

TÉCNICAS EMERGENTES DE CAPTURA DE CO₂ Y SU IMPACTO EN LA
REDUCCIÓN DE EMISIONES.

Laura Daniela Jiménez Rodríguez y Laura Ximena Hernández Mantilla

Trabajo de Grado para Optar por el Título Ingenieras Metalúrgicas

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

PhD. Corrosión

Codirector

Juan Carlos Orozco

M.Sc. Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, quienes fueron mi apoyo constante y mi mayor motivación a lo largo de este proceso. Gracias a su amor, compañía y confianza, he podido formarme no solo como profesional, sino también como persona. Por ellos soy la mujer que soy hoy y me encuentro a punto de cumplir uno de los sueños más importantes de mi vida.

Laura Daniela Jiménez Rodríguez

A mis padres y hermanas, por su amor, apoyo y confianza incondicional en cada etapa de este camino. A mi hija, mi mayor motivación y la fuerza que me impulsó a no rendirme. Gracias por darme el ánimo y la fortaleza para culminar mis estudios como ingeniera metalúrgica.

Este logro también es de ustedes.

Laura Ximena Hernández Mantilla

Agradecimientos

A Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesaria para culminar esta etapa tan importante de mi vida, incluso en los momentos de mayor dificultad. A mi mamá, por su amor incondicional, paciencia infinita y apoyo constante. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por ser mi motor y mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación. A mi papá, por su apoyo constante, sus consejos y su confianza. Aun sin compartir la misma sangre, siempre me brindó su cariño y respaldo como un verdadero padre, acompañándome en los momentos más difíciles y siendo un pilar fundamental para alcanzar este logro. A mi hermana, por su compañía, apoyo y palabras de aliento a lo largo de este proceso, haciendo más llevadero cada desafío. Espero poder ser un buen ejemplo a seguir para ella. A mi abuela, por su amor, cuidado y sabiduría, y por ser una fuente constante de ánimo y ternura en mi vida.

Finalmente, a mi perrita Frozen, quien me acompañó silenciosamente durante largas jornadas de estudio, brindándome compañía y cariño incondicional, siendo un apoyo especial en cada etapa de este largo camino.

Laura Daniela Jiménez Rodríguez

Expreso mi más sincero y profundo agradecimiento a mis padres, quienes han sido mi principal apoyo y fortaleza a lo largo de este proceso académico. Gracias por su amor incondicional, por creer en mí en todo momento y por inculcarme valores como la perseverancia, el esfuerzo y la determinación, que fueron fundamentales para alcanzar este logro. A mis hermanas, agradezco su paciencia, comprensión y acompañamiento constante, así como el ánimo y la fortaleza que me brindaron, especialmente durante los últimos semestres de mis estudios, una

etapa significativa en la que enfrenté nuevos retos personales. Su apoyo y confianza me demostraron que, con amor y acompañamiento, cualquier desafío puede transformarse en una motivación para seguir adelante.

Asimismo, expreso mi gratitud a mis amigos, con quienes compartí esfuerzos, aprendizajes y experiencias que enriquecieron mi formación profesional. Su compañerismo y apoyo hicieron este camino más llevadero. Este trabajo representa no solo la culminación de mis estudios como ingeniera metalúrgica, sino también el reflejo del apoyo, la confianza y el compromiso de todas las personas que contribuyeron a hacer posible este logro.

Laura Ximena Hernández Mantilla

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo General	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. Marco teórico	16
2.1. Antecedentes	16
2.1.a. Antecedentes internacionales.....	16
2.1.b. Antecedentes nacionales	17
2.2. Referentes	18
2.2.a. Gases de efecto invernadero	18
2.2.b. Huella de carbono	19
2.2.c. Cambio climático	20
2.2.d. Captura de CO ₂	20
2.2.e. Sistemas de captura de dióxido de carbono (CO ₂).....	21
2.2.f. Captura postcombustión.....	21
2.2.g. Captura precombustión	22
2.2.h. Captura Directa del Aire (DAC)	22
2.2.i. Absorbentes y adsorbentes.....	22
2.2.j. Tecnologías Emergentes de Captura de CO ₂	23
3. Diseño metodológico	23
3.1. Tipo de investigación	23

3.2. Caracterización de la población	24
3.3. Técnicas e instrumentos para implementar en el desarrollo de los objetivos	25
3.3.a. Primer objetivo. Revisar y compilar las principales técnicas emergentes de captura de CO ₂ , con el fin de evaluar su grado de desarrollo y su potencial impacto en la reducción de emisiones, como estrategia para mitigar el cambio climático.....	25
3.3.b. Segundo objetivo. Identificar y comparar las diferentes técnicas emergentes de captura de CO ₂ considerando desafíos como rendimiento, costos y la viabilidad de su implementación a gran escala en distintos contextos (industrial, energético y ambiental)	26
3.3.c. Tercer objetivo. Analizar el potencial de las técnicas emergentes para contribuir a la reducción global de emisiones de CO ₂ , dentro del marco de los objetivos climáticos internacionales. 26	
4. Resultados	27
4.1. Objetivo 1. Revisar y compilar las principales técnicas emergentes de captura de CO ₂ , con el fin de evaluar su grado de desarrollo y su potencial impacto en la reducción de emisiones, como estrategia para mitigar el cambio climático.	27
4.1.a. Revisión bibliográfica en base de datos.....	27
4.1.b. Compilación de estudios de las principales técnicas emergentes de captura de CO ₂	33
4.2. Objetivo 2. Determinar Identificar y comparar las diferentes técnicas emergentes de captura de CO ₂ considerando desafíos como rendimiento, costos y la viabilidad de su implementación a gran escala en distintos contextos (industrial, energético y ambiental)	39
4.2.a. Clasificación de técnicas emergentes según su rendimiento, costos y escalabilidad.....	39

