

UNIVERSIDAD EAN

Evaluación de tecnologías de captura de dióxido de carbono para fuentes estacionarias de generación eléctrica en el corredor vial del Cesar: Integración de simulación de procesos, evaluación de diferentes tecnologías.

Autores:

Ana Sofía Martínez Bastidas

Nicole Dayanna Tudela Ortiz

Juana Daniela Díaz Cabezas

Docente:

Lina María Chacón Rivera

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C.

Agosto de 2025-2

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	3
2. PALABRAS CLAVES:.....	3
3. INTRODUCCIÓN	4
4. ANTECEDENTES	5
5. OBJETIVOS	6
6. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	7
7. JUSTIFICACIÓN	7
8. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	9
9. MARCO DE REFERENCIA	11
10. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES	13
11. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA.....	15
12. DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
13. RESULTADOS DE DESARROLLO DE LA PROPUESTA	30
14. ANÁLISIS DE COSTOS.....	35
15. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD	38
16. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	41
17. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN	43
18. CONCLUSIONES	44
19. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

1. RESUMEN

El presente proyecto busca evaluar tecnologías de captura químicas industriales y biológicas de dióxido de carbono (CO₂) en fuentes estacionarias de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles en el corredor vial del Cesar. El enfoque principal de este proyecto es optimizar y evaluar procesos de absorción química postcombustión, estudiando principios de absorción química con solventes (aminas, carbonatos) aplicables a gases de chimenea de plantas térmicas locales.

De forma simultánea, se evaluará y analizará la estrategia biológica basada en el uso de microalgas para el tratamiento de emisiones, con el fin de realizar un análisis comparativo, para determinar el mejor método considerando las características de la zona. Una vez establecido el método se desarrollará una simulación para presentar lineamientos para la implementación de planes piloto y la planificación de estrategias CCUS (captura, uso y almacenamiento geológico de CO₂) en el corredor Cesar-Caribe.

2. PALABRAS CLAVES:

Captura de CO₂; absorción química postcombustión, microalgas; CCUS; corredor vial del Cesar; planta termoeléctrica; transición energética; fotobiorreactor.

3. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los principales gases de efecto invernadero, cuya acumulación en la atmósfera contribuye de manera significativa al cambio climático. En Colombia, regiones como el corredor vial del Cesar concentran plantas de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles, lo que genera emisiones considerables de CO_2 que afectan tanto la calidad ambiental como la estabilidad de los ecosistemas locales. Ante este panorama, surge la necesidad de evaluar tecnologías de captura que sean viables técnica, económica y ambientalmente, y que se adapten a las particularidades de la zona.

La captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés Carbon Capture, Utilization and Storage) comprende un conjunto de estrategias diseñadas para reducir las emisiones provenientes de fuentes industriales y energéticas. Dentro de estas, la absorción química postcombustión con solventes, como aminas y carbonatos, se ha consolidado como una opción ampliamente estudiada por su alta eficiencia en la remoción de CO_2 en gases de chimenea. En paralelo, la captura biológica mediante microalgas representa una alternativa con beneficios adicionales, como la generación de biomasa aprovechable para bioproductos y bioenergía.

Este proyecto integra simulación de procesos, análisis comparativo y definir un diseño conceptual para evaluar ambas tecnologías bajo las condiciones específicas del corredor vial del Cesar. Con ello se busca no solo determinar la eficiencia de cada estrategia, sino también establecer lineamientos para el desarrollo de proyectos piloto que contribuyan a la transición energética de la región, minimizando el impacto ambiental y favoreciendo el desarrollo sostenible.

4. ANTECEDENTES

Gracias a las actividades industriales llevadas a cabo a gran escala en el departamento del Cesar, este ha despertado mucho interés en proyectos de mitigación de efectos de las emisiones de CO₂, hasta ahora las acciones implementadas se han orientado hacia proyectos de transición energética y aprovechamiento de residuos, con propuestas de captura y quema de biogás e implementación de parques solares, sin embargo, no se han concentrado esfuerzos en captura biológica de CO₂ y cadenas de CCUS para integración a los sistemas ya existentes de las plantas termoeléctricas del corredor vial del Cesar. (Alvira, 2024)

La literatura propone tres rutas de captura principales, precombustión, oxidación y poscombustión. Se han realizado estudios comparativos para estas tecnologías y su implementación en plantas IGCC (Ciclo combinado de gasificación combinada), en estos se muestra que la precombustión y la oxidación resultan apropiadas cuando se están diseñando centrales desde cero, sin embargo, no son la mejor opción para integrar a plantas ya existentes, ya que necesitan gasificación, unidades de separación de aire y modificaciones significativas en calderas y turbinas del sistema, lo que las hace complejas y costosas. (Adams et al., 2017)

Considerando lo anterior, la captura poscombustión por absorción química se reconoce como una opción más viable para implementar en plantas ya existentes, dado que esta solo requiere ser instalada en la corriente de gases de chimenea sin necesidad de alterar los sistemas ni procesos presentes.

Por otro lado, se consideran tecnologías emergentes en el campo de proyectos CCUS como la captura biológica con cultivos de microalgas. Estudios demuestran que especies del género *Chlorella* son buena opción para proyectos de biofijación y producción de oxígeno (Alvira, 2024),

sin embargo, falta evaluar su desempeño en condiciones ambientales y de contaminación en plantas termoeléctricas.

5. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de uso de tecnologías químicas de captura de CO₂ por postcombustión mediante absorción química con solventes (aminas y carbonatos) en plantas de generación eléctrica en el corredor vial del Cesar para realizar un análisis comparativo y complementario con el uso de captura biológica con microalgas para definir cuál puede ser la mejor estrategia viable para implementar en la zona.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Investigar los procesos de absorción química postcombustión con solventes y el proceso biológico con microalgas, para la optimización del proceso de captura de CO₂.
- Analizar la eficiencia técnica de captación de CO₂ de las dos estrategias considerando las condiciones del Cesar.
- Realizar un análisis comparativo de forma detallada de los criterios técnicos, económicos y ambientales para seleccionar la mejor tecnología implementable en la zona de estudio.
- Modelar de manera conceptual el sistema de la alternativa más viable, para su implementación.

6. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En zonas con plantas de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles como el corredor vial del Cesar, se generan emisiones significativas de dióxido de carbono, esto representa una contribución importante al cambio climático y a la degradación ambiental regional.

Si bien existen tecnologías para la captura de gases, como la captura precombustión, oxicomcombustión, almacenamiento geológico, estas presentan desventajas como costos elevados, degradación de materiales o representación de riesgo a comunidades aledañas (Morales, 2017). Por lo que es necesario un estudio específico que evalúe alternativas adaptadas a las condiciones industriales de la zona del Cesar, considerando parámetros técnicos y ambientales mediante un enfoque de modelado y simulación para obtener resultados útiles para la planificación estratégica de tecnologías de captura de dióxido de carbono. De este modo se evalúan las propuestas tecnológicas viables, la captura biológica mediante microalgas y la captura química postcombustión con solventes como aminas y carbonatos.

7. JUSTIFICACIÓN

El corredor vial del Cesar es una zona clave para la matriz energética nacional debido a la cantidad de fuentes estacionarias de generación eléctrica basada en combustibles fósiles, según estimaciones de la U.S. Energy Information Administration, el sector eléctrico puede generar alrededor de 367 gramos de CO₂ por cada kWh producido (U.S. Energy Information Administration, 2023) , estas cifras, en un contexto de operación continua, implican toneladas de CO₂ emitido anualmente en zonas industriales como esta. Por esta razón, es fundamental encontrar

la manera de controlar las emisiones de CO₂ evaluando opciones tecnológicas que sean viables y adaptables a las condiciones locales.

La importancia de esta investigación abarca factores ambientales y sociales, principalmente la captura de CO₂ es clave para reducir el impacto de la contaminación ambiental causada por la generación eléctrica en la región, pero también se ha demostrado que pueden agravar problemáticas locales evidenciadas en el Cesar como la pérdida de cobertura vegetal, el deterioro de fuentes hídricas y la presión sobre comunidades rurales dependientes de recursos naturales vulnerables (Paredes Rincon, 2020).

Considerando lo dicho anteriormente, esta investigación brindará una comparación de tecnologías entre la evaluación de microalgas y la absorción química mediante aminos y carbonatos, lo que permitirá identificar la alternativa más adecuada considerando la eficiencia, los costos, requisitos operativos y características específicas de la zona y tendrá relevancia para la planificación de proyectos de generación energética, ya que los resultados serán insumos técnicos para el planteamiento de estrategias de captura y almacenamiento de carbono apoyando decisiones de inversión y transición energética.

Principalmente la exploración de nuevas tecnologías para la captura de dióxido de carbono (CO₂) permite fortalecer las habilidades en investigación, profundizar en el saber técnico y práctico de las mismas, aportando a las competencias adquiridas en la academia sobre la simulación de procesos, capacidad de análisis comparativo y diseño conceptual de soluciones sostenibles. Asimismo, este proyecto proporciona la oportunidad de contribuir al desarrollo de estrategias que, en un contexto ambiental relevante, promueven e implementan soluciones viables sostenibles para las grandes industrias del sector energético, consolidando nuestro conocimiento y formación,

demostrando la capacidad de abordar desafíos energéticos, ambientales, sociales y económicos con un enfoque innovador, adaptándolo a las necesidades regionales de Colombia.

8. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Para avanzar en la propuesta es fundamental definir los requerimientos que guían el diseño, asegurando tanto la coherencia técnica como la viabilidad de los resultados teniendo en cuenta las dos alternativas que se quieren analizar, el lugar y sus condiciones ambientales. En este sentido, se contemplan dos alternativas de captura de CO₂ que responden a las condiciones del corredor vial del Cesar: la absorción química postcombustión con solventes, entre ellos aminas y carbonatos, y la captura biológica mediante microalgas.

Con estas opciones se busca garantizar una reducción significativa de emisiones, considerando al mismo tiempo factores locales como el clima tropical el cual se encuentra en un rango de (23°C-37°C) dependiendo de la hora zonal, la humedad relativa que esta entre (71%-85%) (Pronóstico Del Tiempo Por Hora Para Valledupar, Cesar, Colombia: The Weather Channel | Weather.Com, n.d.), una altitud la cual puede llegar 1240 msnm (*Institucional*, n.d.) y una presión que también varía dependiendo de la zona, registrando un dato como el de La Paz, Cesar su presión es de 1012.2 mb, su humedad es de 72%, tiene una altitud de 165msnm y su temperatura varía entre (24°C-37°C) (*Pronóstico Del Tiempo y Condiciones Meteorológicas Para La Paz, Cesar, Colombia: The Weather Channel | Weather.Com*, n.d.) pero estas condiciones dependen de la zona, por otro lado, esto podría ser una implicación debido a las altas temperaturas del lugar por lo que se podría tener menor eficiencia del proceso de absorción (a mayor temperatura se disminuirá la solubilidad del CO₂ en el solvente).

