible". Además, las microalgas pueden proliferar durante todo el año, por lo que pueden producir productos de destino durante todas las estaciones. Sobre todo, sus productividades son incomparables con otros cultivos fotosintéticos, lo que los convierte en el candidato más prometedor para la captación y utilización de carbono biológico. (Choi et al., 2019). La propiedad altamente productiva de las microalgas no solo garantiza una producción rápida de los productos de destino, sino que también implica una mayor capacidad de fijación de CO₂ porque la productividad está directamente relacionada con la capacidad de captación y utilización de Carbono (CCU) (Choi et al., 2019). Dentro del término 'captura y utilización de carbono', la palabra utilización se refiere al uso activo de biomasa de microalgas como precursor de una multitud de bioproductos basados en microalgas. (Daneshvar et al., 2022).

Las células de microalgas incorporan carbono capturado en una variedad de macromoléculas, metabolitos y otros compuestos bioquímicos; incluyendo lípidos, proteínas, polisacáridos, pigmentos, celulosa, ARN (ácido ribonucleico) y ADN (ácido desoxirribonucleico) (Peter et al., 2021). En consecuencia, la biomasa de microalgas se enriquece con compuestos de alto valor, que pueden actualizarse a una diversidad de productos de valor agregado (VAP). Por lo tanto, bio-CCU no es simplemente una estrategia de mitigación de CO₂, es un enfoque sincronizado para la recuperación climática y la creación de valor mediante la generación de VAP de microalgas vendibles. (Venkata Mohan et al., 2016).

Halochlorella sp. es un género de microalga flexible que tiene una gran capacidad de adaptación en la mayoría de condiciones de aguas residuales. Además, este microorganismo es una de las especies de microalgas capaz de tolerar altas concentraciones de CO₂ (Bhuyar et al.,

2019). El cultivo de microalgas en biorreactores ofrece una alternativa a las formas convencionales de tratamiento terciario de gases residuales y utiliza de forma espontánea compuestos orgánicos para generar biomasa de microalgas para la producción de metabolitos de valor agregado (Lam & Lee, 2011). El objetivo de este trabajo de investigación es determinar la capacidad de la microalga *Haloclorella rubescens*_UFPS0012 para capturar CO₂ de la planta coquizadora CT1 en C.I. Excomin S.A.S.

1. Estado del arte

El incesante aumento de la concentración de CO₂ ha contribuido en gran medida al calentamiento global, ya que el CO₂ retiene una vida útil atmosférica de 50 a 200 años. (Van den Hende et al., 2012). En la actualidad, el CO₂ está contribuyendo aproximadamente con el 52% del calentamiento global total. (Wilbanks & Fernandez, 2014). El dióxido de carbono se encuentra fácilmente disponible en la atmósfera en concentraciones de 0.03 - 0.06 % (v/v), otra fuente elevada de CO₂ se origina a partir de gas de combustión de costo cero, que puede dar entre el 6 y el 15% de CO₂ (Rahaman et al., 2011). Estas son las principales fuentes de CO₂ utilizado para el cultivo de microalgas, así como para el crecimiento continuo de microalgas y para la producción de sumideros de carbono. (Cheah et al., 2015).

El CO₂ se puede capturar de los gases de combustión mediante absorción química, fraccionamiento criogénico, separación por membranas y adsorción mediante tamices moleculares. (Herzog et al., 2000). De estos, la absorción química con disolventes de amina es el más utilizado, aunque las aminas son tóxicas y corrosivas, requiriendo 4 MJ kg⁻¹ CO₂ para ser regenerado. (Singh et al., 2003; Wilson et al., 2004). También se pueden utilizar procesos de absorción química basados en carbonato de potasio, pero su eficacia es menor que la de las aminas. (Cullinane y Rochelle, 2004).

La captura de carbono postcombustión mediada biológicamente eficaz es casi imposible de lograr sin un paso de almacenamiento intermedio debido a las altas temperaturas, los niveles de pH y las concentraciones de especies de carbono inorgánico. Incluso cuando el gas de

combustión se burbujea directamente en el medio líquido, el CO₂ tiene una baja solubilidad en agua y gran parte de ella todavía se pierde en la atmósfera. (Daneshvar et al., 2022).

1.1 Biofijación de CO₂

La fijación biológica de CO₂ es una tecnología ambientalmente sostenible a largo plazo, el CO₂ atmosférico y los gases de combustión se convierten en biomasa mediante autótrofos, mientras que la utilización de nutrientes y la producción de materia prima energética se logra de manera sostenida. (Kumar et al., 2010). Una de las formas más sostenibles desde el punto de vista medioambiental de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de energía es generar energía a partir de fuentes con emisiones reducidas de carbono, con el progreso de la investigación y el desarrollo de nuevas formas de energía, el biocombustible se considera un combustible de transporte alternativo eficaz y práctico que, en el futuro, puede desempeñar un papel importante en la reducción del CO₂ relacionado con el transporte, se pueden generar diferentes tipos de compuestos energéticos como el aceite, el etanol y el biohidrógeno a partir de plantas superiores, bacterias fotosintéticas y microalgas. (Zeng et al., 2011).

Aunque las microalgas pueden fijar CO₂ directamente de la atmósfera, su baja concentración de CO₂, además del bajo coeficiente de transferencia de masa entre el aire y el cultivo superficie, se muestra en los cultivos siendo principalmente limitado en carbono en este modo operativo, para evitar esta limitación y mejorar la productividad de los cultivos de microalgas, el dióxido de carbono debe suministrarse como CO₂ puro o mezclado con gases de combustión. (Acien-Fernandez et al., 2012). Sin embargo, el CO₂ se almacena bajo tierra en varios lugares del

mundo, su uso puede contribuir a mejorar el efecto del calentamiento global. Por tanto, se prefiere el uso de gases de combustión. Alternativamente, para inyectar directamente gases de combustión en cultivos de microalgas, también es necesario un diseño y funcionamiento adecuados de la unidad del sistema de cultivo de carbonatación; de lo contrario, casi todo el CO₂ sería liberado a la atmósfera.

La producción de biomasa es el indicador más significativo que se debe observar cuando se investiga el bio-secuestro de CO₂ por cultivo de microalgas. (Cheah et al., 2015). La selección de especies de microalgas adecuadas para el cultivo de microalgas determina el éxito en la bioconversión de CO₂ para la producción de biomasa, las especies de algas ideales deben tener una alta capacidad de hundimiento y una alta tolerancia a la concentración de CO₂, de contaminantes tóxicos, temperatura, limitación de nutrientes y efecto del pH.

1.2 Microalgas que toleran el CO₂

Una revisión preliminar sobre la tolerancia de las microalgas a los gases de combustión indicó que los altos niveles de CO₂ fueron tolerados por muchas especies de microalgas. (Matsumoto et al.1997). *Chlorococcum littorale*, un alga marina, mostró una tolerancia excepcional a altos niveles de CO₂ concentración de hasta el 40%. (Iwasaki et al., 1998; Murakami & Ikenouchi, 1997). Microalgas como *Scenedesmus obliquus* y *Chlorella kessleri*, aisladas de las lagunas de tratamiento de residuos de la central termoeléctrica de carbón, también expuesta presenta buena tolerancia a altos niveles de CO₂ (de Morais & Costa, 2007). *C. kessleri* mostró una productividad de biomasa de aproximadamente 0,087 g l⁻¹ por día cuando se cultiva con 6% (v / v) y 12% (v / v) de CO₂. Estas dos microalgas también crecieron bien cuando el

cultivo se complementó con una corriente de aire enriquecida que contenía hasta un 18% de CO₂, lo que indica su gran potencial para el CO₂ fijación de corrientes ricas en CO₂. También se informó (De Morais y Costa 2007) que *Scenedesmus obliquus* y *Spirulina sp.* mostraron buenas capacidades para fijar dióxido de carbono cuando se cultivaron a 30°C en un fotobiorreactor tubular en serie de tres etapas con temperatura controlada.

Para *Spirulina sp.*, la tasa máxima de crecimiento específico y la productividad máxima fueron 0.44 y 0.22 g l⁻¹ por día, con 6 y 12% dióxido de carbono, respectivamente, mientras que la concentración máxima de células fue de 3,50 g de células secas litro⁻¹ con ambas concentraciones de CO₂. Para *S. obliquus*, la tasa de crecimiento máxima y la productividad máxima correspondientes fueron 0.22 y 0.14 g l⁻¹ por día, respectivamente. Murakami y Ikenouchi (1997) seleccionaron más de diez cepas de microalgas con alta capacidad de fijación de CO₂ mediante un cribado exhaustivo. Dos cepas de algas verdes, *Chlorella sp. UK001* y *Chlorococcum littorale*, mostró alto tasas de fijación de CO₂ superiores a 1 g CO₂ l⁻¹ por día. *Botryococcus braunii SI-30*, que mostró la capacidad de producir un alto contenido de hidrocarburos, se recomendó como un candidato prometedor para la mitigación de CO₂ y producción de biocombustibles.

También se ha informado que *Chlorella sp.* respondió bien al 2% de CO₂ concentraciones. Sin embargo, el crecimiento de algas se inhibió al 10% de CO₂ y esto se agravó al 15% o más de CO₂ concentraciones. (Chiu et al., 2008; Ramos-Ibarra et al., 2019). Las microalgas también son propensas a exhibir una fase de retraso bajo niveles altos de CO₂ niveles (Varshney et al., 2018), y esta inhibición del crecimiento probablemente se deba al bajo pH causado por un mayor CO₂ niveles. (Tang et al., 2011). Sin embargo, las especies de microalgas existen en una amplia gama

de entornos y los rendimientos de tolerancia de CO₂ y producción de biomasa varían en función de la especie. Algunas cepas de microalgas que están aisladas de arroyos naturales, lagos u océanos, exhiben una alta tolerancia al CO₂. Basu et al. (2013) aislaron la microalga *S. obliquus SAI* de agua dulce termotolerante a altas temperatura y niveles de CO₂. El rendimiento máximo de biomasa ($4.975 \pm 0.003 \text{ g l}^{-1}$) y se obtuvieron bajo $13.8 \pm 1.5\%$ CO₂, y la tolerancia al CO₂ concentración de *S. obliquus SAI* fue tan alto como 35% CO₂ (Basu et al., 2014). Sin embargo, el ciclo de crecimiento de *S. obliquus SAI* fue de más de 37 días, lo que ilustra la baja actividad biocatalítica de las enzimas intracelulares en altas concentraciones de CO₂ resultando en dificultades en la conversión de carbono. Además, las concentraciones para el crecimiento de CO₂ óptimo de microalgas son generalmente más bajas que su nivel de CO₂ máximo tolerable. (Watanabe & Fujii, 2016). Hay un número limitado de cepas de microalgas que pueden crecer de manera óptima con > 15% de CO₂, en el microorganismo *Micractinium sp* se encontró que las cepas crecían mejor con alrededor del 30% de CO₂, y fueron capaces de crecer incluso al 80% de CO₂. (China y Fujii, 2018). Sin embargo, la dosis de la tasa de crecimiento no siempre se correlaciona con la capacidad de secuestro de carbono requerida para reducir las emisiones de dióxido de carbono de los gases de combustión.