4.3. Objetivo 3. Analizar el potencial de las técnicas emergentes para contribuir a la reducción global de emisiones de CO ₂ , dentro del marco de los objetivos climáticos internacionales.	47
4.3.a. Análisis de viabilidad de las técnicas emergentes y su impacto en la reducción global de emisiones.....	47
4.3.b. Integración de los resultados para la evaluación de las contribuciones potenciales a los objetivos climáticos internacionales.....	49
5. Conclusiones	51
6. Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	55

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1 <i>Clasificación de las tecnologías de captura de CO₂ según el tipo de proceso.</i>	29
Figura 2 <i>Gráfico de barras donde se compara las técnicas emergentes de captura de CO₂.</i>	45

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. <i>Recopilación de técnicas emergentes de captura de CO₂</i>	33
Tabla 2. <i>Comparación de las técnicas emergentes según rendimiento, costo y</i> <i>viabilidad.</i>	43
Tabla 3 <i>Técnicas de captura y su contribución al cumplimiento de los objetivos</i> <i>climáticos internacionales.</i>	50

Glosario

- **Absorbentes:** materiales que capturan CO₂ mediante una reacción química, como las soluciones de aminas.
- **Adsorbentes:** materiales que capturan CO₂ a través de fuerzas físicas, sin que ocurra una reacción química. Ejemplos incluyen carbón activado y zeolitas.
- **Captura de CO₂:** proceso tecnológico para separar y almacenar el dióxido de carbono de las emisiones industriales antes de que sea liberado a la atmósfera.
- **Captura PostCombustión:** técnica que captura CO₂ de los gases de escape resultantes de la quema de combustibles fósiles.
- **Captura PreCombustión:** técnica que separa CO₂ antes de que los combustibles fósiles sean quemados, produciendo una mezcla de CO₂ e hidrógeno.
- **Captura Directa del Aire (DAC):** tecnología emergente que captura CO₂ directamente de la atmósfera.
- **Dióxido de Carbono (CO₂):** gas de efecto invernadero producido principalmente por la quema de combustibles fósiles y la deforestación, contribuyendo al cambio climático.
- **Gases de Efecto Invernadero (GEI):** gases que atrapan el calor en la atmósfera, contribuyendo al cambio climático. Ejemplos incluyen CO₂, metano (CH₄), y óxidos de nitrógeno (NO_x).
- **Huella de Carbono:** medición de la cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos, directamente o indirectamente, por las actividades humanas.
- **Tecnologías Emergentes:** nuevas técnicas y materiales en investigación que mejoran la eficiencia y reducen los costos de captura de CO₂.

Resumen

Título: Técnicas emergentes de captura de CO₂ y su impacto en la reducción de emisiones.

Autores: Laura Daniela Jiménez Rodríguez y Laura Ximena Hernández Mantilla.

Palabras claves: Cambio climático, emisiones, tecnologías emergentes, mitigación, gases.

Descripción: El cambio climático, impulsado principalmente por el aumento de los gases de efecto invernadero, es una de las mayores crisis ambientales de la era contemporánea. El dióxido de carbono (CO₂) es el gas con mayor contribución a este fenómeno, y su acumulación en la atmósfera es resultado, en gran medida, de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación. Frente a esta realidad, la captura y almacenamiento de CO₂ se ha convertido en una estrategia clave para mitigar las emisiones de este gas y, por ende, combatir el cambio climático.

Este estudio se enfoca en la evaluación de las técnicas emergentes de captura de CO₂, un campo de investigación que busca mejorar la eficiencia, reducir los costos y ampliar la viabilidad de estas tecnologías. A través de una revisión bibliográfica, se identifican y analizan diversas tecnologías, como la absorción química, adsorción, captura directa del aire (DAC), y otras innovaciones en fase de investigación. El análisis aborda el grado de desarrollo de cada técnica, sus rendimientos, costos operativos y los desafíos que enfrentan para su escalabilidad en diferentes sectores industriales, como el energético, el químico y el de la cementera.

Además, se evalúan las oportunidades y barreras que estas tecnologías pueden presentar en términos de su adopción a gran escala, así como su alineación con los objetivos climáticos internacionales, como los establecidos en el Acuerdo de París. Este trabajo tiene como objetivo proporcionar un análisis detallado de las tecnologías emergentes, contribuyendo a la identificación de las soluciones más prometedoras para reducir las emisiones globales de CO₂ y lograr un futuro más sostenible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Dario Yesid Peña Ballesteros. PhD. Corrosión. Codirector: Juan Carlos Orozco. M Sc. Químico.

Abstract

Title: Emerging CO₂ capture techniques and their impact on emission reduction.

Author(s): Laura Daniela Jiménez Rodríguez, Laura Ximena Hernández Mantilla.

Key Words: Climate change, emissions, emerging technologies, mitigation, gases.

Description: Climate change, driven primarily by the increase in greenhouse gases, is one of the greatest environmental crises of the modern era. Carbon dioxide (CO₂) is the gas that contributes most to this phenomenon, and its accumulation in the atmosphere is largely a result of human activities such as the burning of fossil fuels and deforestation. In light of this reality, CO₂ capture and storage has become a key strategy for mitigating emissions of this gas and, consequently, combating climate change.

This study focuses on evaluating emerging CO₂ capture techniques, a field of research that seeks to improve efficiency, reduce costs, and expand the viability of these technologies. Through a literature review, various technologies are identified and analyzed, including chemical absorption, adsorption, direct air capture (DAC), and other innovations in the research phase. The analysis addresses the stage of development of each technique, its performance, operating costs, and the challenges it faces in scaling up across different industrial sectors, such as energy, chemicals, and cement.

Furthermore, it assesses the opportunities and barriers these technologies may present in terms of their large-scale adoption, as well as their alignment with international climate goals, such as those established in the Paris Agreement. This work aims to provide a detailed analysis of emerging technologies, contributing to the identification of the most promising solutions for reducing global CO₂ emissions and achieving a more sustainable future.

* Degree work.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Dario Yesid Peña Ballesteros, Ph.D (Corrosion). Codirector: Juan Carlos Orozco, M.Sc (Chemist).