De igual modo, se debe considerar otros factores, en el caso de la captura química por medio de absorción, el tipo de absorbente, la capacidad de absorción que se puede llegar a tener, la temperatura y presión de la operación, ciclo de uso del absorbente y cuanto tarda en dejar de capturar CO₂. En contraste, en el caso de captura biológica con microalgas se debe tener en cuenta la especie de la microalga, la proporción de nutrientes en el medio, la intensidad lumínica, pH, temperatura y porcentaje de CO₂. (Giraldo Rave, 2013)

Asimismo se proyecta que la eficiencia de captura supere el 85% en el caso de los solventes y alcance alrededor del 70% con el uso de microalgas, lo cual permite contar con parámetros de referencia que orientan la comparación, como en su rendimiento técnico para observar la eficiencia de captura, la tolerancia de contaminantes y la continuidad operativa que puede llegar a tener, el, consumo energético, el (OPEX) , el (CAPEX) y el costo de tonelada de CO₂ capturado y la sostenibilidad del proyecto.

Además, resulta indispensable establecer características que fortalezcan la viabilidad de la propuesta. Por ello, se incluyen aspectos como la posibilidad de escalar las tecnologías hacia proyectos piloto, la integración con plantas de generación de 50 a 100 MW y la sostenibilidad de las instalaciones a lo largo de 20 a 25 años de vida útil. A la vez, se busca reducir emisiones secundarias y optimizar el consumo de recursos, de modo que el impacto ambiental adicional sea mínimo. De esta forma, el análisis de requerimientos no solo define las bases técnicas del proyecto, sino que también ofrece lineamientos que facilitan la planificación de estrategias de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) en el corredor vial del Cesar, contribuyendo a una transición energética más sostenible y adaptada a las necesidades de la región.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta los requerimientos legales como el decreto 1076 de 2015 (*Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor*

Normativo - Función Pública, n.d.), el cual recopila información que se debe tener en cuenta sobre la regulación ambiental como el licenciamiento ambiental, permisos de emisiones atmosféricas para fuentes estacionarias, calidad del aire y monitoreo, funciones de las autoridades ambientales y temas de sanciones y cumplimientos, la ley 1931 de 2018 y la Ley 2169 de 2021 las cuales van muy de la mano, la ley 1931 establece requerimientos para la gestión del cambio climático en Colombia, con el fin de promover la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) (*Ley 1931 de 2018 - Gestor Normativo - Función Pública*, n.d.) y la ley 2169 tiene como objetivo la neutralidad de carbono para 2050 y fomentar la resiliencia climática con el fin de mitigar el cambio climático y priorizar la transición justa en el país (*LEY 2169 DE 2021*, n.d.), este proyecto tiene propósito impulsar las soluciones sostenibles y contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ por lo cual contribuye al cumplimiento de estas leyes.

9. MARCO DE REFERENCIA

La fundamentación del proyecto se apoya en los conocimientos existentes sobre tecnologías de captura de CO₂ aplicadas a la generación eléctrica, los cuales ofrecen una base sólida para orientar la investigación. En este sentido, se consideran tanto los procesos termoquímicos relacionados con la absorción postcombustión mediante solventes como aminas y carbonatos, como los principios biológicos vinculados a la fijación de carbono por medio de microalgas. De esta manera, se enlaza la teoría de la termodinámica, que explica los mecanismos de absorción química (Hougen, Watson, & Ragatz, 1982, p. 45); con los fundamentos de bioprocesos que describen la fotosíntesis y el aprovechamiento de la biomasa, construyendo una visión comparativa que permite reconocer oportunidades y limitaciones en cada alternativa.

En el contexto colombiano, el departamento del Cesar representa una importante capacidad de generación termoeléctrica a partir de carbón y gas natural, lo que lo convierte en una gran fuente de emisión de CO₂. Considerando estas condiciones, se hace necesario una revisión crítica de la literatura (Hernández-Sampieri, 2014), y enfoques tecnológicos que puedan ser adaptados a la región, esto permite identificar vacíos de aplicación en contextos específicos como el corredor vial del Cesar, donde confluyen factores ambientales, técnicos y sociales que condicionan la implementación de estas tecnologías.

Las metodologías de captura de CO₂ se clasifican principalmente en 3 rutas: precombustión, que separa el CO₂ a partir de un gas de síntesis previo a la combustión; oxicomcombustión, en el que se emplea oxígeno para generar gases ricos en CO₂ y vapor de agua; y postcombustión, que separa el CO₂ de los gases emitidos en chimeneas (Kunze & Spliethoff, 2012). Considerando el contexto de historia minera y petrolera de la región estudiada y en el marco de la implementación de una cadena de CCUS (captura, uso y almacenamiento de carbono), se considera el almacenamiento geológico en yacimientos agotados de hidrocarburos o capas de carbón profundas complementaria al proceso de postcombustión, estrategia que ha demostrado ser viable para el confinamiento permanente, sustentada en mecanismos de solubilidad, mineralización y adsorción si se seleccionan sitios adecuados (Gurucharri Fernández, 2012)

Por otro lado, la captura biológica es una estrategia emergente que aprovecha el proceso de fotosíntesis mediante especies vegetales y microalgas. Esta alternativa se considera en el Cesar debido a las condiciones de radiación solar y disponibilidad de aguas residuales industriales. Estudios han demostrado que especies como la *Scenedesmus* sp. y la *Chlorella vulgaris* pueden fijar entre el 15% y el 25% de CO₂ atmosférico en compuestos orgánicos, además de permitir la

generación de bioproductos como el biodiésel (Ararat et al., 2020). El desempeño de esta metodología depende de factores ambientales como la intensidad lumínica, la disponibilidad de nutrientes y la calidad del agua, y aunque aún no está consolidada a gran escala, la integración de esta tecnología con el tratamiento de aguas residuales puede reducir la contaminación hídrica y al mismo tiempo capturar emisiones de dióxido de carbono. (Luccini et al., 2018)

Por otra parte, la solución debe regirse por normas de ingeniería que aseguren la rigurosidad técnica y el cumplimiento regulatorio. Entre ellas se destacan la ISO 27916:2019, que establece lineamientos para el almacenamiento geológico de CO₂, la ISO 14064-2:2019 (International Organization for Standardization, 2019), que regula la cuantificación y reporte de reducciones de emisiones, la ASME PTC 47-2006 (American Society of Mechanical Engineers, 2006), que orienta las pruebas de desempeño en plantas térmicas con captura, que fija requisitos aplicables en la industria energética colombiana. Estos lineamientos en conjunto sirven como referentes en construcción para la evaluación de alternativas, orientando la propuesta hacia el cumplimiento de estándares internacionales y nacionales

10. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES

Para el planteamiento e implementación del proyecto se deben considerar las restricciones que influyen en su viabilidad técnica, económica, social, ambiental y normativa.

Dentro de las restricciones técnicas. Se considera los parámetros determinantes para la simulación, esto incluye la temperatura, presión, humedad y composición de gases de las plantas termoeléctricas escogidas para el proyecto, ya que estos datos no se pueden caracterizar de manera

experimental in situ, se deben solicitar a fuentes oficiales especializadas como el IDEAM y el ANLA. Para garantizar la rigurosidad en pruebas y simulaciones, se tendrá en cuenta la norma ASME PTC 47-2006, esta brinda criterios técnicos para evaluar el desempeño de sistemas de captura postcombustión en plantas termoeléctricas. (*Power Block of an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant* | 2015 | PDF | ASME, n.d.)

Respectivo a las restricciones normativas, aunque la legislación colombiana vigente regula emisiones atmosféricas y promueve la neutralidad del carbono, aun no se determinan límites específicos de CO₂ para fuentes fijas como las plantas termoeléctricas, esto implica un vacío normativo que da libertad para la implementación y estudio de nuevas tecnologías de captura, sin requisitos de cumplimiento de límites de rendimiento estrictos, lo que favorece el desarrollo de investigaciones comparativas.

Teniendo en cuenta que el proyecto busca ser completamente sostenible, se deben considerar las restricciones sociales y culturales. El corredor vial del Cesar es asociado con actividades de extracción de petróleo y carbón, estas han dejado una perspectiva negativa en las comunidades por el impacto social y ambiental ocasionado, en este contexto, el proyecto debe implementar estrategia de comunicación orientada a generar confianza e informar a la comunidad acerca de los objetivos de transición energética y sostenibilidad adaptada a las condiciones específicas del territorio.

El uso de solventes químicos como las aminas y los carbonatos implican restricciones ambientales, puesto que estos representan riesgos de manejo, almacenamiento y disposición final, para esto hay que seguir protocolos de seguridad para evitar impactos secundarios en los suelos o en fuentes hídricas. Alguno de los protocolos a seguir se encuentran en normas como la ISO 45001:2018 en la que se establece un marco de gestión de seguridad que obliga a identificar riesgos

y controles adecuados en el uso de los solventes (ISO 45001:2018(Es), Sistemas de Gestión de La Seguridad y Salud En El Trabajo — Requisitos Con Orientación Para Su Uso, n.d.), también existen las guías de la IEA en CCUS Technology Innovation, las cuales explican las buenas prácticas e innovación en el uso de solventes considerando su eficiencia, costos e impactos ambientales en proyectos de captura de CO₂ (*CCUS Technology Innovation – CCUS in Clean Energy Transitions – Analysis - IEA, n.d.*).

Por otra parte, la ruta biológica requiere grandes cantidades de agua para el mantenimiento de las microalgas, por lo que se puede integrar el uso de aguas residuales industriales o municipales para satisfacer esta necesidad especialmente en épocas de sequía. Esto permitirá reducir la presión sobre fuentes hídricas naturales e integrar el tratamiento de aguas residuales con la captura de carbono.

11. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA

Este análisis se enfoca en la planta Gremca en El Copey, Cesar que genera aproximadamente 1.250 (kWh). Esta instalación genera energía a partir de biogás, aprovechando los residuos provenientes de la extracción de aceite de palma (POME) por medio de la captura de metano, lo cual ayuda con la mitigación aproximadamente de 30.000 toneladas de CO₂e anualmente durante los primeros 10 años, alineándose al modelo de economía circular y contribuyendo a los ODS en el Cesar. (*Energías Renovables - Gremca S.A., n.d.*).