1.3 Medios de cultivo y producción de biomasa

La fotosíntesis es una forma natural de reciclar el CO₂. Anualmente, 500 mil millones de toneladas de CO₂ está biológicamente mitigado por la vegetación terrestre en todo el mundo, sin embargo, esta fijación se considera inadecuada. (Xie et al., 2014). Las microalgas tienen mayor capacidad de fijación que las plantas terrestres, por bio-secuestro de CO₂ atmosférico y de los gases de combustión a compuestos orgánicos. La asimilación de CO₂ depende en gran medida de

los cinco factores principales, a saber (i) las características de la cepa de microalgas; (ii) concentración de CO₂; (iii) diseño del sistema de cultivo y fotobiorreactor; (iv) condiciones de operación; (v) factores ambientales. (Ho et al., 2014; Razzak et al., 2013).

La reacción de fotosíntesis se clasifica en etapa dependiente de la luz e independiente de la luz. La dependiente de la luz es la primera etapa en la que las microalgas capturan y almacenan energía de la luz solar, convirtiendo ADP y NADP⁺ en moléculas portadoras de energía ATP y NADPH. En la segunda etapa de la fotosíntesis, que es la reacción independiente de la luz, las microalgas capturan CO₂ produciendo compuestos orgánicos por el ciclo de Calvin-Benson, con las moléculas de ATP y NADPH generadas previamente. (Zhao & Su, 2014).

El cultivo de fotobiorreactor cerrado se ha estudiado ampliamente debido a la facilidad de regular los parámetros de crecimiento de microalgas. (Cheah et al., 2015). Las concentraciones de CO₂ generalmente se suministran para evaluar el comportamiento de las microalgas en la determinación de la eficiencia de secuestro de CO₂. Algunas especies de microalgas requieren altos niveles de CO₂ en el medio, lo que indica su capacidad para bioconvertir altas concentraciones de CO₂. El sistema de cultivo mixotrófico ha sido probado en especies de microalgas como *Chlorella* y *Botryococcus* la asimilación revelada de carbonos orgánicos, nutrientes y CO₂ simultáneamente, realizando respiración y fotosíntesis al mismo tiempo (Gupta et al., 2016; Leite et al., 2015). El medio de crecimiento debe proporcionar suficientes nutrientes para el crecimiento de microalgas, elementos como el carbono, nitrógeno, fósforo y azufre son los elementos más importantes que constituyen las células de microalgas. Otras sales inorgánicas esenciales incluyen hierro, magnesio, oligoelementos y, en algunos casos, silicio. (Reboloso-Fuentes et al., 2001). Es importante desarrollar un medio equilibrado para un óptimo cultivo de

microalgas y fijación del CO₂ (Wang et al., 2008; Mandalam & Palsson, 1998). Para la acumulación de diferentes productos por microalgas, se requieren diferentes formulaciones. Los lípidos son el componente más deseable del biodiésel; mientras que los productos para el cuidado de la salud de alto valor se basan principalmente en proteínas y algunas formas de ácidos grasos. Las células con mayor contenido de lípidos y menos carbohidratos y proteínas tienen valores caloríficos elevados y producen mayores rendimientos de aceite cuando se procesan mediante licuefacción de biomasa. (Illman et al., 2000).

Se ha observado que la limitación de nitrógeno da como resultado un aumento del contenido de lípidos en muchas cepas de *Chlorella*, como *Chlorella emersonii* (63%), *Chlorella minutissima* (56%), *Chlorella vulgaris* (57,9%), *Chlorella luteoviridis* (28,8%), *Chlorella capsulata* (11,4%), y *Chlorella pyrenoidosa* (29,2%) (Reitan et al., 1964). También se ha informado que los triglicéridos acumulados en *Nannochloris sp.* en condiciones de deficiencia de nitrógeno podría ser 2,2 veces mayor que en cultivos con suficiente nitrógeno. (Kawata et al., 1998).

Aparte de las características típicas de las especies de microalgas, la producción de biomasa de microalgas se ve muy afectada por las condiciones del cultivo. Se informó que *Chlorella sp* podía crecer en un 40% (v / v) de CO₂, a pH 5.5–6.0, 30°C (Chen et al., 2014; Rahaman et al., 2011). En cambio, Lam & Lee (2012) declaró que *Chlorella sp.* sólo podría crecer en menos del 2% (v / v) de CO₂; mayor aumento de CO₂ inhibirá su crecimiento. Estos han demostrado que, aunque la misma especie de microalgas puede tener una fuerte adaptación para tolerar, las condiciones de crecimiento determinan la eficiencia en CO₂ bioconversión para la producción de biomasa, cuando solo se considera el contenido de carbono, *Botryococcus braunii* y

Haematococcus pluvialis parecen ser excelentes candidatos a plataformas biológicas para el CO₂ fijación debido a su extraordinario contenido de carbono. La comparación del contenido de carbono entre diferentes clases de microalgas se ha informado en varios estudios. De acuerdo Abomohra et al. (2013), las microalgas verdes poseen un mayor contenido de carbono que las microalgas marrones. Mientras tanto, las diatomeas (a excepción de *Phaeodactylum tricornutum*) generalmente muestran un contenido de carbono más bajo que otros grupos de microalgas debido al tamaño vacuolar variable y la presencia de frústulas silicificadas en lugar de la pared celular a base de carbono. (Chauton et al., 2013). Se informa que la dimensión celular de la microalga también puede afectar su contenido de carbono (Riebesell et al., 2000), lo que implica que la selección de especies de microalgas con un tamaño celular grande puede ser ventajoso para la fijación de CO₂.

1.4 Productos de valor agregado

Los aminoácidos, péptidos y proteínas son otros componentes valiosos de la biomasa de microalgas; son valiosos como suplementos alimenticios y para piensos. Las especies *Spirulina maxima*, *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, y *Scenedesmus obliquus*, con altos contenidos de proteínas de 60 a 71%, 46 a 63%, 51 a 58%, 50 a 56%, respectivamente, se han utilizado para producir suplementos de fitonutrientes y proteínas de calidad humana a escala industrial durante décadas (Becker, 2007; Gonzalez et al., 2020). Los compuestos bioactivos derivados de proteínas, como los péptidos, también se pueden extraer de la biomasa de microalgas. Se trata de aminoácidos proteínogénicos de cadena corta con múltiples aplicaciones en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria. Recientemente, Montalvo et al. (2019) informó

propiedades antioxidantes, quelantes, antimicrobianos, antiinflamatorios y anticolagenasa (previene la degradación del colágeno) de tres péptidos extraídos de *Arthrospira maxima* OF15.

Los bajos costos de producción, la seguridad, la citotoxicidad mínima, un amplio espectro antimicrobiano y la aceptabilidad son ventajas notables de los polisacáridos sulfatados. Otro tipo de compuestos con valor comercial extraídos de la biomasa de microalgas son los pigmentos, con tres clases principales; clorofilasa, B, C, y D), carotenoides (α -caroteno y β -caroteno) y ficobilinas. (Daneshvar et al., 2022). Además de estas clases principales, también se han extraído luteol, fucoxantol, peridinina, ficoeritrinas y ficocianinas de algunas especies de microalgas rojas, diatomeas y cianobacterias. (Yen et al., 2013). Los pigmentos de microalgas se han utilizado como agentes antioxidantes / antiinflamatorios, activadores inmunitarios y precursores de vitaminas durante décadas. A menudo denominados colectivamente "fitonutrientes", los pigmentos de microalgas se utilizan ampliamente como complementos alimenticios y para piensos, colorantes alimentarios y aditivos en productos farmacéuticos y cosméticos. (Levasseur et al., 2020)

1.5 Análisis de co-ocurrencia

De acuerdo con una búsqueda sectorizada para los últimos 22 años (incluyendo 2022) empleando las palabras claves “alga, CO₂, fixation, capture, absorption” en la base de datos SCOPUS, se encontraron 1134 documentos (825 artículos, 151 reviews, 108 conference papers, 36 capítulos de libros y otros) que abordan la temática de esta propuesta de maestría. Uno de los datos que más resalta es el aumento exponencial en la cantidad de documentos desde el 2008 hasta la fecha. Otro dato importante de resaltar es que el principal país donde se ha estudiado este

tema es India, con más de 22 documentos publicados hasta la fecha; seguido de China (255), seguido por Estados Unidos (211), India (107) y otros países. De igual forma, investigadores con afiliación a instituciones colombianas han publicado hasta la fecha 9 documentos.