Introducción

El cambio climático se ha consolidado como una de las principales crisis globales del siglo XXI, cuyo impacto ha alterado los patrones meteorológicos y ecosistemas, afectando a comunidades, economías y especies a nivel mundial (Pörtner et al., 2022). En este contexto, la acumulación de gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono (CO₂), ha sido identificada como uno de los principales motores del calentamiento global. La quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras actividades humanas han incrementado las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, lo que ha resultado en un aumento de las temperaturas globales y en una serie de efectos adversos, como el derretimiento de los casquetes polares, la alteración de los patrones climáticos y la pérdida de biodiversidad (Friedlingstein et al., 2024; Le Quéré et al., 2018; Pörtner et al., 2022).

En respuesta a este fenómeno, la captura y almacenamiento de CO₂ se presenta como una estrategia esencial para mitigar el cambio climático, especialmente en sectores donde la descarbonización es más difícil de lograr, como la industria energética y el sector industrial. Si bien existen diversas tecnologías convencionales para la captura de CO₂, muchas de ellas presentan limitaciones económicas y operativas que dificultan su adopción masiva (Queijo Fraga, 2017; Santos, 2025). Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías emergentes en este campo se vuelve fundamental para mejorar la eficiencia, reducir costos y aumentar la viabilidad de la captura de CO₂ en un rango más amplio de sectores industriales.

El objetivo de este estudio es evaluar las técnicas emergentes de captura de CO₂, identificando su grado de desarrollo y su impacto potencial en la reducción de emisiones, con el fin de aportar a la lucha contra el cambio climático. A través de una revisión bibliográfica

exhaustiva, se analizarán diversas tecnologías, como la absorción química, la adsorción, la captura directa del aire y otras innovaciones que están siendo investigadas a nivel global. Este trabajo también evaluará las barreras económicas y técnicas de estas tecnologías, proporcionando un análisis crítico que servirá como base para futuras investigaciones y decisiones políticas relacionadas con la mitigación del cambio climático.

Además, este estudio busca ofrecer una visión clara de las oportunidades y desafíos que enfrentan las técnicas emergentes de captura de CO₂, evaluando su aplicabilidad a gran escala y su alineación con los objetivos climáticos internacionales, como el Acuerdo de París. La implementación efectiva de estas tecnologías podría ser un paso crucial en la consecución de una economía baja en carbono, contribuyendo a la reducción de emisiones de CO₂ y al cumplimiento de los compromisos globales en materia de cambio climático.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar las técnicas emergentes de captura de dióxido de carbono (CO₂), para analizar su grado de desarrollo y el potencial impacto en la reducción de emisiones, como estrategia de mitigación del cambio climático.

1.2. Objetivos Específicos

Revisar y compilar las principales técnicas emergentes de captura de CO₂, con el fin de evaluar su grado de desarrollo y su potencial impacto en la reducción de emisiones, como estrategia para mitigar el cambio climático.

Identificar y comparar las diferentes técnicas emergentes de captura de CO₂ considerando desafíos como rendimiento, costos y la viabilidad de su implementación a gran escala en distintos contextos (industrial, energético y ambiental).

Analizar el potencial de las técnicas emergentes para contribuir a la reducción global de emisiones de CO₂, dentro del marco de los objetivos climáticos internacionales.

2. Marco teórico

Este marco teórico proporcionará los fundamentos conceptuales y técnicos necesarios para entender las técnicas emergentes de captura de CO₂ y su impacto en la reducción de emisiones. Servirá como base para evaluar las diferentes tecnologías y su viabilidad en el contexto de la mitigación del cambio climático, facilitando un análisis integral de sus beneficios y desafíos. Por lo tanto, es fundamental comprender el entorno en el que se desarrollarán estas soluciones.

2.1. Antecedentes

2.1.a. *Antecedentes internacionales*

En el ámbito global, la investigación y desarrollo de técnicas emergentes para la captura de dióxido de carbono (CO₂) han avanzado significativamente en los últimos años, impulsados por la necesidad urgente de mitigar el cambio climático (Queijo Fraga, 2017). Un estudio reciente de Guha (2025) ofrece una revisión exhaustiva de las técnicas avanzadas de captura de CO₂, destacando métodos como la absorción, adsorción, separación por membranas, y nuevas tecnologías emergentes como la captura directa del aire (DAC). Este análisis subraya los avances en la eficiencia de estas tecnologías, a medida que los investigadores buscan mejorar su viabilidad y rentabilidad, especialmente en aplicaciones a gran escala. Sin embargo, también se identifican desafíos clave, como la necesidad de reducir los costos operativos y superar las barreras técnicas asociadas con la implementación masiva en diferentes industrias (Guha et al., 2025).

Por otro lado, la Agencia Internacional de Energía informó que la base de datos mundial CCUS Projects Database registra 959 proyectos de captura, utilización y almacenamiento de

carbono (CCUS) en distintas etapas de desarrollo, incluyendo proyectos operativos, en construcción y en planificación (IEA, 2026). Este crecimiento refleja el creciente compromiso de gobiernos e industrias con la implementación de tecnologías de captura de carbono para avanzar en la descarbonización de sectores de difícil mitigación. No obstante, la IEA señala que aún persisten desafíos relacionados con la viabilidad económica, la escalabilidad, el desarrollo de infraestructura para el transporte y almacenamiento de CO₂ y la consolidación de marcos regulatorios y mecanismos de financiamiento que permitan acelerar el despliegue de estas tecnologías a nivel mundial (IEA, 2026).

Estas iniciativas internacionales no solo reflejan el compromiso con la adopción de técnicas emergentes de captura de CO₂, sino que también subrayan el papel crucial que juegan en la estrategia global de mitigación del cambio climático. Los esfuerzos conjuntos entre gobiernos, empresas y organismos internacionales proporcionan una base sólida para seguir impulsando la investigación y la implementación de estas tecnologías a nivel mundial, con el propósito de alcanzar los objetivos climáticos internacionales y reducir significativamente las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Marzouk, 2025).