Por otro lado, se toma en cuenta las dos alternativas del proyecto:

- **Captura de CO₂ por medio de post-combustión con absorción química (aminas).**

Esta forma ayuda con la eliminación de CO₂ al ponerlo en contacto con un solvente químico (aminas), las más usadas en las industrias son: Monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), trietanolamina (TEA) y metildietanolamina (MDEA). En este caso se toma como opción el MEA empleándola a un 20% peso, debido a su madurez técnica en el mercado, su alta alcalinidad y facilidad con que se puede regenerar la solución contaminada, sin embargo, es una amina consideradamente corrosiva y se debe hacer uso de equipos que ayuden a mitigar esta corrosión. Al realizar la recuperación de la amina, se requiere un alto consumo energético lo que representa entre el 70% y 80% del coste operativo total y reduce la eficiencia de la central eléctrica entre un 11% y 15%. (<https://estrucplan.com.ar/comparacion-de-diferentes-soluciones-de-aminas-para-la-purificacion-de-biogas/>). Para hacer uso nuevamente de este solvente se debe realizar una desorción, esta ayuda a revertir la reacción química, rompiendo los enlaces químicos entre el CO₂ y el solvente, obteniendo como resultado el CO₂ en fase líquida (Borhani et al., 2024)

La captura por este medio se realiza de la siguiente forma:

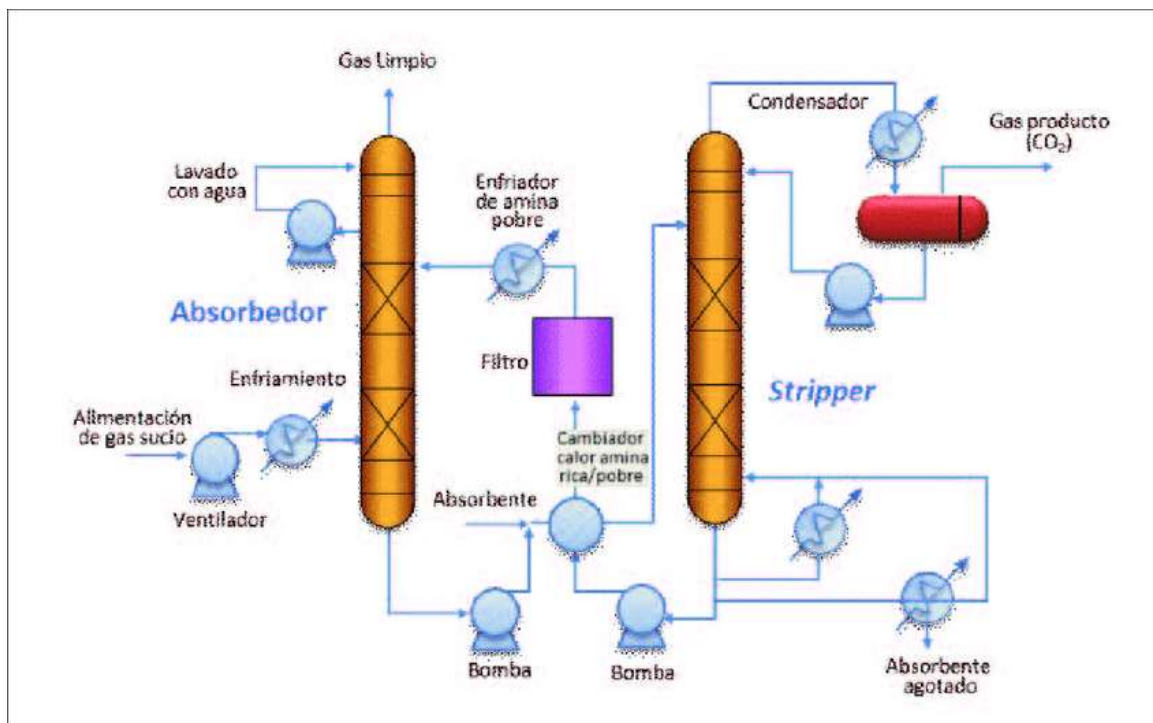


Imagen 1. Proceso general de absorción química [IPCC, 2005]

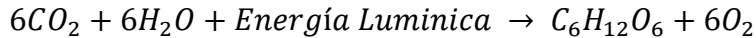
Fuente: Abanades, J. C., Alonso, R., Casero, P., & Corstess, V. (2015). CO₂ Capture technology at high scale – Spanish (Captura CO₂: tecnologías para una captación a gran escala). PETCO₂. Los gases de combustión son enfriados hasta una temperatura establecida.

1. Estos gases enfriados se inyectan a una torre de absorción entrando en contacto con el solvente, el cual es introducido en contracorriente. Para que el CO₂ sea diluido en el solvente, la torre debe estar a una temperatura aproximada de 40°C-60°C. En este punto se realiza un lavado con agua para evitar que los gases de escape con una concentración baja de CO₂ pueda contener algún rastro de solvente y se forma un enlace químico entre el solvente y el CO₂.
2. Consecutivo, al pasar por una etapa de calentamiento, la mezcla concentrada de CO₂ es conducida a la columna de desorción, este flujo se lleva a una temperatura de 100°C-140°C y a una presión sutilmente superior que la atmosférica, permitiendo que el CO₂ sea liberado por la parte superior de la columna con el vapor de agua que se usa para la regeneración, este flujo sale de la torre y entra a un condensador con el fin de eliminar el vapor de agua y que el CO₂ salga una alta concentración para poder ser comprimido y almacenado.
3. El absorbente agotado previamente filtrado para eliminar las impurezas se enfría a 40°C- 65°C y se recircula a la columna de absorción para completar el ciclo.

- **Captura biológica con microalgas.**

La ruta metabólica principal empleada por las microalgas, tales como *Chlorella vulgaris*, para la captación de CO₂ es la fotosíntesis. Este proceso consiste en la conversión de CO₂ y H₂O en

glucosa y oxígeno, utilizando energía lumínica como fuente principal. La reacción que genera se presenta de la siguiente forma:



Dicho proceso se divide en dos etapas fundamentales:

- Etapa fotoquímica (fase luminosa): En esta fase la energía lumínica es capturada por pigmentos fotosintéticos, principalmente la clorofila. Esto genera la excitación de electrones, lo que permite la oxidación del H₂O. El NADP⁺ se reduce a NADPH, liberando O₂ como subproducto, mientras que parte de la energía se incorpora al ATP a través de la fosforilación durante el transporte de electrones.
- Etapa de fijación de carbono (fase oscura): No depende directamente de la luz, el CO₂ se incorpora a la ribulosa 1,5-disfosfato mediante la acción catalítica de la enzima rubisco, formando ácido fosfoglicérico (PGA). Posteriormente, el PGA se reduce utilizando NADPH, generando azúcares fosforilados intermedios que culminan en la síntesis de glucosa.

La fijación del carbono se lleva a cabo a través del ciclo de Calvin-Benson, donde se sintetizan aminoácidos y otros componentes celulares esenciales. Bajo condiciones de iluminación intensa, se promueve la formación de azúcares y almidón. Adicionalmente, las microalgas requieren O₂ para su metabolismo en oscuridad, empleando vía oxidativa de la pentosa-6-fosfato.

Por último, se consideran los aspectos económicos de cada alternativa, para este análisis inicial solo se reportan datos claves que incidan en la decisión como el CAPEX, el OPEX y el costo por tonelada de CO₂ tratado. Estos resultados se muestran en la siguiente tabla.

	Ruta química	Ruta biológica
CAPEX (COP)	75-100 billones	40-60 billones
OPEX (COP /MW año)	200-300 millones	100-200 millones
COSTO POR TONELADA (cop/T CO ₂)	150.000-250.000	100.000- 180.000

Estos datos estimados permiten hacer una evaluación preliminar de que alternativa requiere una menor inversión inicial y cual presenta un mayor costo operativo a largo plazo. Como indican los datos, la alternativa con la ruta química no es atractiva económicamente, ya que, si bien reporta mayor eficiencia, los equipos complejos y con grandes requerimientos de esquemas de control de variables críticas incrementan el valor de la inversión inicial, al mismo tiempo que sus altos consumos de energía y recursos químicos elevan los costos operativos (Borhani et al., 2024). Mientras que, la implementación de biofotorreactores resulta más rentable, ya que, aun cuando esta requiere un mayor espacio de adecuación para los equipos, esta combina una menor inversión inicial, menores costos operativos y la generación de subproductos a partir de los residuos del cultivo microalgal (Rezvani et al., 2016), estos escenarios reducen el costo neto por tonelada de CO₂ y la hacen más viable para su implementación en una planta con las características contempladas.

12. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología de este proyecto se fundamenta en un enfoque sistemático e integrado, diseñado para garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos y la generación de

resultados rigurosos y aplicables al contexto del corredor vial del Cesar. Se estructura en cuatro fases secuenciales que combinan investigación documental, análisis técnico, simulación de procesos y evaluación multicriterio, alineadas con estándares internacionales como ISO 27916:2019 (almacenamiento geológico de CO₂) y ASME PTC 47-2006 (desempeño en plantas térmicas). Este enfoque permite abordar los desafíos técnicos, económicos y ambientales de las tecnologías de captura de CO₂, asegurando su viabilidad en la región estudiada.

Fase 1: Investigación y Caracterización del Contexto

Esta fase inicial se centra en la recopilación y análisis de información técnica y científica relevante para las tecnologías de captura de CO₂ evaluadas: absorción química postcombustión con solventes (aminas y carbonatos) y captura biológica con microalgas. Se realiza una revisión bibliográfica exhaustiva utilizando bases de datos como Scopus, Web of Science, Google Scholar y repositorios especializados de la IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) y la IEA (International Energy Agency). Los aspectos clave incluyen:

- **Absorción química:** Estudio de parámetros operativos como temperatura de absorción (40-60°C), presión (1-2 atm), composición de gases de combustión (10-15% CO₂, 70-80% N₂, trazas de SO_x/NO_x) y eficiencia de captura (85-95%) con solventes como monoetanolamina (MEA al 20-30%) y carbonato de potasio (K₂CO₃). La absorción química con aminas como MEA ofrece alta eficiencia, pero requiere optimización para reducir el consumo energético y los costos operativos (Lu et al., 2023).
- **Captura biológica:** Análisis de especies de microalgas (*Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus sp.*), considerando factores como intensidad lumínica (200-400 μmol/m²/s), pH (7-9), temperatura (25-35°C) y concentración de CO₂ (5-15%). Se destaca que *Chlorella vulgaris*

puede fijar hasta 2.5 g CO₂/g de biomasa bajo condiciones óptimas, con potencial para generar subproductos como biodiésel (Kumar et al., 2025).

Paralelamente, se recopilan datos específicos del corredor vial del Cesar, incluyendo:

- Emisiones de CO₂ de fuentes estacionarias, basadas en reportes de la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) y la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales), estimando emisiones de 367 g CO₂/kWh en plantas termoeléctricas.
- Condiciones ambientales locales: temperatura media (28-35°C), humedad relativa (70-85%), radiación solar alta (4-6 kWh/m²/día) y presión atmosférica (1012-1015 mb en zonas como La Paz, Cesar).
- Características de la planta Gremca en El Copey, Cesar (1.250 kWh, biogás de residuos de aceite de palma, mitigación de ~30.000 t CO₂/año).