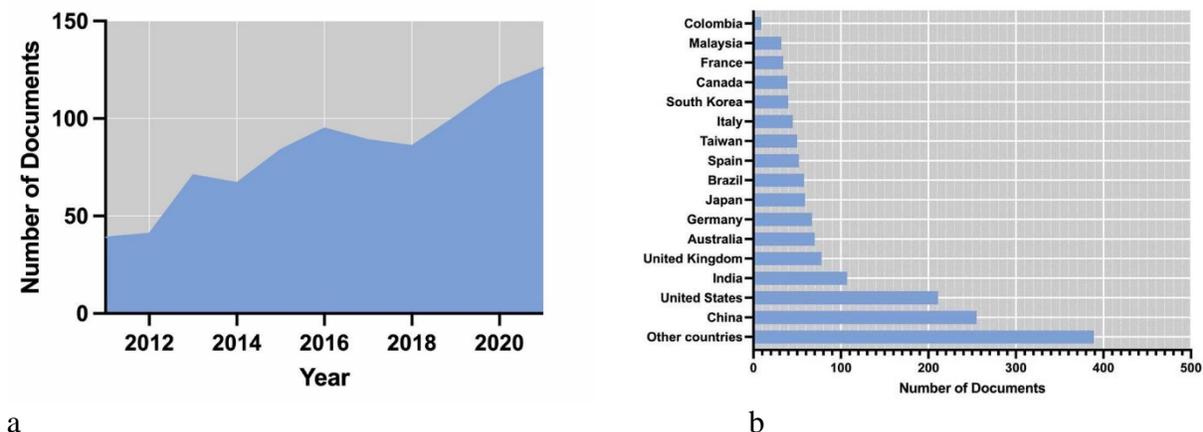


Figura 1. Número de documentos publicados. (a) por año, (b) por países hasta la fecha

La información recopilada en la sección anterior permitió identificar la co-ocurrencia de las principales palabras claves mediante el software VOSViewer. (Van Eck & Waltman, 2010), donde se identificó que las palabras claves “carbon dioxide, microorganism, metabolism carbon dioxide fixing y bioproducts”, son los nodos centrales del análisis (figura 2). Se pueden distinguir 7 clusters separados por colores. Los principales clusters hacen referencia a las condiciones físicas para la captura de CO₂ (rojo y naranja), mientras que los otros agrupan las palabras claves para las condiciones metabólicas (verde), metabolitos de valor agregado (amarillo y purpura) y su impacto ambiental (azul y celeste).

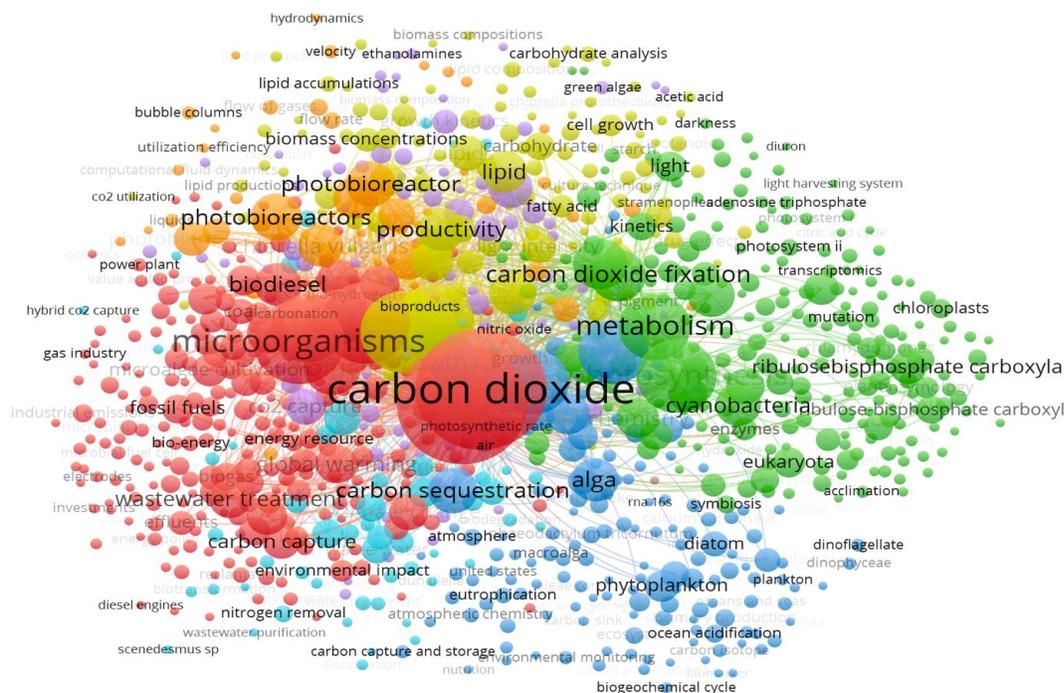


Figura 2. Análisis de co-ocurrencia de la información recopilada

1.6 Justificación

El incesante aumento de la concentración de CO₂ ha contribuido en gran medida al calentamiento global, ya que el CO₂ retiene una vida útil atmosférica de 50 a 200 años (Van Den Hende et al., 2012). En la actualidad, el CO₂ está contribuyendo aproximadamente con el 52% del calentamiento global total. (Wilbanks & Fernandez, 2014). El dióxido de carbono se encuentra fácilmente disponible en la atmósfera en concentraciones de 0.03 - 0.06 % (v/v), otra fuente elevada de CO₂ se origina a partir de gas de combustión de costo cero, que puede dar entre el 6 y el 15% de CO₂. (Rahaman et al., 2011). Estas son las principales fuentes de CO₂ utilizado para el cultivo de microalgas, así como para el crecimiento continuo de microalgas y para la producción de sumideros de carbono. (Cheah et al., 2015).

La captura de carbono postcombustión mediada biológicamente eficaz es casi imposible de lograr sin un paso de almacenamiento intermedio debido a las altas temperaturas, los niveles de pH y las concentraciones de especies de carbono inorgánico, incluso cuando el gas de combustión se burbujea directamente en el medio líquido, el CO₂ tiene una baja solubilidad en agua y gran parte de ella todavía se pierde en la atmósfera. (Daneshvar et al., 2022). Por esta razón, existe la necesidad de estudiar los niveles que CO₂ que la microalga UFPS012 es capaz de tolerar, así mismo, conocer las condiciones del cultivo y ciclo de luz:oscuridad, por otra parte, para la empresa CT1 Excomin SAS, es importante conocer los costos de una planta captadora de CO₂ y así poder llevar a cabo el proyecto en la empresa, no solo se estaría mitigando el dióxido de carbono emitido sino también generando productos de alto valor agregado de las microalgas

1.7 Objetivos

1.7.1 *Objetivo general*

Determinar la capacidad de *Halochlorella rubescens*_UFPS012 para capturar CO₂ de la planta coquizadora CT1 en CI Excomin SAS

1.7.2 *Objetivos específicos.*

- Evaluar el efecto de la concentración de CO₂ en la producción de biomasa de *Halochlorella rubescens*_UFPS012

- Determinar el efecto del ciclo de luz:oscuridad en la captura de CO₂ por *Halochlorella rubescens*_UFPS012

- Simular el análisis del impacto técnico-económico de una planta de captura de CO₂ empleando *Halochlorella rubescens*_UFPS012

2. Materiales y métodos

2.1 Población y muestra

2.1.1 *Microorganismos*

Se empleará la cepa termotolerante *Halochlorella rubescens*_UFPS0012 con capacidad de resistir altas concentraciones de CO₂. La cepa fue aislada previamente de termales localizados en el departamento de Norte de Santander, y mantenidas en el laboratorio INNOValgae de la Universidad Francisco de Paula Santander. Las cepas se mantendrán en medio Bold basal sólido a 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una temperatura de 27°C. Para su conservación una vez cada 35 días las cepas fueron reinoculadas en tubos de 10 mL con 4 mL de medio Bold basal sólido fresco.

2.2 Fases de la investigación

2.2.1 *Caracterización de biomasa*

Una vez cada 5 días durante 20 días se tomarán muestras de 50 mL (por triplicado) para la cuantificación por triplicado de carbohidratos (García-Martínez et al 2016), proteínas (Mota et al, 2018), lípidos (Mishra et al, 2014) y biomasa total. Las muestras se pasan por filtros GF-C de 45 mm de diámetro, secadas en deshidratador a 40°C durante 24 horas. El medio libre de células se empleará para cuantificar la concentración de NO₃ (HI 93728-01, HANNA), y PO₄ (HI 93713-01, HANNA).

2.2.2 Efecto del ciclo de luz-oscuridad y concentración de CO₂ en la producción de biomasa y captura de CO₂

Para determinar el efecto del ciclo de luz-oscuridad y concentración de CO₂ en la producción de biomasa y captura de CO₂ se empleará un diseño tipo Diseño Central Compuesto (CCD) acoplado a superficie de respuesta empleando el software Design Expert (V 22.02, StatEase, MN). El diseño está compuesto por 14 experimentos (Run) divididos en 2 bloques (6 puntos centrales y 8 puntos no centrales) (Tabla 1.). Para realizar cada uno de los experimentos se empleará la biomasa de un reactor de 9000 mL con un volumen de trabajo de 7000 mL. El medio se agitará mediante la inyección de aire a un flujo de aproximadamente 180 mL_{aire}/min y la concentración de CO₂ asignada por experimento. Los resultados serán analizados mediante una ANOVA de acuerdo con los parámetros del software

Tabla 1. Diseño de experimentos central compuesto

St d	Block	Run	Factor 1 A: CO ₂ (m ³ min ⁻¹)	Factor 2 B: light (h)
4		1	1.3	20
5		2	0.85	15
6		3	0.85	15
7	1	4	0.85	15
3		5	0.4	20
2		6	1.3	10
1		7	0.4	10
10		8	0.85	7.928
8		9	0.213604	15
14	2	10	0.85	15
12		11	0.85	15
11		12	0.85	22.711

9	13	14.864	15
13	14	0.85	15

Std: índice utilizado para formar diseños **Blocks:** Bloques: número de piezas en las que dividir el diseño **Run:** orden de ejecución experimental

2.2.3 Comprobación del efecto del ciclo de luz-oscuridad y concentración de CO₂ en la producción de biomasa y captura de CO₂

Luego de realizar los análisis estadísticos de los resultados obtenidos en el diseño anterior (CCD), se procede a realizar la comprobación de los resultados, teniendo en cuentas las variables que afectan la producción de biomasa total y captura de CO₂. Para realizar cada uno de los experimentos se empleará la biomasa de 2 PBR de 30L con un volumen de trabajo de 25L. El medio se agitará mediante la inyección de aire a un flujo de aproximadamente 180 mL_{aire}/min y 0,1 m³min⁻¹ de CO₂ y 15,615 horas luz.

2.2.4 Simulación y análisis técnico-económico de planta de captura de CO₂

A partir de los resultados de las etapas anteriores (producción de biomasa, consumo de nitrógeno, fosforo, fijación de carbono) se obtendrán las ecuaciones cinéticas que describan el proceso de fijación de CO₂ mediante el cultivo de *H. rubescens*. Estos resultados se emplearán para la simulación del proceso empleando el software SuperPro Designer® software v8.0. (Intelligen, Inc., Scotch Plains, NJ, USA). Como dimensiones del Sistema propuesto se empleará un volumen de 1000 m³ para el grupo de fotobiorreactores tipo open pond.