2.1.b. Antecedentes nacionales

En Colombia, la preocupación por el cambio climático ha impulsado el estudio y la implementación de tecnologías de captura de CO₂, en línea con los compromisos internacionales del país para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Diversos estudios nacionales han comenzado a explorar el potencial de estas tecnologías, particularmente en sectores industriales de alta emisión, como la extracción de petróleo y la generación de energía. En la investigación de (Gutiérrez Guerrero, 2025) se detallan los avances sobre la captura y

almacenamiento de CO₂ en Colombia, donde se destacan los primeros proyectos piloto en la industria petrolera, así como los estudios sobre la viabilidad de la implementación de estas tecnologías en el contexto nacional. Según este informe, las principales barreras para su adopción incluyen los altos costos de infraestructura y la falta de políticas públicas claras para incentivar su desarrollo. Sin embargo, se reconoce que las técnicas emergentes, como la captura directa del aire y el uso de materiales adsorbentes avanzados, presentan un gran potencial para contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ en el país, especialmente en sectores donde la transición hacia energías renovables es más compleja.

De acuerdo con Gutiérrez guerreo (2025), es crucial que Colombia aproveche su capacidad para desarrollar e implementar estas tecnologías de manera que se alineen con los objetivos climáticos internacionales y las necesidades del mercado local (2025).

2.2.Referentes

El CO₂ es un gas compuesto por dos átomos de oxígeno y uno de carbono, en condiciones estándar tiene características de ser un gas incoloro, inodoro e incombustible. Tiene un peso molecular de 44 g/mol; es utilizado en la industria farmacéutica, constructora y principalmente la alimentaria (Liu et al., 2023; National Center for Biotechnology Information, 2026). Se produce principalmente por la actividad humana, el desarrollo industrial y energético, es uno de los principales influyentes del efecto invernadero; a nivel mundial se realizan estudios y grandes inversiones económicas para reducir la emisión de CO₂ al ambiente, esto en el marco del desarrollo sostenible de los distintos procesos (Saravanan A et al., 2021).

2.2.a. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes gaseosos presentes en la atmósfera que tienen la capacidad de retener el calor del sol, contribuyendo al efecto invernadero que

mantiene la temperatura de la Tierra en un rango adecuado para la vida. Estos gases incluyen el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros compuestos como los gases fluorados. El aumento de la concentración de estos gases, principalmente debido a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, ha llevado a un desequilibrio en el efecto invernadero natural, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático (EPA, 2025; National Center for Biotechnology Information, 2026).

Los gases de efecto invernadero (GEI) presentes en la atmósfera terrestre incluyen el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el ozono (O₃), además de otros compuestos de origen antropogénico como los halocarbonos, los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆) (IDEAM et al., 2016). Aunque el vapor de agua es el principal responsable del efecto invernadero natural y resulta indispensable para la vida, el incremento de las concentraciones de los demás GEI, asociado principalmente a las actividades humanas, ha intensificado el calentamiento global. Por ello, la reducción de las emisiones de estos gases es una de las principales estrategias para mitigar el cambio climático y disminuir sus efectos sobre el sistema climático (Stocker et al., 2013).

2.2.b. Huella de carbono

La huella de carbono se refiere a la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) liberados a la atmósfera como resultado directo o indirecto de las actividades humanas, además representa la medida de la contribución individual o colectiva al cambio climático y se expresa en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) (EPA, 2025).

2.2.c. Cambio climático

La relación entre la huella de carbono y el cambio climático es estrecha y significativa. El aumento de las emisiones de GEI, especialmente dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), debido a la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva y otras actividades humanas, ha llevado a un aumento en la concentración de estos gases en la atmósfera. Esto ha desencadenado el fenómeno del calentamiento global, que es la principal causa del cambio climático actual (Pathak et al., 2022).

Las emisiones de GEI atrapan el calor en la atmósfera, lo que provoca un aumento de la temperatura promedio en el planeta. Esto desencadena una serie de efectos adversos, como el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar, eventos climáticos extremos más frecuentes e intensos, cambios en los patrones de precipitación y la alteración de los ecosistemas naturales (Friedlingstein et al., 2023; Stocker et al., 2013).

2.2.d. Captura de CO₂

La captura de dióxido de carbono (CO₂) es el proceso tecnológico diseñado para separar y capturar este gas de efecto invernadero antes de que sea liberado a la atmósfera. Es un componente clave en las estrategias para mitigar el cambio climático, ya que ayuda a reducir las concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Esta técnica se aplica principalmente en las industrias de combustión de combustibles fósiles, como la energía y la fabricación de cemento. Existen varias tecnologías de captura, entre las cuales se destacan la captura postcombustión, la captura precombustión y la captura directa del aire (DAC), cada una de ellas con sus propias ventajas y desafíos (Bui et al., 2018; Fernández López, 2024)

2.2.e. Sistemas de captura de dióxido de carbono (CO₂)

La captura y el almacenamiento de carbono (CCS), por sus siglas en inglés es una cadena integrada de tecnologías que consta de tres pasos principales para capturar el dióxido de carbono de las emisiones industriales y almacenarlo permanentemente de una manera que no dañe el medio ambiente (Boot-Handford et al., 2014; Leung et al., 2014). El objetivo del proceso es reducir emisiones de CO₂, un potente gas de efecto invernadero, a la atmósfera. Reducir los niveles de emisión de este gas es una acción clave en la lucha para mitigar el cambio climático. Para que la captura de CO₂ sea eficiente y competitiva, en base a las tecnologías existentes, es necesario disponer de una corriente con alta concentración de dióxido de carbono para reducir los costes de su captura (Queijo Fraga, 2017). La principal oportunidad para la captura de CO₂ es la aplicación en las grandes fuentes fijas de emisión de CO₂ como las refinerías, centrales termoeléctricas, plantas donde se usen combustibles fósiles como fuente de energía e instalaciones industriales: particularmente la fabricación de cemento, hierro, acero y productos químicos (Parada González, 2017)

2.2.f. Captura postcombustión

La captura postcombustión es un proceso que se lleva a cabo después de la quema de combustibles fósiles. Consiste en capturar el CO₂ de los gases de escape resultantes de la combustión, generalmente utilizando soluciones químicas como las aminas. Este proceso permite separar el CO₂ de otros componentes de los gases de escape, lo que permite su almacenamiento o reutilización. Es una tecnología ampliamente estudiada y utilizada en plantas de energía y otras industrias de alto consumo de energía (Leung et al., 2014; Queijo Fraga, 2017).