Se emplea un enfoque cualitativo para identificar ventajas, limitaciones y requerimientos técnicos, mediante matrices de evaluación preliminar que integran criterios técnicos, ambientales y normativos (e.g., Ley 1931 de 2018 y Ley 2169 de 2021).

Fase 2: Simulación y Evaluación Técnica

En esta fase, se evalúa la eficiencia técnica de las dos tecnologías mediante simulación de procesos, utilizando herramientas especializadas para modelar escenarios realistas adaptados a las condiciones de la planta Gremca. Se enfatiza la importancia de simulaciones precisas para evaluar el desempeño de sistemas de captura de CO₂ en condiciones industriales específicas (Thiedemann & Wark, 2025).

- **Absorción química postcombustión:** Se emplea software como Aspen Plus o Visual Studio (Python) para modelar el ciclo de absorción-desorción. Las entradas incluyen el flujo de gases de combustión, concentración de solvente (20-30% MEA) y condiciones operativas (temperatura 40-60°C para absorción, 100-140°C para desorción; presión 1-2 atm). Las salidas esperadas son:
 - Eficiencia de captura: >85%.
 - Consumo energético: 3-4 GJ/t CO₂ capturada.
 - Degradación del solvente: 1-2% anual.
 - Tolerancia a contaminantes (SO_x/NO_x) y continuidad operativa.
- **Captura biológica con microalgas:** Se utiliza modelado matemático en herramientas como MATLAB o Python (Visual Studio) para simular biorreactores fototróficos. Las entradas incluyen tasa de crecimiento de microalgas (0.1-0.5 g/L/día), fijación de CO₂ (1.5-2.5 g CO₂/g biomasa) e integración con aguas residuales industriales. Se tiene en cuenta que los biorreactores cerrados optimizan la transferencia de CO₂ y minimizan la contaminación, mejorando la eficiencia fotosintética en un 10-15% en regiones con alta radiación solar como el Cesar (Yahaya et al., 2025). Las salidas incluyen:
 - Eficiencia de captura: 60-80%.
 - Producción de biomasa: 20-30 t/año para biodiésel o bioenergía.
 - Tolerancia a variaciones en pH, temperatura y contaminantes.

Las simulaciones incorporan variables locales, como la alta temperatura del Cesar (reducción de solubilidad de CO₂ en solventes químicos en 10-15%) y la disponibilidad de radiación solar (incremento de eficiencia fotosintética en 10%). Se realizan análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de estas variables en el desempeño técnico.

Fase 3: Análisis Comparativo Multicriterio

Se lleva a cabo un análisis comparativo detallado entre las dos tecnologías, utilizando el método de jerarquía analítica (AHP - Analytic Hierarchy Process) para ponderar criterios técnicos, económicos y ambientales. Los criterios evaluados son:

- Técnicos: Eficiencia de captura, escalabilidad, integración con infraestructura existente (e.g., planta Gremca), tolerancia a contaminantes y continuidad operativa.
- Económicos: Costos de capital (CAPEX), costos operativos (OPEX), costo por tonelada de CO₂ capturada y retorno de inversión (detallado en el análisis económico).
- Ambientales: Impacto en recursos hídricos, emisiones secundarias, generación de subproductos y contribución a la economía circular.

Se asignan pesos relativos a los criterios (40% técnico, 30% económico, 30% ambiental) basados en las prioridades de sostenibilidad y transición energética de la región. Los resultados se consolidan en una matriz de decisión que identifica la alternativa más viable, con validación mediante escenarios de sensibilidad (e.g., variaciones en temperatura, disponibilidad de agua o precios de energía).

Fase 4: Diseño Conceptual y Lineamientos para Implementación

En esta fase final, se desarrolla un diseño conceptual detallado de la alternativa seleccionada (captura biológica con microalgas, identificada como la más viable) para su implementación en un proyecto piloto en la planta Gremca. Se utilizan diagramas de flujo de procesos (PFD - Process Flow Diagram) y diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) generados en software como Microsoft Visio, Draw.io o AutoCAD, asegurando una representación precisa de los componentes y flujos del sistema. El diseño incluye:

- **Configuración del sistema:** Desarrollo de biorreactores fototróficos cerrados (volumen: 500-1.000 m³ para una planta piloto de 50-100 MW), optimizados para maximizar la captura de CO₂ y la producción de biomasa. Los biorreactores incorporan sistemas de iluminación LED de alta eficiencia (200-400 μmol/m²/s) y control de pH (7-9) para mantener condiciones óptimas de crecimiento de *Chlorella vulgaris*. Se integra un sistema de reciclaje de aguas residuales industriales de la planta Gremca, reduciendo la demanda de agua fresca en un 30-40% (Yahaya et al., 2025).
- **Integración con la cadena CCUS:** El CO₂ capturado se comprime a 100-150 bar para su transporte y almacenamiento geológico en yacimientos agotados de hidrocarburos o capas de carbón profundas en el Cesar, siguiendo las directrices de la ISO 27916:2019. Se evalúan sitios geológicos potenciales mediante datos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), considerando propiedades como porosidad (15-25%) y permeabilidad (50-200 mD) para garantizar la seguridad y permanencia del almacenamiento (Thiedemann & Wark, 2025).
- **Validación y optimización:** Se implementa un sistema de monitoreo en tiempo real para parámetros clave (pH, temperatura, concentración de CO₂) utilizando sensores automatizados. Los datos se analizan mediante software estadístico (e.g., R o SPSS) para

optimizar el diseño y ajustar parámetros operativos. Se realizan pruebas iterativas para evaluar la robustez del sistema frente a variaciones climáticas, como periodos de sequía, que podrían afectar la disponibilidad de agua (Kumar et al., 2025).

La metodología se alinea con normativas nacionales (Decreto 1076 de 2015, Ley 1931 de 2018, Ley 2169 de 2021) y estándares internacionales (ISO 27916:2019, ASME PTC 47-2006), garantizando el cumplimiento regulatorio y la rigurosidad técnica. El cronograma estimado para la ejecución de las fases es de seis meses, con revisiones iterativas para validar los resultados y ajustar los modelos según retroalimentación.

- Descripción del desarrollo de la implementación del código en el modelo de simulación de captación de CO₂

El proyecto implementa una aplicación local compuesta por una interfaz web ligera desarrollada en HTML y JavaScript como se muestra en la imagen 2. el código JavaScript y la imagen 3. El código HTML, conectada a un backend científico programado en Python. La interacción entre ambas capas se realiza mediante una API construida con FasAPI, la cual funciona como puente entre la visualización del usuario y los modelos matemáticos que representan el sistema acoplado CSTR Y PBR.

```
JS app.js X
Simulacionfotobiorreactor V3 (Interfaz, funciona) > fronted > JS app.js > addEventListener('submit') callback
1 // app.js
2
3 const API_URL = "http://127.0.0.1:8080/simulate";
4
5 let biomassChartInstance, oxygenChartInstance; // Cambiado tempChartInstance por oxygenChartInstance
6
7 document.getElementById('simulationForm').addEventListener('submit', async function(e) {
8   e.preventDefault();
9
10   const button = document.getElementById('simulateButton');
11   const statusMessage = document.getElementById('statusMessage');
```

Imagen 2. Código JavaScript

Nota. Elaboración propia Visual Studio (Python)



```

index.html
Simulacionfotobiorreactor V3 (Interfaz, funciona) > fronted > index.html > html > head
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="es">
3 <head>
4   <meta charset="UTF-8">
5   <title>Simulador CSTR-PBR</title>
6   <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js@3.7.1/dist/chart.min.js"></script>
7   <style>

```

Imagen 3, Código HTML

Nota. Elaboración propia Visual Studio (Python)

El archivo app.js se define dentro del código como la lógica del cliente web. Este componente se encarga de capturar los parámetros de entrada suministrados por el usuario, validarlos y enviarlos al servidor mediante una solicitud POST dirigida al endpoint <http://127.0.0.1:8000/simulate>. La API procesa los datos, ejecuta la simulación y retorna una respuesta estructurada en formato JSON. Esta información es posteriormente utilizada por el cliente para actualizar métricas operacionales, generar gráficos dinámicos con Charts.js y presentar los resultados de manera interactiva.



```

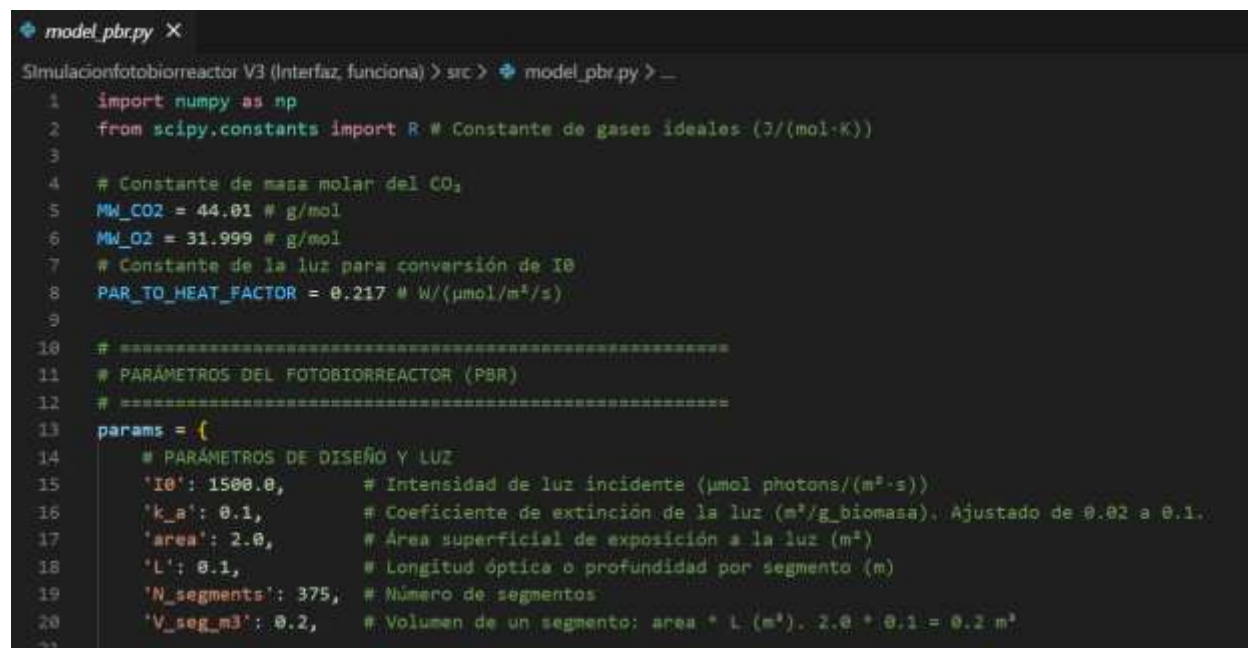
model_cstr.py X
Simulacionfotobiorreactor V3 (Interfaz, funciona) > src > model_cstr.py > ...
1 import math
2
3 R = 8.31446261815324 # Pa·m3/(mol·K)
4 MW_CO2 = 44.01 # g/mol
5
6 # Parámetros por defecto
7 params = {}
8 # PARÁMETROS FÍSICOS Y DE GAS
9 'Q_gas_m3_per_min': 0.434, # Caudal volumétrico de la fase gaseosa entrante (m³/min)
10 'y_CO2': 0.90, # Fracción molar de CO₂ en la fase gaseosa entrante
11 'P_Pa': 111457.5, # Presión total del sistema (Pa)
12 'T_K': 303.15, # Temperatura absoluta (K)
13 'V_cstr_m3': 1.0, # Volumen del CSTR (m³)
14 'kLa_min': 0.2, # Coeficiente volumétrico de transferencia de masa de CO₂ (1/min)
15 'KH_CO2': 3.4e-2, # Constante de Henry para CO₂ (mol/(m³·Pa))
16 'C_in': 0.0, # Concentración de CO₂ líquido en el flujo de entrada (mol/m³)