3. Resultados

3.1 Efecto del ciclo de luz-oscuridad y concentración de CO₂ en la producción de biomasa y captura de CO₂

El aire atmosférico contiene pequeñas cantidades de CO₂, el cual no es suficiente para el crecimiento de células de microalgas debido a las fuerzas impulsoras de transferencia de masa limitadas. Este problema se puede resolver tomando CO₂ de una fuente pura o usando CO₂ de los gases de combustión, solucionando al mismo tiempo el problema medioambiental con capturar CO₂. (Acien et al., 2012).

El dióxido de carbono en los gases de combustión está disponible a bajo costo o sin costo alguno. Según lo estimado por los criterios del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), la concentración del CO₂ de gases de combustión es de hasta el 15%. (Maeda et al. 1995). Por lo tanto, sería beneficioso que las microalgas fueran tolerantes a niveles elevados de CO₂ para la fijación de CO₂ de gases de combustión. (Maeda et al. 1995). En este caso, según estudios isocinéticos realizados a las chimeneas de la empresa Excomin S.A. (Tabla 5.) se han calculado concentraciones superiores al 4% de CO₂ en los gases de combustión, por este motivo, se ha estudiado la microalga UFPS012 para determinar si es capaz de tolerar altos niveles de CO₂.

Luego de cultivar la microalga *Halochlorella rubescens*_UFPS0012 bajo las condiciones de cultivo según el diseño (Tabla 1.) se obtuvo un crecimiento constante, claramente se pudo evidenciar que se adapta ya que la cepa soporta los niveles de CO₂ establecidos, en todos los PBR hubo producción significativa de biomasa y metabolitos (Figura 3).



Figura 3. Cultivo de *Halochlorella rubescens*_UFPS0012 según el diseño. Inicio y final.

3.1.1 Análisis ANOVA del diseño

Se realizó el análisis estadístico para determinar cuáles son las condiciones de cultivo óptimas. De acuerdo con la ANOVA (Tabla 2.), el “F-valor” de 7.5 para el modelo analizado muestra que es significativo estadísticamente, ya que existe solo un 0.99% de probabilidad que un valor tan grande se deba al ruido inherente (volumen de las muestras analizadas, error de las micropipetas, error por la balanza analítica y otros) de los experimentos. Por otro lado, los factores A, B y B2 son los que estadísticamente afectan la concentración de biomasa producida. Finalmente, el “F-valor del lack of fit” obtenido para este caso fue de 0.2, lo cual demuestra que no es significativo. Lo anterior es estadísticamente significativo porque demuestra que el modelo propuesto posee un buen ajuste en comparación con el ruido experimental.

De acuerdo con el análisis estadístico, la relación señal/ruido (Adeq Precision) obtenido es de 7.266, lo cual demuestra que la “señal” detectada por los diferentes experimentos es mayor que el posible “ruido” o error estadístico asociado a la toma de los diferentes datos experimentales. Lo anterior asegura un buen ajuste entre los datos. El ajuste de los estadísticos (R^2) permite identificar las posibles desviaciones inherentes a los experimentos debido al ruido.

Para este caso, el R2 obtenido es de 0.842; lo anterior se soporta en la diferencia entre el R2 ajustado (0.7303) y el R2 predicho (0.5550) el cual tiene una diferencia menor de 0.2.

Tabla 2. ANOVA del diseño central compuesto

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Block	0.1521	1	0.1521		
Model	2.67	5	0.5332	7.50	0.0099*
A-CO ₂	0.6957	1	0.6957	9.79	0.0167*
B-Luz	1.07	1	1.07	15.06	0.0060*
AB	0.3608	1	0.3608	5.07	0.0590
A ²	0.0321	1	0.0321	0.4514	0.5232
B ²	0.5233	1	0.5233	7.36	0.0301*
Residual	0.4977	7	0.0711		
Lack of Fit	0.0647	3	0.0216	0.1993	0.8919**
Pure Error	0.4330	4	0.1082		
Cor Total	3.32	13			
R²	0.8427	Adeq Precision	7.2659	C.V. %	22.93
Adjusted R²	0.7303	Std. Dev.	0.2666		
Predicted R²	0.5550	Mean	1.16		

Nota. *Significativo. **No significativo

A partir de los resultados fue posible obtener una ecuación cuadrática que describe el comportamiento de la producción de biomasa.

$$\begin{aligned}
 \text{biomasa} \left(\frac{g}{L}\right) = & +2.44257 + 2.10315 * CO_2 - 0.279145 * Luz - 0.133484 * (CO_2 * Luz) \\
 & + 0.325562 * (CO_2)^2 + 0.0110648 * Luz^2
 \end{aligned}$$

A partir de estos resultados se empleó el módulo de optimización del software Desing Expert en el cual se usó como respuesta la maximización en la concentración de biomasa, con lo cual el software ajusta las condiciones necesarias para maximizar la concentración de biomasa

obtenible. La figura 4 muestra los valores para las dos variables estudiadas, donde De acuerdo con los resultados las mejores condiciones son: 0.5 schf de CO₂ y 15.5 horas de luz, reemplazando estos valores en la ecuación cuadrática se obtiene 0,84 g/L de biomasa.

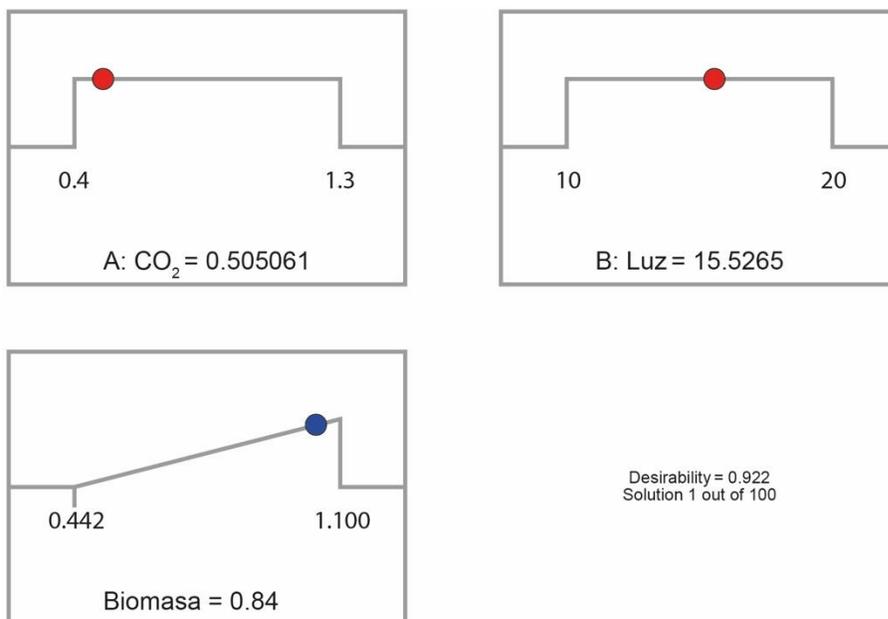


Figura 4. Solución matemática para la maximización de la biomasa

Una forma de visualizar como los resultados obtenidos experimentalmente se sitúan espacialmente son las gráficas de superficie de respuesta. Este tipo de gráficas son importantes porque permiten visualizar las posibles “zonas de optimización”, donde los resultados son mayores que el resto. De acuerdo con las superficies de respuesta obtenidas para los datos de concentración de biomasa, para obtener la mayor concentración de biomasa posible (figura 5b) el área de optimización se encuentra entre los 0,4-0,5 schf de CO₂, mientras que el ciclo de luz debe estar las 14-18 horas de luz, y las condiciones de 0.5 schf de CO₂ y 15.5 horas de luz poseen la mayor “deseabilidad” ó “ajuste” con un valor de 0.9222 (figura 5a), siendo 1.0 el valor máximo obtenible.

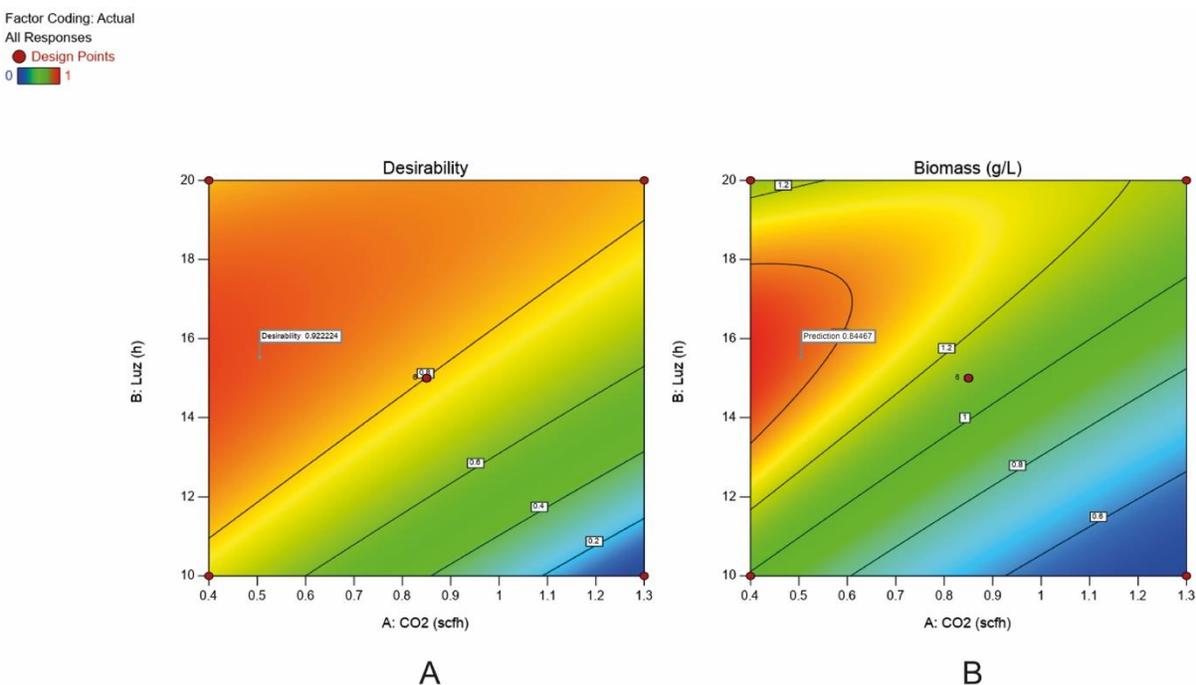


Figura 5. Superficies de respuesta en 2D para Desirability (A), y biomasa (g/L) (B).