2.2.g. *Captura precombustión*

La captura precombustión se refiere a la separación de CO₂ antes de que los combustibles fósiles sean quemados. En este proceso, el combustible se gasifica, generando una mezcla de CO₂ e hidrógeno. El CO₂ se captura antes de que el hidrógeno sea utilizado en procesos energéticos. Esta tecnología se utiliza principalmente en la industria del gas natural y en plantas de hidrógeno, siendo eficaz en la producción de energía limpia y en la reducción de emisiones (Leung et al., 2014).

2.2.h. *Captura Directa del Aire (DAC)*

La captura directa del aire (DAC) es una tecnología emergente que captura el CO₂ directamente de la atmósfera, a diferencia de las otras técnicas que capturan el gas de las fuentes industriales. El CO₂ se captura mediante procesos químicos o físicos, utilizando materiales como sorbentes o soluciones líquidas. Esta tecnología tiene el potencial de eliminar CO₂ de áreas donde las emisiones son difíciles de capturar, como las zonas urbanas, lo que la convierte en una herramienta prometedora para la descarbonización global (Queijo Fraga, 2017).

2.2.i. *Absorbentes y adsorbentes*

Los absorbentes son materiales que capturan el CO₂ mediante una reacción química, como las soluciones de aminas. Los adsorbentes, por otro lado, capturan el CO₂ a través de fuerzas físicas, sin que ocurra una reacción química. Los adsorbentes incluyen materiales como el carbón activado y las zeolitas, que tienen superficies porosas que permiten que el CO₂ se adhiera a ellas. Ambos tipos de materiales se utilizan en tecnologías de captura de CO₂, pero varían en términos de eficiencia, costos y durabilidad (Álvarez Gutiérrez, 2016).

2.2.j. *Tecnologías Emergentes de Captura de CO₂*

Las tecnologías emergentes de captura de CO₂ incluyen nuevas técnicas y materiales que están siendo investigados para mejorar la eficiencia y reducir los costos de captura. Estas tecnologías van más allá de las técnicas tradicionales y pueden incluir avances como los materiales absorbentes avanzados y la biomimética, que utilizan microorganismos o biomasa para capturar y convertir el CO₂ en productos útiles, como biocombustibles o productos químicos (Borges Hernández, 2023). Estas tecnologías prometen ofrecer soluciones más sostenibles y rentables para la captura de CO₂ (Bui et al., 2018).

3. Diseño metodológico

3.1. Tipo de investigación

El proyecto se clasifica como un estudio aplicado que combina métodos cualitativos y cuantitativos con un enfoque descriptivo y analítico. A través de una revisión bibliográfica de fuentes primarias y secundarias, que busca evaluar las técnicas emergentes de captura de dióxido de carbono (CO₂), con el fin de analizar su grado de desarrollo y su potencial impacto en la reducción de emisiones como estrategia de mitigación del cambio climático. Se utilizarán datos de investigaciones previas, artículos científicos, informes de organismos internacionales y documentos técnicos especializados, lo que permitirá una comprensión profunda de las tecnologías emergentes y su viabilidad. Además, se aplicará un enfoque comparativo para identificar los desafíos técnicos, económicos y de escalabilidad de cada técnica, evaluando su aplicabilidad en sectores industriales, energéticos y ambientales. Este enfoque metodológico facilitará un análisis detallado y riguroso que contribuirá a la identificación de soluciones eficaces para la reducción de CO₂ y el cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales. El estudio es descriptivo, ya

que se centra en identificar, clasificar y analizar las características y el estado actual de las técnicas emergentes, buscando aportar una visión clara sobre su potencial de impacto en la mitigación del cambio climático.

3.2.Caracterización de la población

La población del estudio se caracteriza por su diversidad y complejidad, dado que abarca tanto aspectos técnicos como humanos relacionados con las técnicas emergentes de captura de dióxido de carbono (CO₂). En primer lugar, la población se compone de diversas tecnologías emergentes, clasificadas según su enfoque (físico, químico y biológico), cada una con sus características particulares, como principios de funcionamiento, eficiencia, costos y escalabilidad. Además, se consideran las investigaciones previas que abarcan desde las primeras fases de desarrollo hasta las pruebas a gran escala de estas técnicas. En cuanto al aspecto humano, la población está conformada por investigadores, científicos, técnicos y expertos en el área de la captura de CO₂, quienes contribuyen con su conocimiento y experiencia para avanzar en el campo. Asimismo, se incluyen las instituciones y organizaciones involucradas en la investigación y el desarrollo de estas tecnologías, como universidades, organismos internacionales y empresas especializadas. Esta caracterización integral de la población permite un análisis exhaustivo y bien fundamentado, asegurando que el estudio cubra todos los aspectos técnicos, económicos y sociales relevantes para la evaluación de las técnicas emergentes y su potencial en la reducción de emisiones de CO₂.