```

Imagen 4. Código modelo del CSTR

Nota. Elaboración propia

El backend se encuentra organizado en el directorio /src, dentro del cual se ubican los módulos `model_cstr.py` como se evidencia en la imagen 4. Código modelo del CSTR, `model_pbr.py` y de la misma forma se puede encontrar en la imagen 5. Código modelo del PBR, por lo tanto, para concluir la imagen 6. Muestra el código final de la simulación llamado `run_simulation.py`. Estos archivos contienen la formulación matemática, la configuración de los modelos diferenciales y las funciones que gobiernan la transferencia de masa, la cinética de crecimiento y el comportamiento energético del sistema. La API invoca estos modelos para simular 24 horas de operación continua y emitir los resultados hacia la capa frontal.



```

model_pbr.py X
Simulacionfotobiorreactor V3 (Interfaz funciona) > src > model_pbr.py > _
1  import numpy as np
2  from scipy.constants import R # Constante de gases ideales (J/(mol·K))
3
4  # Constante de masa molar del CO2
5  MW_CO2 = 44.01 # g/mol
6  MW_O2 = 31.999 # g/mol
7  # Constante de la luz para conversión de I0
8  PAR_TO_HEAT_FACTOR = 0.217 # W/(μmol/m²/s)
9
10 # =====
11 # PARÁMETROS DEL FOTOBIORREACTOR (PBR)
12 # =====
13 params = {
14     # PARÁMETROS DE DISEÑO Y LUZ
15     'I0': 1500.0, # Intensidad de luz incidente (μmol photons/(m²·s))
16     'k_a': 0.1, # Coeficiente de extinción de la luz (m²/g_biomasa). Ajustado de 0.02 a 0.1.
17     'area': 2.0, # Área superficial de exposición a la luz (m²)
18     'L': 0.1, # Longitud óptica o profundidad por segmento (m)
19     'N_segments': 375, # Número de segmentos
20     'V_seg_m3': 0.2, # Volumen de un segmento: area * L (m³). 2.0 * 0.1 = 0.2 m³
21

```

Imagen 5. Código Modelo del PBR

Nota. Elaboración propia.

```

run_simulation.py X
Simulacionfotobiorreactor V3 (Interfaz, funciona) > src > run_simulation.py > ...
1  """run_simulation.py
2  Simulación completa CSTR + PBR tubular con Balance de Energía.
3  """
4  import os
5  import numpy as np
6  # Importación de todas las funciones necesarias, incluidas las de inicialización y balance de CO2
7  from model_cstr import params as cstr_params, cstr_odes, c_star_mol_per_m3, mco2_in_mol_per_min
8  from model_pbr import params as pbr_params, pbr_derivatives
9  import utils
10
11  # -----
12  # PARÁMETROS DE SIMULACIÓN
13  # -----
14  t_final_min = 24 * 60 # 24 h
15  t_span = (0, t_final_min)
16  N_segments = 20
17  pbr_params['N_segments'] = N_segments

```

Imagen 6. Código Final de Simulación

Nota. Elaboración propia.

A nivel técnico, el módulo `model_cstr.py` implementa el comportamiento dinámico del reactor continuo de tanque agitado (CSTR) a partir del balance diferencial de concentración y energía. El modelo utiliza la ecuación general:

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{F}{V}\right)(C_{in} - C) - r(C, T)$$

en la cual se incorporan tanto el aporte convectivo como la velocidad de reacción dependiente de temperatura bajo un esquema tipo Arrhenius. Este módulo incluye también las propiedades termodinámicas del fluido, parámetros cinéticos y condiciones iniciales que permiten la resolución numérica del sistema.

El módulo `model_pbr.py` representa el reactor tubular fotobiológico (PBR) mediante un esquema segmentado compuesto por N unidades diferenciales. En cada segmento se resuelve el balance de masa:

$$\frac{dC}{dz} = -\frac{r(C)}{v}$$

integrando efectos de transferencia axial, iluminación incidente, cinética de crecimiento microbiano y variaciones locales de temperatura. El estado completo del reactor se construye mediante la concatenación del perfil de biomasa, concentración de CO_2 y temperatura para todos los segmentos, permitiendo evaluar la distribución axial del proceso.

En `run_simulation.py` se integran ambos modelos dentro de una única rutina operada por la API. Este módulo configura el solver `solve_ivp` con método BDF, adecuado para sistemas rígidos, acopla las condiciones del CSTR como entrada del PBR y genera los perfiles temporales y espaciales resultantes. Finalmente, estructura los datos en arreglos JSON listos para su visualización en el frontend.

La arquitectura propuesta permite una separación clara entre la interfaz de usuario, la lógica de comunicación y los modelos matemáticos. Esto favorece la modularidad del sistema, facilita la depuración en cada uno de sus componentes y permite la expansión futura del simulador hacia nuevas configuraciones operacionales o modelos adicionales.

13. RESULTADOS DE DESARROLLO DE LA PROPUESTA

El desarrollo de la propuesta permitió obtener resultados cuantitativos que validan la viabilidad del sistema integrado CSTR, PBR diseñado para la captura y aprovechamiento del CO₂. A partir de los parámetros iniciales establecidos en la simulación incluyendo un caudal de gas de 0,434 m³/min, una pureza del 90% de CO₂ y una biomasa inicial de 5 g/L fue posible reproducir el comportamiento dinámico del proceso bajo condiciones controladas.



CSTR (Absorción de CO₂)

1. Caudal Gas (m³/min) [0.434]:
0,434

2. Pureza CO₂ (y_CO2) [0.90]:
0,90

3. Coef. Transf. Masa (kLa, 1/min) [0.20]:
0,20

Imagen 7. parámetros de simulación CSTR (Absorción de CO₂)

Nota. Elaboración propia Simulación Fotobiorreactor

Gracias a ello se confirmó que la metodología de modelamiento planteada como se evidencia en las imágenes 7 y 8 de los parámetros de simulación, así como los supuestos teóricos incluidos, permiten evaluar de manera precisa el desempeño operativo del sistema frente a escenarios de alta concentración de carbono.

PBR (Biología y Energía)

4. Segmentos (N) [20]:
20

5. Biomasa Inicial (X0, g/L) [5.0]:
5,0

6. Tasa máx. Crecimiento (μ_{max} , 1/min) [0.012]:
0,012

7. Enfriamiento/Segmento (W/K) [187.5]:
187,5

8. Irradiancia (I_0 , $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) [1500.0]:
1500,0

Imagen 8. parámetros de simulación PBR (biología y energía)

Nota. Elaboración propia Simulación Fotobiorreactor

Asimismo, los resultados mostraron que el sistema logró una eficiencia de captura del **53,13%** como se muestra en la imagen 9, lo cual representa una reducción significativa del flujo de CO_2 inicial de 17,27 mol/min, alcanzando un consumo efectivo de 9,18 mol/min. Este comportamiento no solo demuestra que la celda de absorción y el fotobiorreactor trabajan de forma complementaria, sino que también evidencia que los parámetros de transferencia de masa empleados son suficientes para garantizar la solubilidad y posterior asimilación biológica del carbono. Paralelamente, se observó un incremento progresivo de la biomasa hasta alcanzar un valor promedio final de 40,836 g/L, reflejando que las microalgas no solo capturaron el CO_2 disponible, sino que lo transformaron de manera eficiente en biomasa útil y de alta productividad.