Uno de los factores más determinantes para el óptimo crecimiento de una microalga es la disponibilidad de luz, la cual debe considerarse como un nutriente más ya que se convierte en biomasa. La cinética de crecimiento de las microalgas aumenta con la disponibilidad de luz hasta cierto punto crítico cuando ocurre la fotoinhibición, debido al daño en los fotosistemas de las microalgas y los pigmentos involucrados en la fotosíntesis (Pires et al., 2012). Los fotosistemas desactivados dentro de las microalgas requieren tiempo para recuperarse, por esta razón se introdujeron períodos alternos de luz y oscuridad (Abu-Ghosh et al., 2016). Por lo tanto, se requiere un ciclo de luz / oscuridad para lograr una alta productividad y reducir los efectos de daño fotográfico. Los periodos de luz utilizados en este diseño fueron 8, 10, 15, 20 y 22 horas, en todos se presentó buen crecimiento, sin embargo, con 15,615 horas luz, se obtuvo mayor rendimiento de biomasa y por ende más producción de metabolitos.

3.2 Comprobación en la producción de biomasa y captura de CO₂

Con las condiciones de operación obtenidas en la superficie de respuesta se realizó una comprobación empleando dos fotobiorreactores (PBR) (Synoxys algae, Francia) de 30L con 25L de trabajo con $0.11 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ de CO₂ y 15.6 horas de luz, $100 \text{ umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, medio Bold basal, a 27°C durante 20 días (figura 6).



Figura 6. PBR empleados para la comprobación

La cosecha de biomasa de microalgas se considera un paso costoso y problemático en la producción industrial de microalgas debido a la baja densidad celular que se puede lograr en los cultivos, que generalmente se encuentra en el rango de 0,3 a 0,5 g de peso de células secas por litro, los resultados obtenidos a nivel de laboratorio de la microalga UFPS012 fueron de 0,5g de peso de células secas por litro, en condiciones normales, sin burbujeo de CO₂, medio de cultivo sin suplementos y ciclo de luz:oscuridad 12:12. Sin embargo, después de la inoculación de los PBR de comprobación (Figura 7.), las microalgas crecieron a un ritmo constante, se puede ver

claramente la fase exponencial ya que se realizó una cinética de producción de biomasa y metabolitos, a medida que el microorganismo aumentaba su densidad celular, también iba en aumento la producción de carbohidratos, lípidos y proteínas. (Figura 4.), la microalga UFPS012 alcanzo niveles hasta de $0,8\text{g L}^{-1}$ de biomasa a final de la fase exponencial, por otra parte, los metabolitos producidos representan entre el 80 y 90% del peso total de las células, el incremento de los metabolitos fue constante. Todo esto demuestra que cuando el medio de cultivo es alimentado con baja concentración de CO_2 , *Halochlorella rubescens* produce mayor contenido de biomasa, mientras que en concentraciones más altas es capaz de crecer, pero su productividad se ve afectada.

Chiu et al., (2009) estudió el crecimiento de *Nannochloropsis oculata* en un cultivo semicontinuo, los resultados demostraron que cuando el aire con 2% (v/v) CO_2 alimenta al medio de cultivo, se estimula el crecimiento de células de microalgas. Sin embargo, si las concentraciones más altas de CO_2 se utilizan en el medio de cultivo (5-15% en v), esto tiene efectos negativos sobre el crecimiento celular. En cuanto a los medios de cultivo que contienen compuestos de fósforo, la adición de CO_2 disminuye el pH de los medios y esto provoca la sedimentación de compuestos de fósforo. (Zhu et al., 2013).

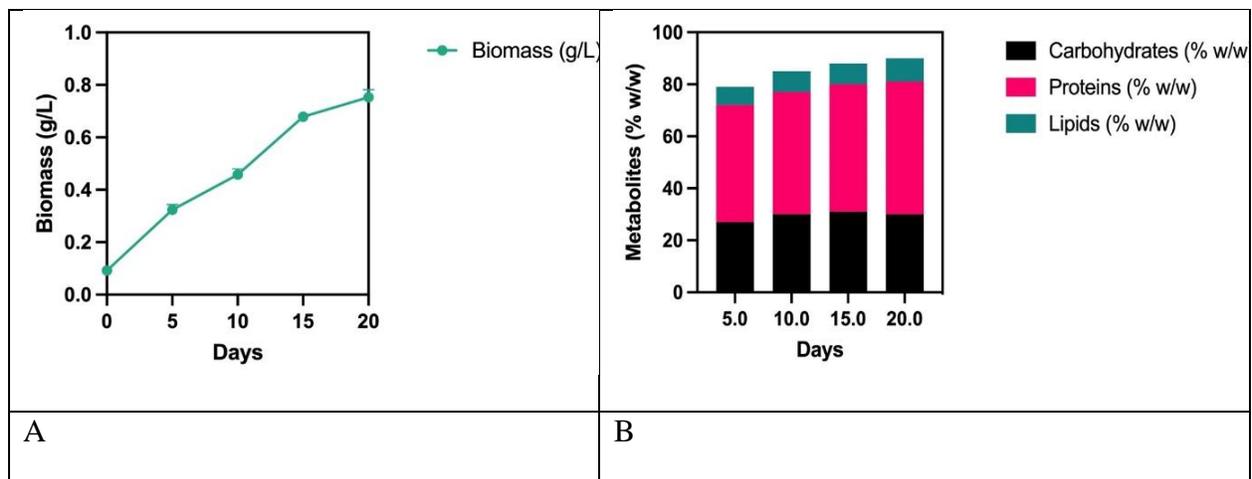


Figura 7. Cinética de producción de A: biomasa y B: metabolitos de la etapa comprobación

Los resultados obtenidos se comparan, en general, favorablemente con los de la literatura. La mayor tasa de producción bajo suplementación de CO₂ corresponde a *Scenedesmus obliquus*, con 1,8 g/L*d⁻¹. Para algunas especies de *Chlorella* se han comunicado tasas de producción de biomasa de hasta 0,8 g/L*d⁻¹. (Sankar et al., 2014). Sin embargo, se encontró para *Chlorella vulgaris* (Shabani et al., 2016) tasas similares a las obtenidas en este trabajo, aunque la concentración de CO₂ a la que estaba sometida es menor. Tang et al., (2011) investigó los efectos de diferentes concentraciones de CO₂ en dos especies: *Scenedesmus obliquus* y *Chlorella pyrenoidosa*, se observó que el rendimiento de biomasa aumenta con el CO₂ contenido en bajas concentraciones. Por otro lado, el rendimiento de biomasa comienza a disminuir a mayor concentración de CO₂. Por lo tanto, estos autores identificaron 5-10% de CO₂ como un rango de concentración óptimo para el crecimiento de microalgas.

Tabla 3. Algunas cepas de microalgas estudiadas para la mitigación de CO₂,

Microalga	CO ₂ (% v/v de entrada)	Temperatur a °C	Biomasa (g/L *d ⁻¹)	Referencia
<i>Acutodesmus obliquus</i>	14	26	0,153	Yun et al., 2016
<i>Chlorella vulgaris</i>	10	26	0,15	Shabani et al., 2016
<i>Chlorella</i> sp. <i>minutissima</i>	15	27	0,88	Sankar et al., 2014
<i>Chlorella vulgaris</i>	15	26	0,343	Kin-chung et al., 2013
<i>Scenedesmus obliquus</i>	10	26	0,55	Ho et al., 2010
<i>Scenedesmus obliquus</i>	7.5	30	1,8	Fulke et al., 2015
<i>Chlorella vulgaris</i>	3,8	23	0,44	Barajas et al., 2012
<i>Halochlorella</i> <i>rubescens.</i>	15	27	0,05	Este trabajo

Nota. Fuente Adaptado de Razzak et al., (2013).

Las diferentes fases de crecimiento durante el cultivo de microalgas dan como resultado diversas composiciones de las células. Durante la fase de crecimiento exponencial, hay mayor proporción de proteína y, por lo tanto, la recolección de microalgas durante esta fase da como resultado una biomasa que puede ser útil con fines nutricionales. La recolección tardía al final de la fase estacionaria da como resultado, debido a la deficiencia de nutrientes, un alto contenido de lípidos que es adecuado para la conversión en biodiésel. (Alaswad et al., 2015). Lowrey et al., (2014) informó un 31% de contenido de lípidos en *N. oculata* durante la fase de crecimiento exponencial y 40-50% al principio y al final de la fase estacionaria, respectivamente. Por lo tanto, seleccionar el momento de cosecha adecuado puede ser útil para lograr el producto deseado.

Durante los 20 días de cultivo de la microalga *Halochlorella rubescens*_UFPS012, se observa solo la fase exponencial de crecimiento, según la Figura 8. Hubo aumento exponencial de producción de biomasa y metabolitos como: Carbohidratos, proteínas y lípidos, mientras que los nitratos y fosfatos descendieron ya que el microorganismo los consumió, se sabe que el nitrógeno es el nutriente más importante para las microalgas (después del carbono) y se incorpora como nitrato (NO_3^-) o como amonio (NH_4^+) (Abdel-Raouf et al., 2012), es aprovechado por las microalgas para la composición de proteínas y nucleótidos, por este motivo con consumo de nitrógeno y la producción de proteínas son inversamente proporcional, así mismo, el fósforo es fundamental en muchos procesos celulares, tales como la formación de ácidos nucleicos y transferencia de energía. (Grobbelaar 2004). Aunque el contenido en fósforo de las microalgas es menor al 1%, su deficiencia en el medio de cultivo es una de las mayores limitaciones al crecimiento, el fósforo aparece en importantes intermedios metabólicos y en moléculas estructurales como los fosfolípidos. Algunas especies de microalgas tiene la capacidad de producir niveles altos de polímeros de reserva, *C. vulgaris*, particularmente, se ha considerado un organismo adecuado para su empleo en procesos de retirada de CO_2 asociados a la producción de lípidos (especialmente triacilgliceroles) y carbohidratos fermentables. (Doucha et al 2005).