3.3. Técnicas e instrumentos para implementar en el desarrollo de los objetivos

Para el desarrollo de los objetivos propuestos en este estudio, se emplearán una serie de técnicas e instrumentos especializados que permitirán obtener una visión detallada y precisa sobre las técnicas emergentes de captura de CO₂. En primer lugar, se utilizará una metodología de revisión bibliográfica, consultando bases de datos académicas como ScienceDirect, Scopus, SpringerLink y Web of Science, lo que permitirá acceder a los estudios más recientes sobre las tecnologías emergentes. Para el análisis comparativo de las técnicas, se aplicarán herramientas cualitativas y cuantitativas que permitirán evaluar el grado de desarrollo, la eficiencia y los costos asociados con cada tecnología, además de identificar las barreras y oportunidades de su implementación a gran escala. Estas herramientas y técnicas permitirán llevar a cabo un análisis completo, asegurando que los resultados obtenidos sean válidos. Así, los objetivos específicos se abordarán de forma sistemática y efectiva, asegurando el logro de los resultados esperados.

3.3.a. Primer objetivo. Revisar y compilar las principales técnicas emergentes de captura de CO₂, con el fin de evaluar su grado de desarrollo y su potencial impacto en la reducción de emisiones, como estrategia para mitigar el cambio climático.

Para abordar este objetivo, se llevará a cabo una revisión bibliográfica en fuentes académicas como ScienceDirect, Scopus, SpringerLink y Web of Science, junto con informes de organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), artículos, revistas, libros, tesis doctorales y de maestría que se encuentren en las bases de datos de la Universidad industrial de Santander. Esta revisión permitirá recopilar información actualizada sobre las técnicas emergentes, evaluando su

grado de desarrollo y su potencial impacto en la reducción de emisiones como estrategia para mitigar el cambio climático.

3.3.b. Segundo objetivo. Identificar y comparar las diferentes técnicas emergentes de captura de CO₂ considerando desafíos como rendimiento, costos y la viabilidad de su implementación a gran escala en distintos contextos (industrial, energético y ambiental)

Para este objetivo, se utilizarán criterios comparativos basados en el rendimiento, los costos, la eficiencia y la viabilidad de implementación a gran escala de cada técnica en distintos contextos (industrial, energético y ambiental). Se evaluará la capacidad de cada tecnología para capturar CO₂ de manera efectiva y sostenible, considerando tanto su costo inicial como los gastos operativos a largo plazo. Además, se examinarán las barreras tecnológicas, económicas y regulatorias que podrían afectar su adopción masiva. La información recopilada será clasificada en categorías para facilitar la comparación y evaluación crítica de las diferentes tecnologías, ayudando a identificar las más prometedoras para su aplicación a gran escala. Este análisis permitirá seleccionar aquellas técnicas con el mayor potencial para mitigar el cambio climático de manera eficiente y rentable.

3.3.c. Tercer objetivo. Analizar el potencial de las técnicas emergentes para contribuir a la reducción global de emisiones de CO₂, dentro del marco de los objetivos climáticos internacionales.

Una vez realizado el análisis completo de la información recopilada de las fuentes consultadas, se procederá a realizar el informe final, el cual cumplirá con los objetivos planteados

en el proyecto. Este informe proporcionará una evaluación crítica de su efectividad en la reducción de emisiones, considerando su viabilidad y aplicación en diferentes sectores y contextos. Además, el documento tendrá como propósito servir como un insumo valioso para futuras investigaciones, aportando una visión actualizada y estructurada sobre las tecnologías emergentes en este campo. A través de este informe, se pretende ofrecer un marco de referencia que facilite la toma de decisiones y contribuya al avance de las políticas y estrategias globales para mitigar el cambio climático mediante la captura de CO₂.

4. Resultados

4.1.Objetivo 1. Revisar y compilar las principales técnicas emergentes de captura de CO₂, con el fin de evaluar su grado de desarrollo y su potencial impacto en la reducción de emisiones, como estrategia para mitigar el cambio climático.

4.1.a. Revisión bibliográfica en base de datos

Después del análisis y búsqueda de información en diversas bases de datos académicas como ScienceDirect, Scopus y Web of Science, se logró encontrar información relevante relacionada con las principales técnicas emergentes de captura de CO₂, que se clasifican dependiendo del momento del proceso de combustión en el que se realice la separación del gas dividiéndose en 3 grupos: precombustión, oxicomustión y postcombustión.

En primer lugar, la captura de CO₂ por precombustión se realiza antes de que ocurra la combustión del combustible. En este proceso, el combustible fósil, como el carbón o el gas natural, se transforma inicialmente en un gas de síntesis compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. Posteriormente, el monóxido de carbono se convierte en dióxido de carbono

mediante una reacción con vapor de agua, lo que permite separar el CO₂ en una etapa previa a la combustión, quedando el hidrógeno como combustible limpio para la generación de energía.

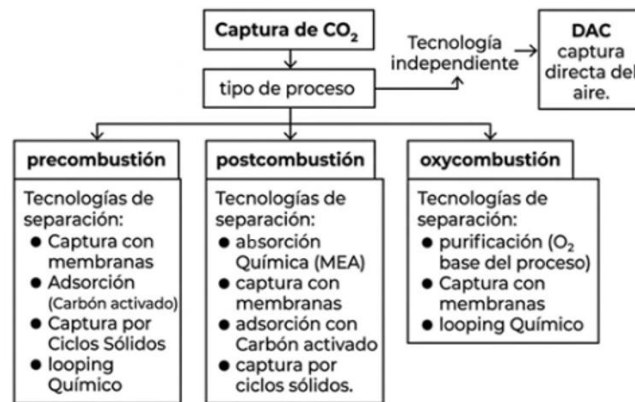
Por otro lado, la postcombustión corresponde a la captura de CO₂ una vez el combustible ha sido quemado. En este caso, el dióxido de carbono se encuentra mezclado con otros gases presentes en los gases de escape generados por la combustión. El proceso consiste en separar el CO₂ de esta corriente gaseosa, generalmente mediante solventes químicos, adsorbentes o membranas, lo que la convierte en una de las técnicas más estudiadas y aplicables en instalaciones ya existentes.