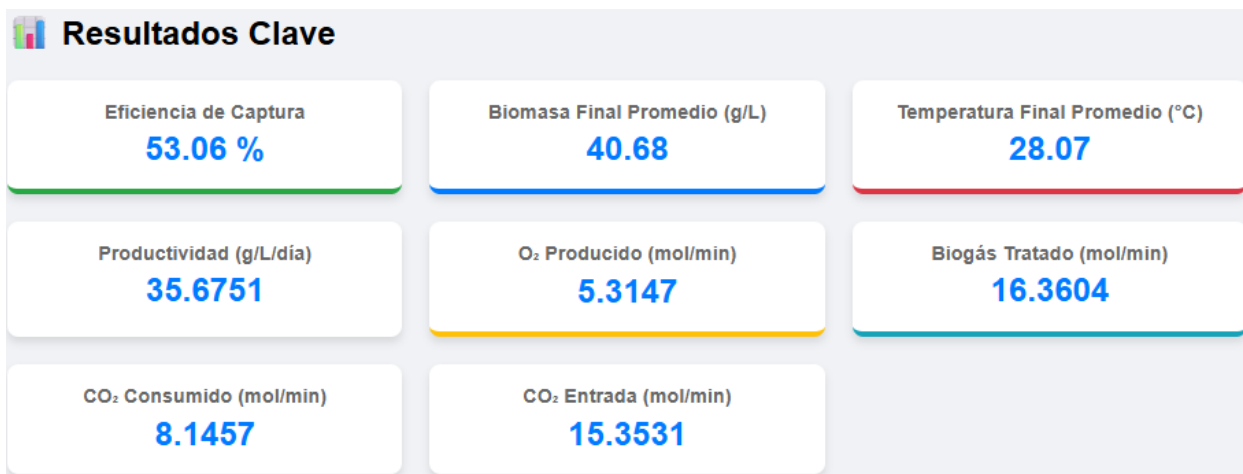
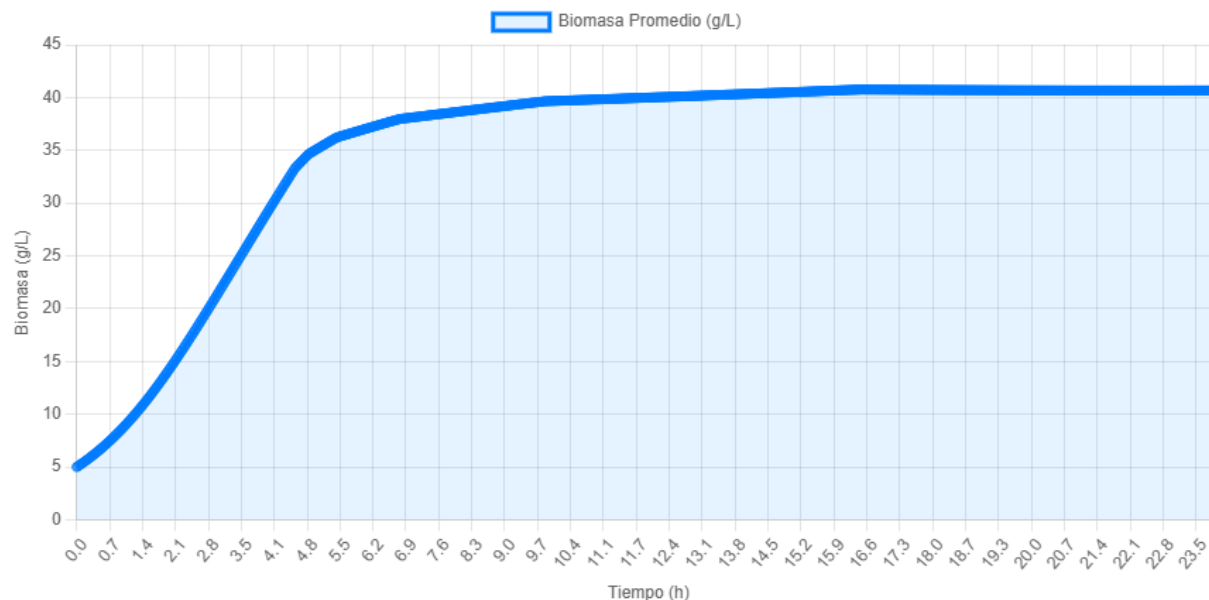


Imagen 9. Resultados de simulación

Nota. Elaboración propia Simulación Fotobiorreactor

El análisis temporal permitió evidenciar una evolución estable de las variables clave del sistema. La biomasa aumentó de forma rápida durante las primeras horas de operación hasta estabilizarse aproximadamente a partir de la hora 12, mientras que la temperatura mostró un comportamiento prácticamente constante alrededor de 32,09 °C. Este resultado indica que el módulo de enfriamiento segmentado cumplió su función, evitando acumulación térmica y garantizando condiciones óptimas para el cultivo microalgal. En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la propuesta desarrollada es técnicamente funcional, presenta estabilidad operacional y constituye una base sólida para su aplicación y futura escalabilidad en entornos urbanos.

Evolución de Biomasa Promedio (g/L)

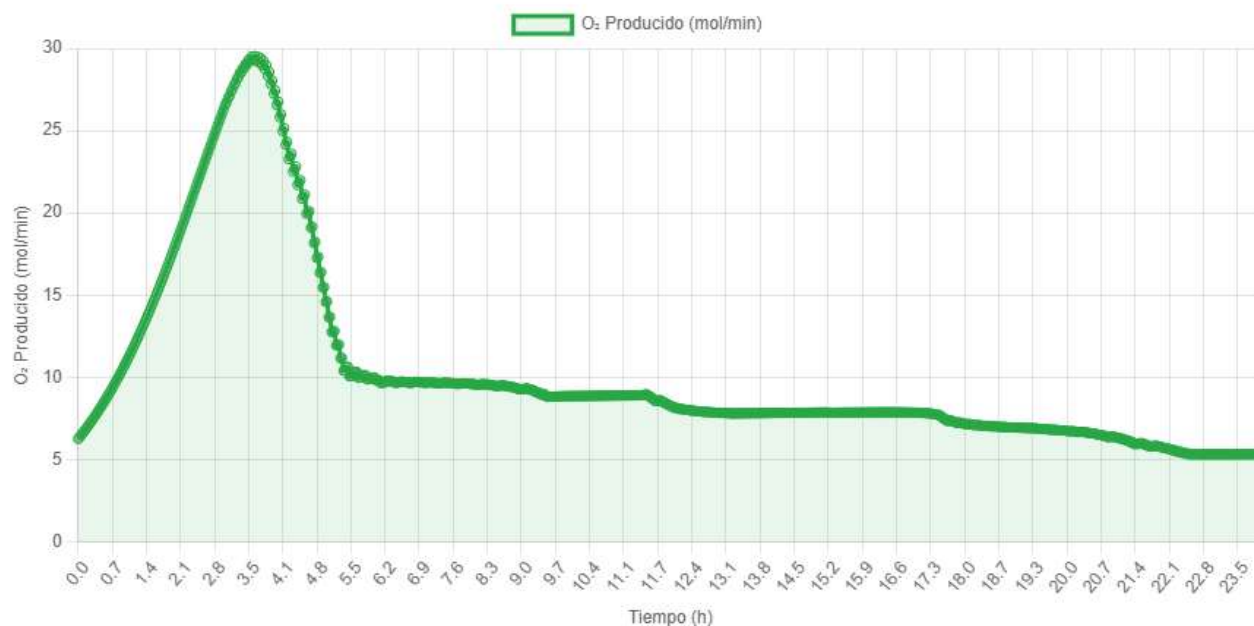


Gráfica 1. Evaluación de Biomasa (g/L)

Nota. Elaboración propia Simulación Fotobiorreactor

El comportamiento dinámico del sistema permitió identificar tendencias claras en las variables críticas del proceso. En la Gráfica 1 se evidencia que la biomasa incrementa rápidamente durante la fase inicial, alcanzando un nivel de estabilización que indica un equilibrio entre el crecimiento celular y la disponibilidad de recursos en el medio. Por otro lado, en la Gráfica 2 se observa que la producción de oxígeno presenta un máximo temprano y posteriormente tiende hacia un régimen estable, reflejando la transición natural del cultivo desde su máxima tasa fotosintética hacia un estado regulado por la densidad de biomasa y las condiciones internas del reactor. En conjunto, estos resultados muestran un sistema con comportamiento predecible, adecuado control operativo y potencial para ser optimizado en escenarios de aplicación real.

Evolución de Oxígeno Producido (mol/min)



Gráfica 2. Evaluación de Oxígeno producido (mol/min)

Nota. Elaboración propia Simulación Fotobiorreactor

Para la implementación del modelo acoplado CSTR–PBR se desarrolló un código estructurado en módulos independientes, donde cada uno contiene las ecuaciones diferenciales, parámetros y funciones auxiliares necesarias para la simulación. En este proceso se integraron librerías científicas como *NumPy* para el manejo de arreglos y operaciones vectorizadas, así como *SciPy* particularmente la función `solve_ivp` para resolver el sistema diferencial no lineal que describe el comportamiento dinámico del fotobiorreactor. Asimismo, se utilizaron *Pandas* para organizar los resultados en dataframes y facilitar su análisis, y *Matplotlib* para la construcción de gráficos que permiten visualizar la evolución temporal de la biomasa, el CO₂ disuelto y la temperatura. Todos estos componentes fueron articulados mediante funciones centralizadas en el módulo `utils`, donde se realizó la integración numérica completa y la generación automatizada de reportes.

Finalmente, se implementó una API funcional utilizando FastAPI, que permitió ejecutar el modelo desde una interfaz web y recibir parámetros del usuario en tiempo real mediante objetos de validación definidos con Pydantic. Esta estructura permitió encapsular la lógica de simulación en la función `run_pbr_simulation_logic`, la cual recibe las condiciones iniciales, ejecuta la integración acoplada y retorna métricas como eficiencia de captura, productividad de biomasa y comportamiento térmico. El uso de módulos específicos como `model_cstr` y `model_pbr`, garantizó que las ecuaciones fisicoquímicas y biológicas estuvieran bien separadas y organizadas, mientras que el módulo `utils` permitió un flujo ordenado para generar resultados, graficarlos y almacenarlos. En conjunto, el desarrollo del código integró herramientas modernas de programación científica, modelamiento dinámico y despliegue web, logrando un simulador robusto, reproducible y fácil de escalar.

14. ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis económico evalúa la viabilidad financiera de la tecnología de captura de CO₂ propuesta, la captura biológica con microalgas (*Chlorella vulgaris*). Se consideran los costos de capital (CAPEX), costos operativos (OPEX), costo nivelado por tonelada de CO₂ capturada y el retorno de inversión. Los cálculos se basan en datos de literatura reciente, ajustados al contexto colombiano con costos en pesos colombianos (COP) proyectados al 2025, considerando una inflación acumulada (IEA, 2023; IPCC, 2022). Se toma como referencia una planta termoeléctrica de 50 MW en el corredor vial del Cesar, con una capacidad de captura de 50.000 t CO₂/año, vida útil de 20 años y una tasa de descuento del 8%.

- **Costos de Capital (CAPEX):** Incluyen biorreactores fototrópicos, sistemas de iluminación LED, infraestructura para tratamiento de biomasa y manejo de aguas residuales. Se estima un costo de 800-1.200 millones COP/MW, equivalente a 40-60 billones COP para la planta completa. La integración con aguas residuales industriales reduce los costos de nutrientes en un 20-30%. Kumar et al. (2025) señalan que el uso de aguas residuales como fuente de nutrientes mejora significativamente la viabilidad económica de los biorreactores (Kumar et al., 2025).
- **Costos Operativos (OPEX):** Menor consumo energético (0.5-1 GJ/t CO₂), costos de mantenimiento de cultivos, cosecha y procesamiento de biomasa. Se estima un OPEX anual de 100-200 millones COP/MW. La producción de subproductos como biodiésel (20-30 t/año, valorados en 50 millones COP) contribuye a la rentabilidad. (Yahaya et al. 2025) destacan que los biorreactores cerrados, combinados con subproductos de alto valor, reducen los costos operativos en un 15-20% en regiones tropicales (Yahaya et al., 2025).
- **Costo por Tonelada de CO₂ Capturada:** Se calcula en 100.000-180.000 COP/t, con una eficiencia de captura del 70-80%. Los ingresos por subproductos reducen el costo neto a 50.000-100.000 COP/t.
- **Análisis de Sensibilidad:** La alta radiación solar en el Cesar incrementa la eficiencia fotosintética en un 10%, mientras que periodos de sequía podrían aumentar el OPEX en un 20% debido a la necesidad de agua adicional. La alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y posibles subsidios ambientales (Ley 2169/2021) fortalecen la viabilidad.