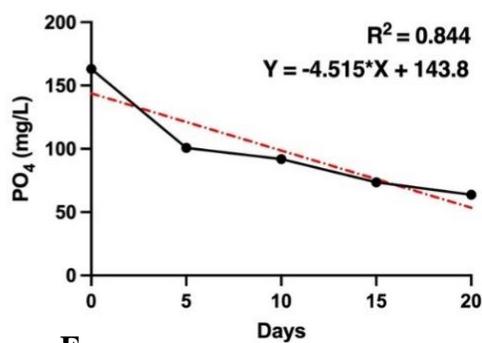
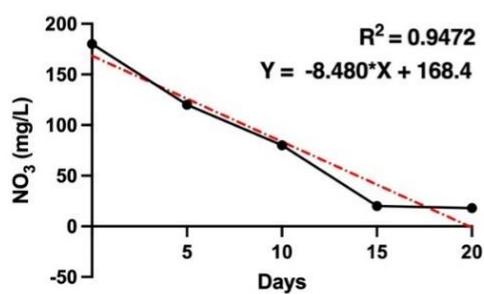
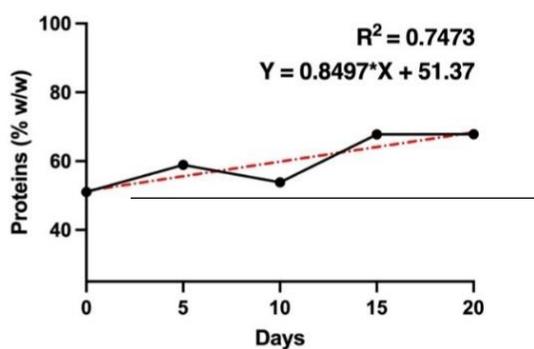
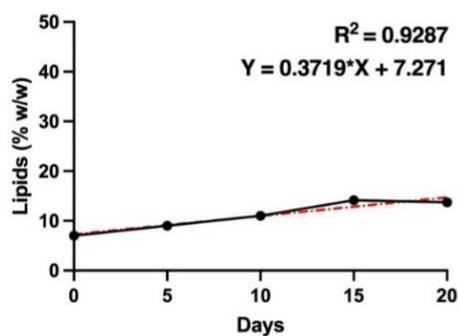
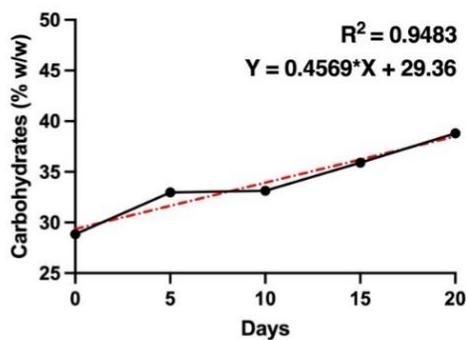
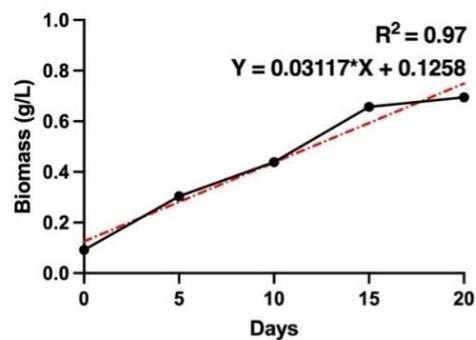


Figura 8. Producción de A: Biomasa, B: Carbohidratos, C: Lípidos, D: proteínas, y consumo de E: Nitratos y F: Fosfatos, de la etapa comprobación.

En la Tabla 4 se puede observar algunas microalgas estudiadas en cuanto a la composición bioquímica, en el caso de *Chlorella vulgaris* tiene una producción de biomasa de 6,6 g/L, eso es 7 veces más eficiente que *Halochlorella rubescens*. (UFPS012), pero la composición de metabolitos es menor que la *Halochlorella rubescens* (UFPS012) esta presenta una elevada tasa de fijación de CO₂, pero no una buena tasa crecimiento, sin embargo, presenta un alto porcentaje de metabolitos por porcentaje de biomasa.

Tabla 4. Composición bioquímica de algunas microalgas estudiadas

Cepa	Biomasa g/L	% Biomasa		
		Proteínas	Carbohidratos	Lípidos
<i>Chlorococcum sp.</i>	2,9	47,2	19,7	20,2
<i>Chlorella sp.</i>	2,6	48,5	23,8	17,7
<i>Chlorella vulgaris</i>	6,6	47,3	23	19,9
<i>Nostoc PCC 9202</i>	3,1	42,4	32,2	8,1
<i>Nostoc punctiforme</i>	3	45,8	29,9	13,6
<i>Scenedesmus vacuolatus</i>	8,3	44,6	20,3	28
<i>Halochlorella rubescens</i> (UFPS012)	0,88	68,7	40,2	15,2

Nota: Fuente: *García-Cubero (2012)*

3.3 Simulación y análisis técnico-económico de planta de captura de CO₂

El proceso de captación de CO₂ a partir de una planta coquizadora para la producción de la microalga *Halochlorella rubescens* fue simulado con el software SuperPro Designer® software v8.0. (Figura 9), para el cual se asumió que la planta trabajará con un 75% de la capacidad en la producción de biomasa, y en cuanto al flujo de CO₂ proveniente de la filtración, se usó un splitting para utilizar solo el 10% del flujo total de los gases.

de 20 metros de altura. La cámara de precipitación cuenta con una exclusiva por la cual se extrajeron los gases que entraron al proceso de filtración, en la tabla 6 se muestra las operaciones unitarias empleadas en la simulación

Tabla 5. Carga y composición de los gases emitidos por las Chimeneas

Fuente	Parámetro	Oxígeno (% v/v)	Dióxido de carbono (% v/v)	Nitrógeno y otros gases (% v/v)
CHIMENEA 1	MP, SO ₂ y HCT	13,45	4,17	82,39
	D&F	13,10	4,30	82,60
CHIMENEA 2	MP, SO ₂ y HCT	13,90	4,00	82,10
	D&F	14,00	3,90	82,10

Nota: MP (Material Particulado), SO₂ (Dióxido de Azufre), HCT (Hidrocarburos totales), D&F (Dioxinas y Furanos). Fuente: Propia, muestreo isocinético de la planta coquizadora ubicada en Norte de Santander.

Una planta coquizadora genera aproximadamente 400 m³/min de gases durante el proceso de destilación seca, siendo esto un volumen alto, se trabajó con un 10% del volumen para la producción de biomasa, con los gases restantes se puede trabajar otras operaciones unitarias para extraer otros gases de interés que se puedan reutilizar en nuevos proyectos y de tal forma se colaboraría con la reducción de carga contaminantes según lo establecido en la resolución 909 del 2008, donde se establece las normas y los estándares de emisión admisible de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas.

Tabla 6. Operaciones unitarias utilizadas en la simulación

EQUIPO	FUNCIÓN
Separador ciclónico (CY-101)	Separa partículas sólidas de los gases.
Divisor	Reparte el volumen de los gases
Cámara de filtros (BHF-101)	Filtra el polvo y las partículas finas de los gases
Flash	Evaporador simple para el cambio de fase

Columna de absorción	Separa de una o más componentes de una mezcla gaseosa
Condensador	Concentra el CO ₂

Para la simulación a gran escala de la microalga *Halochlorella rubescens* con el fin obtener biomasa que pueda ser empleada como fuente de carbono en otros procesos industriales, se lleva a cabo una serie de operaciones unitarias, las cuales incluyen la preparación del medio de cultivo, esterilización, tren de inoculación y crecimiento celular. La biomasa generada se llevará a una presentación granular sólida y para esto se propone llevar a cabo un proceso de centrifugación, secado y peletización.

El medio de cultivo utilizado para la simulación fue Bold Basal, y para el crecimiento de la microalga se realizó un escalado empleando fermentadores hasta llegar al volumen final (20, 200, 2000 y 20000 L) con inóculo del 10% de *Halochlorella rubescens*, tiempo de cultivo de 15 días y temperatura que oscila en los 30°C.

Cabe resaltar que la simulación del proceso de purificación de los gases generados de la coquización se puede llevar a cabo y puede ser la base para proyectos en pro de una economía circular, pues mediante operaciones unitarias se podría extraer materiales de interés como son el H₂S, Alquitrán, CO₂, entre otros, y ser empleados como materia prima en un futuro.

Tabla 7. Costo Total Directo de Planta (TPDC)

Elementos	USD
1. Costo de compra de equipo	5.604.000
2. Instalación	2.491.000
3. Tubería de proceso	1.962.000

Elementos	USD
4. Instrumentación	2.242.000
5. Aislamiento	168.000
6. Eléctrico	560.000
7. Edificaciones	2.522.000
8. Mejoramiento de Patio	841.000
9. Instalaciones Auxiliares	2.242.000
TOTAL	18.632.000

El análisis de costos se realizó empleando los reportes que genera el software, en donde se puede establecer que la mayor inversión en la planta está en la compra de equipos (Tabla 7), el costo total de la planta (TPDC) es de 18.6 millones de dólares. En cuanto a los costos indirectos (TPIC) se requiere de 11 millones de dólares para la construcción de la planta (Tabla 8).

Tabla 8. Costo Indirecto Total de Planta (TPIC)

Elementos	USD
Ingeniería	4.658.000
Construcción	6.521.000
TOTAL	11.179.000

Para finalizar, en la Tabla 9 se puede apreciar el resumen ejecutivo, donde se muestra todos los costos globales de la planta. En nuestro caso, lo importante de la investigación es el tratamiento de los gases para obtener CO₂, pero al vender la biomasa se puede obtener un ingreso de 17.681.600 dólares, con un rendimiento de producción de biomasa de 362.880 Kg/mes, adicional a los ingresos de producción también se obtienen bonificación por cada tonelada de carbono mitigada, en Colombia un bono de carbono equivale a 3.5 dólares, en la simulación de

la planta de captura de CO₂ se están mitigando 390.000 toneladas, cual serian un ingreso extra de 1.365.000 dólares/año.

Tabla 9. Resumen Ejecutivo

Capital total de inversión	37.758.000 \$
Costos operación	25.864.000 \$/yr
Ingresos	43.545.600 \$/yr
Costo unitario producción	5,9 \$/Kg MP
Ingresos unitario producción	4,1 \$/Kg MP
Margen bruto	0,94 %
Rendimiento de la inversión	46,83 %

4. Conclusiones

En la mayor parte de los trabajos dirigidos a analizar el uso de microalgas para mitigar la contaminación en gases de combustión no se hace alusión al destino final de la biomasa, es decir, a la productividad de sus componentes celulares. En este trabajo se ha demostrado que la microalga *Halochlorella rubescens* es capaz de tolerar altas concentraciones de CO₂, obteniendo una biomasa con más de un 60% proteína, 40% de carbohidratos y 15% de lípidos.