Y finalmente, la oxicomustión consiste en quemar el combustible utilizando oxígeno casi puro en lugar de aire. Como resultado, se produce una corriente de gases compuesta principalmente por dióxido de carbono y vapor de agua, facilitando la separación del CO₂ una vez se condensa el agua. De este modo, se obtiene un gas con alta concentración de CO₂; sin embargo, este método requiere un proceso previo de separación de oxígeno, lo que incrementa la demanda energética del sistema.

Es importante destacar que esta clasificación corresponde al contexto o etapa del proceso en la que se lleva a cabo la captura; sin embargo, dentro de cada una de estas categorías se emplean diferentes técnicas específicas de captura, como la adsorción con Carbón activado, absorción química (MEA), captura con membranas, captura por ciclos sólidos, looping químico y captura directa de aire, entre otras.

Figura 1

Clasificación de las tecnologías de captura de CO₂ según el tipo de proceso.



Nota. La figura presenta la clasificación de las principales tecnologías de captura de CO₂ según el tipo de proceso de captura. Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica.

En la Figura 1 presenta una clasificación general de las tecnologías de captura de CO₂ según la etapa del proceso en la que se realiza la separación del gas. Esta organización permite identificar que las tecnologías pueden implementarse antes de la combustión (precombustión), después de la combustión (postcombustión) o durante procesos de oxidcombustión, dependiendo de las características del sistema industrial. Asimismo, se evidencia que algunas tecnologías, como las membranas, la adsorción y los ciclos sólidos, pueden aplicarse en más de un tipo de proceso, mientras que la absorción química con MEA se asocia principalmente a la postcombustión. Por otra parte, la captura directa del aire (DAC) se diferencia del resto al operar de forma independiente de los procesos de combustión, al capturar CO₂ directamente de la atmósfera. Esta clasificación permite comprender el contexto de aplicación de cada tecnología y constituye la base para el análisis comparativo desarrollado en los siguientes apartados.

En este contexto, la captura directa del aire (Direct Air Capture, DAC) surge como una tecnología complementaria dentro del conjunto de estrategias emergentes para la remoción de CO₂, debido a que no se aplica sobre una fuente puntual de emisión, sino directamente sobre el aire atmosférico. Keith et al. desarrollaron y describieron un proceso industrial basado en una solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH), acoplada a un ciclo de recuperación cáustica con calcio, con una capacidad de captura cercana a 1 Mt-CO₂/año. Los resultados reportados en su investigación evidencian que esta alternativa ha superado la etapa meramente conceptual y presenta un potencial importante para apoyar la mitigación del cambio climático, especialmente frente a emisiones difusas o residuales. Sin embargo, su aplicación a gran escala todavía enfrenta limitaciones asociadas al elevado requerimiento energético y a los costos del proceso, estimados entre 94 y 232 USD por tonelada de CO₂ capturada, aspectos que condicionan su viabilidad técnica y económica actual (Keith et al., 2018).

El estudio de Cuéllar-Franca y Azapagic (2015) se enfoca en las tecnologías de captura de CO₂ y su integración en procesos industriales. A lo largo de su investigación, los autores exploran diferentes métodos de captura, incluyendo la absorción química, la adsorción y la separación por membranas. Además, analizan las implicaciones económicas y la eficiencia de estas tecnologías, destacando su viabilidad en la reducción de las emisiones de CO₂ a gran escala. En este trabajo, se hace especial énfasis en las tecnologías precombustión y postcombustión, discutiendo sus aplicaciones en industrias de alto consumo energético, como las plantas termoeléctricas y la industria cementera. A pesar de los avances, el estudio resalta los desafíos en términos de costos operativos y la necesidad de mejorar los procesos para hacerlos más eficientes y económicamente viables.

González-Abrego et al. (2023) presentan las tecnologías emergentes de captura de CO₂ como alternativas para superar las limitaciones de eficiencia y costo de los métodos convencionales. Entre ellas destacan la captura por ciclos sólidos, los adsorbentes sólidos (como zeolitas, carbón activado y alúmina) y las membranas para procesos de pre y postcombustión, las cuales ofrecen mejoras en la separación del CO₂ y la integración de los procesos. No obstante, los autores señalan que su implementación a escala industrial aún enfrenta desafíos relacionados con los altos costos energéticos y económicos de operación y regeneración. En consecuencia, resaltan la necesidad de continuar investigando estas tecnologías para optimizar su rendimiento y favorecer su aplicación en la reducción de las emisiones de CO₂.

Magri, G. M. et al (2024) presenta un análisis comparativo de las tecnologías de captura de CO₂ en fase piloto y comercial. Su investigación abarca una variedad de técnicas, con un enfoque particular en la absorción química y la adsorción. En su trabajo, destacan que, aunque las tecnologías de postcombustión como la adsorción en carbón activado tienen costos operativos bajos, su eficiencia de captura sigue siendo un desafío. Este estudio también analiza las implicaciones económicas de cada tecnología y los costos asociados a su implementación en grandes plantas industriales. Los autores concluyen que, aunque la absorción química es una de las opciones más prometedoras, los costos de regeneración del solvente siguen siendo un factor limitante.

En el estudio de Ren, F., & Liu, W. (2023), se aborda una revisión de los materiales utilizados para la adsorción de CO₂, con un enfoque particular en el carbón activado. Los autores analizan en detalle las propiedades del carbón activado que lo hacen adecuado para la captura de CO₂, como su gran área superficial, alta porosidad y capacidad para adsorber grandes volúmenes de gas. Además, el estudio explora los factores que influyen en su rendimiento, tales como la

temperatura, presión y las características del gas de entrada. Se discuten las ventajas y limitaciones de esta tecnología, destacando su bajo costo operativo y su facilidad de regeneración, aunque también se identifican desafíos en cuanto a eficiencia y selectividad. Finalmente, los autores abordan las innovaciones recientes en la mejora del carbón activado, como su modificación química, con el objetivo de optimizar su capacidad de captura y durabilidad a largo plazo.