Como parte del proyecto macro de investigación, se había planteado un presupuesto para el desarrollo y aplicación de herramientas de simulación para el análisis de las tecnologías de CO₂, los valores de este se presentan en la tabla a continuación. En ese contexto global, los valores presentados representan el costo de la fase de modelación y simulación propuesto para robustecer el modelo planteado en el proyecto de investigación presentado.

Rubro	Valor estimado (COP)
Simulaciones computacionales y licencias	\$5.000.000
Horas docentes y mentoría técnica	\$8.000.000
Desarrollo de modelos conceptuales y visualizaciones	\$5.000.000
Socialización y redacción de informe final	\$2.000.000

Imagen 10. Presupuesto estimado del proyecto macro

Nota. Elaboración propia

Complementariamente se realizó un análisis económico por medio de un simulador financiero, este se realizó considerando un portafolio de 3 productos creados a partir del simulador, los precios por unidad se muestran a continuación con su respectiva participación porcentual en ventas totales estimadas.

NOMBRE DEL PRODUCTO O SERVICIO	MARGEN DE CONTRIBUCION		PARTICIPACION % EN VENTAS TOTALES	MARGEN DE CONTRIBUCION	
	UNITARIO			PONDERADO	
Licencia anual para uso del simu	\$	4.500.000,00	33%	\$	1.500.000,00
Taller para uso del simulador	\$	440.000,00	27%	\$	117.333,33
Consultorias de ingeniería	\$	6.000.000,00	40%	\$	2.400.000,00

Imagen 11. Portafolio de productos y su margen de contribución

Nota. Elaboración propia

A partir de estos valores se calculan valores claves como la tasa de evaluación del proyecto, la cual da una idea del riesgo de inversión en el proyecto, el valor presente neto, que permite evaluar los valores en términos del precio actual para hacer una comparación razonable. También se obtiene la tasa interna de retorno que indica la rentabilidad interna del proyecto, el periodo de recuperación que muestra en cuanto tiempo se empieza a obtener ingresos al recuperar lo invertido.



Imagen 12. Presupuesto estimado del proyecto macro.

Nota. Elaboración propia.

Los resultados del simulador financiero permiten ver la viabilidad del producto hasta el punto desarrollado, considerando solo la herramienta digital. Según estos resultados el proyecto es viable, y considerando el mercado objetivo los precios no son demasiado altos.

15. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

El análisis de sostenibilidad se realiza considerando el sistema de modelo de simulación de la ruta biológica, considerando los 3 pilares de la sostenibilidad, el impacto ambiental, social y económico, para así asegurar que su aporte sea equitativo, viable y vivible (Fernández &

Gutiérrez, 2013). A partir de este análisis integral, se pueden dimensionar los principales riesgos del proyecto y sus estrategias de mitigación.

Desde la perspectiva ambiental, el modelo de captura con microalgas es un aporte para incentivar proyectos de fijación biológica de CO₂ procedente de gases de chimenea, con el fin de disminuir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en fuentes estacionarias. Además, el sistema promueve la integración de corrientes de aguas residuales, aprovechando los nutrientes, como nitrógeno y fósforo, presentes para el crecimiento de las algas, lo que contribuye a la remoción de contaminantes y mejora de la calidad del agua en sistemas industriales e intermunicipales. Adicionalmente, presenta un esquema de economía circular, al usar los residuos del cultivo de *Chlorella vulgaris*, destinando esta biomasa para la producción de biodiesel o biofertilizante, permitiendo un sistema integrado de CCUS, tratamiento de aguas residuales y valorización de biomasa (Medrano et al., 2024).

Sin embargo, el planteamiento de proyectos de CCUS haciendo uso del simulador implica el riesgo de subestimar impactos ambientales reales de un futuro sistema real, generando vacíos de análisis de consumos de agua, energía o insumos y afectando índices de sostenibilidad teóricos y reales. Para mitigar este riesgo, se deben dejar claros los límites de aplicación del modelo y la necesidad de complementar el análisis de este con estudios específicos como análisis de ciclo de vida o evaluación de impacto ambiental.

Respecto a la parte económica, el modelo de simulación es una herramienta óptima para hacer la planeación y preparación teórica de un proyecto futuro, este permite ver si el modelo se adecua a las necesidades de la planta antes de realizar una inversión económica significativa, ahorrando así recursos materiales, humanos y tiempo. De este modo, se pueden descartar configuraciones poco atractivas del sistema, considerando los parámetros y condiciones

ambientales de la planta. Esto hace que se pueda asignar eficientemente el presupuesto planteado para un proyecto de CCUS en etapas tempranas, reduciendo los costos de investigación. Además de esto, el sistema de fotobiorreactores con cultivo de microalgas promueve un modelo de economía circular al aprovechar la biomasa restante que se inactiva después de su vida útil, estos residuos pueden ser utilizados en la fabricación de subproductos.

A pesar de esto, el modelo también implica riesgos económicos, ya que los resultados de estos se pueden sobrestimar al no contar con un análisis económico integrado, generando una incertidumbre asociada a los costos de inversión y mantenimiento. Además de esto, si bien se promueve el modelo de economía circular haciendo uso de la biomasa, no se puede predecir exactamente el comportamiento del mercado de estos productos.

Este riesgo se puede disminuir al considerar los rangos de valores presentados como valores de orientación y no como valores absolutos, también se deben implementar análisis de costos robustos que consideren los precios de la inversión inicial, los costos operativos, el consumo de recursos y esquemas de valorización de la biomasa.

Por último, se analiza la dimensión social, considerando que el modelo es solo una herramienta computacional y no un sistema físico, lo que implica que su implementación influye en el diseño y justificación de futuros proyectos de fijación de CO₂ en un territorio que ha presentado múltiples quejas por la situación de degradación ambiental actual. Esto es una gran ventaja para una propuesta de sistema CCUS, en una zona en la que no se han explorado estas alternativas.

Considerando lo anteriormente dicho, existen riesgos respecto a la democratización de la información por el uso y capacidad de entendimiento técnico del simulador, ya que es una

herramienta que exige conocimientos técnicos en áreas de matemáticas, química, programación y termodinámica, lo que puede afectar el proceso de transición energética (Bertinat, n.d.). Generando también desconfianza en los proyectos planteados debido al poco entendimiento de la herramienta considerando que en varios proyectos han reportado que la aceptación social de estos proyectos no se basa solo en los aspectos técnicos y económicos sino la transparencia de las decisiones tomadas (Gutiérrez Guerrero, 2025). La estrategia de mitigación para estos riesgos se concentra en la elaboración de material informativo en un lenguaje claro que explique que insumos da la herramienta y sus debilidades, además de esto se deben realizar talleres de capacitación para el entendimiento y uso del simulador, dejando claro que este se debe complementar con estudios.

El análisis de sostenibilidad permite predecir los impactos positivos de la herramienta, considerando sus limitaciones, fortalezas y debilidades, así como las estrategias de mitigación para cada una de estas. De esta manera, el modelo no es solo una herramienta de experimentación, sino que aporta para tomar decisiones informadas y promover proyectos de descarbonización.

16. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten analizar de manera crítica el comportamiento del sistema propuesto en Python y su relación con los objetivos planteados. En primera instancia, la eficiencia de captura del 53,13% evidencia que la combinación entre el reactor CSTR y el fotobiorreactor tubular constituye una estrategia técnicamente adecuada para manejar flujos de

CO₂ enriquecidos al 90%. Lo que significa que este valor se encuentra dentro de los rangos reportados para sistemas híbridos de absorción fisicoquímica y fijación microalgal, lo cual sugiere que el diseño del modelo reproduce adecuadamente fenómenos reales como transferencia de masa, solubilización y asimilación celular de carbono.

Del mismo modo, el incremento de la biomasa hasta de 40,836 g/L y la productividad de 35,836 g/L/día confirman que las microalgas operaron bajo condiciones cercanas a su rendimiento óptimo. La elevada irradiancia, el adecuado suministro de CO₂ y la estabilidad térmica contribuyeron directamente a este comportamiento, evitando caídas en la tasa de crecimiento y reduciendo la probabilidad de fenómenos de inhibición. En consecuencia, los resultados permiten afirmar que la propuesta no solo permite capturar una proporción considerable del CO₂ entrante, sino que además genera un subproducto valioso, (La biomasa microalgal) que puede ser destinado a aplicaciones energéticas o biotecnológicas, incrementando el valor agregado del sistema.

Finalmente, el contrastar los resultados con estudios existentes, se evidencia que el desempeño del sistema es competitivo y presenta ventajas particulares, especialmente en términos de estabilidad térmica y coherencia entre la absorción y el crecimiento biológico. Sin embargo, la eficiencia de captura observada también indica que aún existe un margen para optimizar el proceso mediante ajustes en el coeficiente KLa, la distribución de la luz interna o el régimen de flujo del gas.

17. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

Considerando el análisis técnico, ambiental y económico realizado se plantea un plan de implementación en fase piloto del proyecto de captura de CO₂ por ruta biológica. Este plan se organiza en 4 fases que consideran la transferencia, validación y uso práctico del modelo como herramienta de apoyo en la toma de decisiones en estrategias de des carbonación y proyectos CCUS.

- **Fase 1. Refinamiento y validación técnica del modelo:** Para asegurar la validez del modelo, este debe quedar técnicamente consolidado y validado frente a datos y criterios externos, esto mediante revisiones y ajustes a los supuestos del modelo como las condiciones de operación y parámetros utilizados mediante el contraste con los datos disponibles de la empresa.
- **Fase 2. Empaquetamiento del modelo:** Esta fase pretende convertir el modelo en un producto utilizable por terceros. Para esto, se debe elaborar un manual de usuario con descripción paso a paso de como ingresar datos y leer resultados, además de guías claras de parámetros de entrada, resultados de salida y ecuaciones internas. Por otro lado, se debe definir el formato de entrega según las necesidades del caso, como archivos ejecutables, hojas de cálculo o módulos de simulación, de manera que el modelo se pueda adaptar casos potenciales sin dependencia estricta de sus desarrolladores.
- **Fase 3. Piloto de uso en el corredor vial del Cesar:** Para esta fase se contempla una socialización del modelo de simulación con Gremca, con el fin de presentar los resultados de la investigación y evaluar su fiabilidad técnica en distintos escenarios. A

partir de esto se pueden identificar dificultades en el uso del modelo y funcionalidades adicionales útiles.