Aunque los estudios a escala de laboratorio han permitido establecer las condiciones Óptimas (0,5 m³min⁻¹ de CO₂ y 15,615 horas luz) para maximizar la fijación de dióxido de carbono y por ende el mayor rendimiento de productos, los estudios al exterior requieren un nuevo esfuerzo de optimización

La disponibilidad de nutrientes como C, N y P en el medio, y su consecuente efecto sobre el contenido en la biomasa, reflejado en la razón C/N/P, tiene una fuerte influencia sobre el nivel celular de proteínas, carbohidratos y lípidos. En condiciones de limitación nitrógeno o fosfato, se reduce el flujo del C recién fijado a proteínas y otras biomoléculas

Referencias

- Abdel-Raouf N, AA Al-Homaidan & IBM Ibraheem. 2012. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences* 19: 257-275.
- Abomohra, A. E. F., Wagner, M., El-Sheekh, M., & Hanelt, D. (2012). Lipid and total fatty acid productivity in photoautotrophic fresh water microalgae: screening studies towards biodiesel production. *Journal of Applied Phycology* 2012 25:4, 25(4), 931–936.
<https://doi.org/10.1007/S10811-012-9917-Y>
- Abu-Ghosh, S., Fixler, D., Dubinsky, Z., & Iluz, D. (2016). Flashing light in microalgae biotechnology. *Bioresource Technology*, 203, 357–363.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.12.057>
- Acien, F.G., González-López, C. v., Fernández Sevilla, J. M., & Molina Grima, E. (2012). Conversion of CO₂ into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO₂ removal? *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96(3), 577–586.
<https://doi.org/10.1007/S00253-012-4362-Z>
- Alami, A. H., Alasad, S., Ali, M., & Alshamsi, M. (2021). Investigating algae for CO₂ capture and accumulation and simultaneous production of biomass for biodiesel production. *Science of the Total Environment*, 759. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143529>
- Andersen, R., Berges, J., Harrison, P., & Watanabe, M. (2005). *Recipes for Freshwater and Seawater Media*. In Andersen, R. A. (Ed.). (2005). *Algal culturing techniques*. Elsevier.
- Barajas S, A., Godoy R, C., Monroy D, J., Barajas F, C., & Kafarov, V. (2012). Mejoramiento del secuestro de CO₂ por *Chlorella vulgaris* UTEX 1803 en fotobiorreactores a escala laboratorio. *Revista ION*, 25(2), 39–47.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120100X2012000200005&lng=en&nrm=iso&tlng=es

- Basu, S., Roy, A. S., Mohanty, K., & Ghoshal, A. K. (2014). CO₂ biofixation and carbonic anhydrase activity in *Scenedesmus obliquus* SA1 cultivated in large scale open system. *Bioresource Technology*, *164*, 323–330. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.05.017>
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, *25*(2), 207–210. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2006.11.002>
- Bhuyar, P., Sundararaju, S., Rahim, M. H. A., Ramaraj, R., Maniam, G. P., & Govindan, N. (2019). Microalgae cultivation using palm oil mill effluent as growth medium for lipid production with the effect of CO₂ supply and light intensity. *Biomass Conversion and Biorefinery* *2019 11:5*, *11*(5), 1555–1563. <https://doi.org/10.1007/S13399-019-00548-5>
- Chauton, M. S., Olsen, Y., & Vadstein, O. (2013). Biomass production from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*: Nutrient stress and chemical composition in exponential fed-batch cultures. *Biomass and Bioenergy*, *58*, 87–94. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2013.10.004>
- Cheah, W. Y., Show, P. L., Chang, J. S., Ling, T. C., & Juan, J. C. (2015). Biosequestration of atmospheric CO₂ and flue gas-containing CO₂ by microalgae. *Bioresource Technology*, *184*, 190–201. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.11.026>
- Chen, W. H., Huang, M. Y., Chang, J. S., & Chen, C. Y. (2014). Thermal decomposition dynamics and severity of microalgae residues in torrefaction. *Bioresource Technology*, *169*, 258–264. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.06.086>

- Cherubini, F., Jungmeier, G., Wellisch, M., Willke, T., Skiadas, I., van Ree, R., & de Jong, E. (2009). Toward a common classification approach for biorefinery systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(5), 534–546. <https://doi.org/10.1002/BBB.172>
- China, S., & Fujii, K. (2018). Isolation of high-CO₂-acclimated *Micractinium* sp. strains from eutrophic reservoir water. *Algal Research*, 34, 126–133. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2018.07.015>
- Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Chen, C. H., Kuan, T. C., Ong, S. C., & Lin, C. S. (2008). Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. *Bioresource Technology*, 99(9), 3389–3396. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.08.013>
- Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Tsai, M. T., Ong, S. C., Chen, C. H., & Lin, C. S. (2009). Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource Technology*, 100(2), 833–838. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.06.061>
- Choi, H. il, Hwang, S. W., & Sim, S. J. (2019). Comprehensive approach to improving life-cycle CO₂ reduction efficiency of microalgal biorefineries: A review. *Bioresource Technology*, 291, 121879. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121879>
- Cullinane, J.T. & Rochelle, G.T. (2004). The thermodynamics of aqueous potassium carbonate/piperazine for CO₂ capture. *ACS Div Fuel Chem Prepr* 49(1)
- Daneshvar, E., Wicker, R. J., Show, P. L., & Bhatnagar, A. (2022). Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review. *Chemical Engineering Journal*, 427, 130884. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.130884>

- Fulke, A. B., Krishnamurthi, K., Giripunje, M. D., Devi, S. S., & Chakrabarti, T. (2015). Biosequestration of carbon dioxide, biomass, calorific value and biodiesel precursors production using a novel flask culture photobioreactor. *Biomass and Bioenergy*, 72, 136–142.
- García-Cubero, R. (2012). "Production of carbohydrate-rich microalgal biomass coupled to photosynthetic CO₂ abatement" FEBS Special Issue, J 279: 554-554.
- Garcia-Martinez, B.; Ayala-Torres, E.; Reyes-Gomez, O.; Zuorro, A.; Barajas-Solano, A.; Barajas-Ferreira, C. (2016). Evaluation of a Two-Phase Extraction System of Carbohydrates and Proteins from *Chlorella Vulgaris* UTEX 1803. *Chem. Eng. Trans*, 49, 355-360 SE-Research Articles. <https://doi.org/10.3303/CET1649060>.
- Global Energy Review: *Emisiones de CO₂ en 2020 - Análisis - IEA*. (2021). Retrieved November 29, 2021, from <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>
- Gonzalez, E. G., de Carvalho, J. C., Aulestia, D. T. M., Gonzalez, O. I. M., & Soccol, C. R. (2020). Bioprospection of green microalgae native to Paraná, Brazil using a multi-criteria analysis: Potential for the production of lipids, proteins, and carotenoids. *Bioresource Technology Reports*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2020.100398>
- Grobbelaar JU. (2004). Algal nutrition: mineral nutrition. In: Richmond A (ed). Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology, pp. 97-115. Blackwell Science, Iowa.
- Gupta, P. L., Choi, H. J., Pawar, R. R., Jung, S. P., & Lee, S. M. (2016). Enhanced biomass production through optimization of carbon source and utilization of wastewater as a nutrient source. *Journal of Environmental Management*, 184, 585–595. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.10.018>

- Herzog, H., Eliasson, B. & Kaarstad, O. (2000). Capturing greenhouse gases. *Sci Am* 282:72–79
- Ho, S. H., Chen, C. N. N., Lai, Y. Y., Lu, W. bin, & Chang, J. S. (2014). Exploring the high lipid production potential of a thermotolerant microalga using statistical optimization and semi-continuous cultivation. *Bioresource Technology*, 163, 128–135.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.04.028>
- Ho, S. H., Chen, W. M., & Chang, J. S. (2010). *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potential candidate for CO² mitigation and biodiesel production. *Bioresource technology*, 101(22), 8725–8730. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.112>
- Hynstova, V.; Sterbova, D.; Klejdus, B.; Hedbavny, J.; Huska, D.; Adam, V. (2018). Separation, Identification and Quantification of Carotenoids and Chlorophylls in Dietary Supplements Containing *Chlorella Vulgaris* and *Spirulina Platensis* Using High Performance Thin Layer Chromatography. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 148, 108–118.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.09.018>.
- Illman, A. M., Scragg, A. H., & Shales, S. W. (2000). Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme and microbial technology*, 27(8), 631–635. [https://doi.org/10.1016/s0141-0229\(00\)00266-0](https://doi.org/10.1016/s0141-0229(00)00266-0)
- Iwasaki, I., Hu, Q., Kurano, N., & Miyachi, S. (1998). Effect of extremely high-CO₂ stress on energy distribution between photosystem I and photosystem II in a “high-CO₂” tolerant green alga, *Chlorococcum littorale* and the intolerant green alga *Stichococcus bacillaris*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 44(3), 184–190.
[https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(98\)00140-7](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(98)00140-7)
- Kawata, M., Nanba, M., Matsukawa, R., Chihara, M. y Karube, I. (1998). Aislamiento y caracterización de un alga verde *Neochloris* sp. para la fijación de CO₂. *Estudios en ciencia de superficies y catálisis*, 114 , 637-640.

Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories* 2018 17:1, 17(1), 1–21.

<https://doi.org/10.1186/S12934-018-0879-X>

Kin-Chung, W., Chi-Chung, L., On-Kit, H y Ho-Man, Y. (2013). A Study on Algal Growth Behavior under different Sparging Period of CO₂ Supplementation. Ponencia presentada en 1st International Conference on Beneficial Uses of Algal Biomass, ICBUAB, Hong Kong.

Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., Malcata, F. X., & van Langenhove, H. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*, 28(7), 371–380.

<https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2010.04.004>

Lam, M. K., & Lee, K. T. (2011). Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win–win strategies toward better environmental protection. *Biotechnology Advances*, 29(1), 124–141.

<https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2010.10.001>

Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2012). Current status and challenges on microalgae-based carbon capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10, 456–469.

<https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2012.07.010>

Leite, G. B., Paranjape, K., Abdelaziz, A. E. M., & Hallenbeck, P. C. (2015). Utilization of biodiesel-derived glycerol or xylose for increased growth and lipid production by indigenous microalgae. *Bioresource Technology*, 184, 123–130.

<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.10.117>

- Levasseur, W., Perré, P., & Pozzobon, V. (2020). A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. *Biotechnology Advances*, *41*, 107545. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2020.107545>
- Lowrey, J., Brooks, M. S., & McGinn, P. J. (2014). Heterotrophic and mixotrophic cultivation of microalgae for biodiesel production in agricultural wastewaters and associated challenges a critical review. *Journal of Applied Phycology* *2014* *27*:4, *27*(4), 1485–1498. <https://doi.org/10.1007/S10811-014-0459-3> microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin layer photobioreactor." *Journal of Applied Phycology* **17**: 403-412.
- Mandalam, R. K., & Palsson, B. O. (1998). Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures. *Biotechnology and bioengineering*, *59*(5), 605–611. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0290\(19980905\)59:5<605::aid-bit11>3.0.co;2-8](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0290(19980905)59:5<605::aid-bit11>3.0.co;2-8)
- Matsumoto, H., Hamasaki, A., Sioji, N., & Ikuta, Y. (1997). Influence of CO₂, SO₂ and no in flue gas on microalgae productivity. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, *30*(4), 620–624. <https://doi.org/10.1252/JCEJ.30.620>
- Mishra, S. K.; Suh, W. I.; Farooq, W.; Moon, M.; Shrivastav, A.; Park, M. S.; Yang, J. W. (2014). Rapid Quantification of Microalgal Lipids in Aqueous Medium by a Simple Colorimetric Method. *Bioresour. Technol.* *155*, 330–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.077>.
- Montalvo, G. E. B., Thomaz-Soccol, V., Vandenberghe, L. P. S., Carvalho, J. C., Faulds, C. B., Bertrand, E., Prado, M. R. M., Bonatto, S. J. R., & Soccol, C. R. (2019). *Arthrospira maxima* OF15 biomass cultivation at laboratory and pilot scale from sugarcane vinasse for potential biological new peptides production. *Bioresource Technology*, *273*, 103–113. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.10.081>

- Moreira, D., & Pires, J. C. M. (2016). Atmospheric CO₂ capture by algae: Negative carbon dioxide emission path. *Bioresource technology*, *215*, 371–379.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.060>
- Mota, M. F. S.; Souza, M. F.; Bon, E. P. S.; Rodrigues, M. A.; Freitas, S. P. (2018). Colorimetric Protein Determination in Microalgae (Chlorophyta): Association of Milling and SDS Treatment for Total Protein Extraction. *J. Phycol*, *54* (4), 577–580.
<https://doi.org/10.1111/jpy.12754>.
- Murakami, M., & Ikenouchi, M. (1997). The biological CO₂ fixation and utilization project by rite (2) — Screening and breeding of microalgae with high capability in fixing CO₂ —. *Energy Conversion and Management*, *38*(SUPPL. 1), S493–S497.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00316-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00316-0)
- NOAA. (2020). National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for January 2020, J. Clim
- Peter, A. P., Khoo, K. S., Chew, K. W., Ling, T. C., Ho, S. H., Chang, J. S., & Show, P. L. (2021). Microalgae for biofuels, wastewater treatment and environmental monitoring. *Environmental Chemistry Letters* *2021* *19*:4, *19*(4), 2891–2904.
<https://doi.org/10.1007/S10311-021-01219-6>
- Pires, J. C. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., & Simões, M. (2012). Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(5), 3043–3053.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.02.055>
- Rahaman, M. S. A., Cheng, L. H., Xu, X. H., Zhang, L., & Chen, H. L. (2011). A review of carbon dioxide capture and utilization by membrane integrated microalgal cultivation

processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4002–4012.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.031>

Ramos-Ibarra, J. R., Snell-Castro, R., Neria-Casillas, J. A., & Choix, F. J. (2019).

Biotechnological potential of *Chlorella* sp. and *Scenedesmus* sp. microalgae to endure high CO₂ and methane concentrations from biogas. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 2019 42:10, 42(10), 1603–1610. <https://doi.org/10.1007/S00449-019-02157-Y>

Razzak, S. A., Hossain, M. M., Lucky, R. A., Bassi, A. S., & de Lasa, H. (2013). Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 622–653.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.05.063>

Reboloso-Fuentes, M. M., Navarro-Pérez, A., García-Camacho, F., Ramos-Miras, J. J., & Guerrero, J. L. (2001). Biomass nutrient profiles of the microalga *Nannochloropsis*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(6), 2966–2972. <https://doi.org/10.1021/JF0010376>

Reitan, K. I., Rainuzzo, J. R., & Olsen, Y. (1994). EFFECT OF NUTRIENT LIMITATION ON FATTY ACID AND LIPID CONTENT OF MARINE MICROALGAE1. *Journal of Phycology*, 30(6), 972–979. <https://doi.org/10.1111/J.0022-3646.1994.00972.X>

Riebesell, U., Revill, A. T., Holdsworth, D. G., & Volkman, J. K. (2000). The effects of varying CO₂ concentration on lipid composition and carbon isotope fractionation in *Emiliana huxleyi*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24), 4179–4192.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00474-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00474-9)

Sankar, V., Daniel, D. K., & Krastanov, A. (2014). Carbon Dioxide Fixation by *Chlorella Minutissima* Batch Cultures in a Stirred Tank Bioreactor.
[Http://Mc.Manuscriptcentral.Com/Tbeq](http://Mc.Manuscriptcentral.Com/Tbeq), 25(3), 2468–2476.
<https://doi.org/10.5504/BBEQ.2011.0058>

- Shabani, M., Sayadi, M. H., & Rezaei, M. R. (2016). CO₂ bio-sequestration by *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* in response to different levels of salinity and CO₂. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 6(2), 53–61. www.iaees.org
- Singh, D., Croiset, E., Douglas, P. L., & Douglas, M. A. (2003). Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion. *Energy Conversion and Management*, 44(19), 3073–3091. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00040-2)
- Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., & Zhong, J. (2011). CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO₂ levels. *Bioresource Technology*, 102(3), 3071–3076. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.10.047>
- Tongprawhan, W., Srinuanpan, S., & Cheirsilp, B. (2014). Biocapture of CO₂ from biogas by oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid. *Bioresource Technology*, 170, 90–99. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.07.094>
- Van den Hende, S., Vervaeren, H., & Boon, N. (2012). Flue gas compounds and microalgae: Biochemical interactions leading to biotechnological opportunities. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1405–1424. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2012.02.015>
- Van Eck N. J. & Waltman, L. (2010). “Software Survey: VOSviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping”, *Scientometrics*, Vol 84, no. 2, pp. 523–538, doi:10.1007/s11192-009-0146-3.
- Varshney, P., Beardall, J., Bhattacharya, S., & Wangikar, P. P. (2018). Isolation and biochemical characterisation of two thermophilic green algal species- *Asterarcys quadricellulare* and *Chlorella sorokiniana*, which are tolerant to high levels of carbon dioxide and nitric oxide. *Algal Research*, 30, 28–37. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2017.12.006>

- Venkata Mohan, S., Modestra, J. A., Amulya, K., Butti, S. K., & Velvizhi, G. (2016). A Circular Bioeconomy with Biobased Products from CO₂ Sequestration. *Trends in Biotechnology*, 34(6), 506–519. <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2016.02.012>
- Vuppaladadiyam, A. K., Yao, J. G., Florin, N., George, A., Wang, X., Labeeuw, L., Jiang, Y., Davis, R. W., Abbas, A., Ralph, P., Fennell, P. S., & Zhao, M. (2018). Impact of Flue Gas Compounds on Microalgae and Mechanisms for Carbon Assimilation and Utilization. *ChemSusChem*, 11(2), 334–355. <https://doi.org/10.1002/CSSC.201701611>
- Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 79(5), 707–718. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1518-y>
- Wang, H., Nche-Fambo, F. A., Yu, Z., & Chen, F. (2018). Using microalgal communities for high CO₂-tolerant strain selection. *Algal Research*, 35, 253–261. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2018.08.038>
- Watanabe, K., & Fujii, K. (2016). Isolation of high-level-CO₂-preferring Picochlorum sp. strains and their biotechnological potential. *Algal Research*, 18, 135–143. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2016.06.013>
- Wilbanks, T.J. & Fernandez, S., (2014). Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities: Technical Report for the US Department of Energy in Support of the National Climate Assessment. Island Press.
- Wilson, M., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A., Idem, R., Veawab, A., Aroonwilas, A., Gelowitz, D., Barrie, J., & Mariz, C. (2004). Test results from a CO₂ extraction pilot plant at boundary dam coal-fired power station. *Energy*, 29(9–10), 1259–1267. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2004.03.085>

- Xie, Y. P., Ho, S. H., Chen, C. Y., Chen, C. N. N., Liu, C. C., Ng, I. S., Jing, K. J., Yang, S. C., Chen, C. H., Chang, J. S., & Lu, Y. H. (2014). Simultaneous enhancement of CO₂ fixation and lutein production with thermo-tolerant *Desmodesmus* sp. F51 using a repeated fed-batch cultivation strategy. *Biochemical Engineering Journal*, *86*, 33–40.
<https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2014.02.015>
- Yen, H. W., Hu, I. C., Chen, C. Y., Ho, S. H., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2013). Microalgae-based biorefinery – From biofuels to natural products. *Bioresource Technology*, *135*, 166–174. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.10.099>
- Yun, H. S., Ji, M. K., Park, Y. T., Salama, el-S., & Choi, J. (2016). Microalga, *Acutodesmus obliquus* KGE 30 as a potential candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. *Environmental science and pollution research international*, *23*(17), 17831–17839. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6971-z>
- Zeng, X., Danquah, M. K., Chen, X. D., & Lu, Y. (2011). Microalgae bioengineering: From CO₂ fixation to biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(6), 3252–3260. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.04.014>
- Zhao, B., & Su, Y. (2014). Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *31*, 121–132.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.11.054>

Anexos

Anexo 1. Abreviaturas**ABREVIATURAS**

VAP: *Productos de valor agregado*

CO₂: *Dióxido de Carbono*

CCU: *Captura y utilización de carbono*

CCD: *Diseño Central Compuesto*

TPDC: *Costo Total Directo de Planta*

TPIC: *Costo Indirecto Total de Planta*

PBR: *Fotobiorreactor*

ARN: *Ácido ribonucleico*

ADN: *Ácido desoxirribonucleico*

IPCC: *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*