- **Fase 4. Estrategia de escalamiento y sostenibilidad del modelo:** Por último, se plantea una ruta para la extensión del modelo más allá del caso específico de la planta Gremca, para esto, se deben evaluar oportunidades como la adaptación del modelo a otras plantas del Cesar, incorporación de la herramienta en procesos de formulación de proyectos ambientales o posibles articulaciones con programas a nivel sectorial.

18. CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto permitió consolidar una comprensión integral sobre la captura de CO₂ en el corredor vial del Cesar, demostrando que el análisis combinado entre absorción química y captura biológica aporta una visión más completa del problema y de sus posibles soluciones. A partir de las simulaciones, los parámetros evaluados y la revisión técnica, se logró confirmar que ambas alternativas poseen una base científica y operativa suficientemente robusta para ser consideradas dentro de un escenario real de implementación. Sin embargo, los resultados también evidenciaron que su pertinencia depende de las características específicas del territorio, del tipo de fuente emisora y de los objetivos ambientales que se busquen priorizar, lo cual reitera la necesidad de enfoques adaptativos y no de soluciones únicas o rígidas.

Por otra parte, el estudio evidenció que las condiciones ambientales características del Cesar influyen de manera significativa en el desempeño global de las alternativas evaluadas. La combinación de temperaturas elevadas, alta radiación solar y variabilidad atmosférica condiciona

la eficiencia y estabilidad de los procesos, generando distintos niveles de respuesta según el tipo de tecnología. Mientras la absorción química mantiene una operación estable gracias al control interno del proceso, la captura biológica mostró un potencial considerable siempre que se ajusten adecuadamente los parámetros del fotobiorreactor. Este comportamiento confirma que la selección tecnológica no puede desligarse del análisis climático, ya que es justamente esta interacción la que determina la eficiencia real y la sostenibilidad operativa en el largo plazo.

El proyecto también permitió comprobar que la integración entre modelamiento matemático, simulación computacional y análisis contextual se constituye en una metodología esencial para orientar decisiones informadas en materia de mitigación de CO₂. Los resultados obtenidos respaldan la validez de los modelos, demuestran la coherencia del enfoque empleado y ofrecen criterios técnicos útiles para el diseño de posibles planes piloto en territorios con dinámicas similares al corredor vial del Cesar. En conjunto, las conclusiones alcanzadas consolidan un marco metodológico robusto que puede servir como base para investigaciones futuras, ampliando la capacidad regional para implementar soluciones sostenibles, escalables y alineadas con las necesidades ambientales y productivas de la zona.

19. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Mechanical Engineers. (2006). *ASME PTC 47-2006: Integrated Gasification Combined Cycle Plants*. ANSI.
<https://webstore.ansi.org/standards/asme/asmeptc472006>
- Abanades, J. C., Alonso, R., Casero, P., & Corstess, V. (2015). *CO₂ capture technology at high scale – Spanish (Captura CO₂: tecnologías para una captación a gran escala)*. PETCO₂. Recuperado de
[https://www.researchgate.net/publication/272496993_CO2_Capture_technology_at_high_scale - Spanish Captura CO2 tecnologías para una captacion a gran escala](https://www.researchgate.net/publication/272496993_CO2_Capture_technology_at_high_scale_-_Spanish_Captura_CO2_tecnologias_para_una_captacion_a_gran_escala)
- Coconi Morales, E. (2017). *Tecnología de captura, uso y almacenamiento de CO₂ (CCUS) con registros geofísicos de pozos*. México.
[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58297812/Tecnologia_de_captura_uso_y_almacenamiento_de_CO2_CCUS_con_registros_geofisicos_de_pozos -
_Dr._Enrique_Coconi_Morales-libre.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58297812/Tecnologia_de_captura_uso_y_almacenamiento_de_CO2_CCUS_con_registros_geofisicos_de_pozos_-_Dr._Enrique_Coconi_Morales-libre.pdf)
- International Organization for Standardization. (2019). *ISO 27916:2019: Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO₂-EOR)*. ISO. <https://www.iso.org/standard/65937.html>

- International Organization for Standardization. (2019). *ISO 14064-2:2019: Greenhouse gases — Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements*. ISO. <https://www.iso.org/standard/66454.html>
- Webb, P. A. (2003). *Introduction to chemical adsorption analytical techniques and their applications to catalysis*. Micromeritics.
<https://micromeritics.com/es/resources/introduction-to-chemical-adsorption-analytical-techniques-and-their-applications-to-catalysis/>
- Adams, T. A., Hoseinzade, L., Madabhushi, P. B., & Okeke, I. J. (2017). Comparison of CO₂ capture approaches for fossil-based power generation: Review and meta-study. *Processes*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/PR5030044>
- Angie Nicolle Alvira González. (2024). *Optimización de Condiciones Técnicas para el Cultivo de Microalgas Bajo Condiciones*.
- Bertinat, P. (n.d.). *Transición energética justa. I Pensando la democratización energética*.
- Borhani, T. N., Abbasi, M. R., Hosseinpour, M., Salimi, M., Afkhamipour, M., Oko, E., Campbell, K. S., & Kahllaghi, N. (2024). CO₂ absorption-desorption cycles: Progress,

gaps, and future. *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100325.

<https://doi.org/10.1016/J.CCST.2024.100325>

- *CCUS technology innovation – CCUS in Clean Energy Transitions – Analysis - IEA.* (n.d.). Retrieved October 1, 2025, from <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-technology-innovation>
- Cesar Ararat Orozco Ingeniero Agrónomo Ph, M. D., Eduardo Sanclemente Reyes Ingeniero Ambiental Ph, O. D., & Vergara Patiño, L. (2020). Perspectivas industriales en tecnologías de biofijación de CO2 por microalgas. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, 4(1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.3481>
- *Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor Normativo - Función Pública.* (n.d.). Retrieved September 10, 2025, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- *Energías Renovables - Gremca S.A.* (n.d.). Retrieved November 17, 2025, from https://gremca.com.co/energias_renovables/
- Fernández, L., & Gutiérrez, M. (2013). *Bienestar Social, Económico y Ambiental para las Presentes y Futuras Generaciones.* 24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200013>

- Giraldo Rave, A. (2013). *Evaluación de cepas de microalgas para captura de CO₂*. Universidad EAFIT. <https://hdl.handle.net/10784/7377>
- Gurucharri Fernández, S. (2012). *Comparativa de métodos de control en análogos naturales para su posterior aplicación en proyectos de captura y almacenamiento de Co₂*.
- Gutiérrez Guerrero, S. (2025). *Determinación del panorama de oportunidades para la implementación de CCUS (carbon capture, utilization, and storage) en Colombia*. <https://hdl.handle.net/20.500.12834/2099>
- *Institucional*. (n.d.). Retrieved September 10, 2025, from <https://cesar.gov.co/d/es/mengobmanu/45-institucional?start=20>
- *ISO 45001:2018(es), Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo — Requisitos con orientación para su uso*. (n.d.). Retrieved October 1, 2025, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:es>
- Kunze, C., & Spliethoff, H. (2012). Assessment of oxy-fuel, pre- and post-combustion-based carbon capture for future IGCC plants. *Applied Energy*, 94, 109–116. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.01.013>

- *Ley 1931 de 2018 - Gestor Normativo - Función Pública.* (n.d.). Retrieved September 10, 2025, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87765>
- *LEY 2169 DE 2021.* (n.d.). Retrieved September 10, 2025, from <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30043747>
- Luccini, E., Flores, M., Ramírez, K., Pérez Pinedo, H., Herrera, L. A., Parodi, M., Matar, M., Gómez Insausti, J., Barrea, L., Mechini, M., & Calcagno, G. (2018). Análisis comparativo de la captura y almacenamiento de CO₂ por especies vegetales de tres ecosistemas en Perú. *Energeia, Vol. 15, N° 15, 2018, 15.*
<https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/5870>
- Medrano, J. L., Directoras, B., Rodríguez, R., María, E., & Morales Pérez, V. (2024). *Biorrefinería de microalgas: una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales de origen industrial y la valorización energética de la biomasa obtenida.* Universidad Rey Juan Carlos. <https://hdl.handle.net/10115/37076>
- Morales, E. C. (2017). *Tecnología de Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂ (CCUS) con Registros Geofísicos de Pozo.*
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58297812/Tecnologia_de_captura_uso_y_almacenamiento_de_CO2_CCUS_con_registros_geofisicos_de_pozos_-_Dr._Enrique_Coconi_Morales-libre.pdf?1548896322=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTecnologia_de_captura_uso_y_almacenamien.pdf&Expires=1755064767&Signature=J3L9nCrkxpFS4n98Uy57u~0gqXzkxvZoyQbhrjKbr

Vi-

miF7hiNGLtQ6nMrSBjyOX3MBH0mvn7vq3YYv8XfDD3ckXze8G8r6lXdJKzvnZXoq

MU0cVxXIUejU~utyC-

97cm422TQ87WYaRP3fXIUm34NK6gsh18JfhohZBKhadS4jHcev2Q5lOFsdEGJl5XLaj

hGemhbtew6GBRGOSsDxje7XTNt9v1xh2xA81lPyiRraD-

aoD9uTxrVUxHtnQMpe0kje39aoNrCfPj-8oDqRytME09kDHpKL5Zc4EJ9MbUg-

T4nSojgXwB88t0JR50RZkxocRGxEbleKUXpPDzfc8w_&Key-Pair-

Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- Paredes Rincon, K. J. (2020). *Análisis de los impactos ambientales que genera la actividad petrolera en el corregimiento de Cuatro Bocas municipio de San Martín departamentos del Cesar, Colombia*. 1.
<https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/4738>
- *Power Block of an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant | 2015 | PDF | ASME*. (n.d.). Retrieved October 1, 2025, from <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/power-block-of-an-integrated-gasification-combined-cycle-power-plant/2015/pdf>
- *Pronóstico del tiempo por hora para Valledupar, Cesar, Colombia: The Weather Channel | Weather.com*. (n.d.). Retrieved September 10, 2025, from <https://weather.com/es-US/tiempo/horario/l/Valledupar+Cesar+Colombia?canonicalCityId=e06ab6c1b13b3c152bd58e2b14464ec8>

- *Pronóstico del tiempo y condiciones meteorológicas para La Paz, Cesar, Colombia: The Weather Channel | Weather.com.* (n.d.). Retrieved September 10, 2025, from <https://weather.com/es-GT/tiempo/hoy/1/1b3f221b00aaab7221d025485608b86b43914ed8e85bddba90bf4acf51e29d66>
- Rezvani, S., Moheimani, N. R., & Bahri, P. A. (2016). Techno-economic assessment of CO₂ bio-fixation using microalgae in connection with three different state-of-the-art power plants. *Computers and Chemical Engineering*, 84, 290–301. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2015.09.001>
- U.S. Energy Information Administration. (2023). *Frequently Asked Questions (FAQs) - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>