El estudio de Palone, O et al. (2024) se centra en el análisis de tecnologías avanzadas de captura de CO₂, específicamente el looping químico y sus aplicaciones en la industria energética. En este se examinan diversas investigaciones previas que abordan la eficiencia de la tecnología en la captura de CO₂, evaluando su rendimiento en diferentes aplicaciones industriales, especialmente en sectores de alto consumo energético como la industria de la energía y la producción de combustibles. A través de esta revisión, los autores destacan los beneficios potenciales del looping químico, entre los que se incluyen su capacidad para reducir significativamente las emisiones de CO₂ mediante un proceso más eficiente en comparación con otras tecnologías convencionales de captura de carbono.

Santos (2025) realiza una revisión de las técnicas emergentes de captura y conversión de CO₂, destacando la adsorción y las membranas de zeolitas como alternativas prometedoras. El autor señala que la adsorción ofrece bajos costos operativos, aunque presenta limitaciones en eficiencia y selectividad frente a otros gases. Asimismo, resalta el potencial de las membranas de zeolitas por su alta selectividad y permeabilidad al CO₂, pese a los desafíos asociados con su fragilidad, durabilidad y costos de producción, aspectos que aún limitan su implementación a gran escala.

4.1.b. Compilación de estudios de las principales técnicas emergentes de captura de CO₂.

Tabla 1.

Recopilación de técnicas emergentes de captura de CO₂.

Técnica de captura	Fuente de la información	Estado de desarrollo	Eficiencia	Desafíos y limitaciones	Impacto potencial
Adsorción (Carbón activado)	(Ren & Liu, 2023)	Fase experimental.	Baja eficiencia (30-40%).	Limitación en la selectividad entre CO ₂ y otros gases.	Promete ser más económico en la regeneración, pero con una menor eficiencia comparada con la absorción química. También se enfrenta a la dificultad de selectividad y capacidad adsorbedora.
Captura directa de aire	(Keith et al., 2018)	Desarrollo precomercial, con datos de planta piloto y diseño de planta industrial.	Fracción de captura de CO ₂ de 74,5% en el contactor principal, con etapas auxiliares de captura complementaria.	Alto requerimiento energético del proceso y costos todavía elevados de captura (94–232 USD/t-CO ₂).	Alto potencial para remover CO ₂ atmosférico, apoyar la producción de combustibles carbono-neutrales y contribuir a estrategias de remoción de carbono.
Absorción Química (MEA)	(Cuéllar-Franca & Azapagic, 2015)	Fase comercial.	90% de CO ₂ capturado.	Alta demanda energética para regeneración del solvente.	Alta eficiencia para captura, especialmente en plantas de postcombustión, pero altos costos

Técnica de captura	Fuente de la información	Estado de desarrollo	Eficiencia	Desafíos y limitaciones	Impacto potencial
					de operación debido a la regeneración del solvente.
Captura con membranas	(Magri et al., 2024)	Investigación en desarrollo.	Alta selectividad y permeabilidad.	Fragilidad y baja durabilidad de algunas membranas.	Potencial para ser aplicado en diversas fuentes de CO ₂ a gran escala.
Captura por ciclos sólidos	(González-Abrego et al., 2023)	Investigación avanzada.	Alta eficiencia térmica.	Desafíos en la integración a gran escala.	Ideal para procesos industriales con altas temperaturas.
Looping químico	(Palone et al., 2024)	Fase experimental.	95% eficiencia de captura.	Complejidad en el diseño de los sistemas de oxigenación.	Aumento potencial en eficiencia de plantas termoeléctricas con menores costos energéticos comparado con otros métodos de captura.

Nota. Recopilación de las principales técnicas emergentes de captura de CO₂, considerando su estado de desarrollo, eficiencia, limitaciones e impacto potencial. Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica.

A partir de la información recopilada, se observa que las seis técnicas analizadas presentan diferencias importantes en su nivel de madurez tecnológica, eficiencia de captura, barreras operativas e impacto potencial, lo que demuestra que la captura de CO₂ no puede abordarse desde una única solución universal, sino desde un portafolio de tecnologías complementarias. En términos generales, la Tabla 1 evidencia una relación directa entre el grado de desarrollo de una técnica y su aplicabilidad inmediata: mientras algunas alternativas, como la absorción química con MEA, ya cuentan con una fase comercial consolidada, otras como la adsorción con carbón activado, el looping químico y la captura con membranas aún se encuentran en etapas experimentales o de investigación, aunque con ventajas prometedoras para el futuro.

En primer lugar, la adsorción con carbón activado representa una alternativa atractiva desde el punto de vista económico y operativo, especialmente por su potencial de regeneración a menor costo frente a tecnologías químicas convencionales. Sin embargo, su baja eficiencia de captura, ubicada entre 30 y 40%, revela que todavía está lejos de constituirse como una solución competitiva para aplicaciones donde se requiere una remoción intensiva de CO₂. A ello se suma un problema técnico central: la limitada selectividad del material frente a otros gases presentes en las corrientes industriales. Esto significa que, aunque el carbón activado posee ventajas en simplicidad de operación y costos potencialmente más bajos, su desempeño todavía depende de mejoras sustanciales en su capacidad de absorción, selectividad y estabilidad del material. Por tanto, su aporte actual debe entenderse más como una tecnología en perfeccionamiento que como una opción de implementación masiva inmediata.

En contraste, la captura directa de aire (DAC) ocupa un lugar particularmente estratégico dentro de las tecnologías emergentes, debido a que no se limita a fuentes puntuales de emisión, sino que captura CO₂ directamente de la atmósfera. Esta característica le otorga un valor diferencial

muy alto en escenarios de descarbonización profunda, compensación de emisiones residuales y remoción neta de carbono. No obstante, la tabla también muestra que este potencial climático viene acompañado de exigencias técnicas y económicas considerables. Aunque presenta una fracción de captura de 74,5% en el contactor principal y se encuentra en un estado precomercial con respaldo en planta piloto y diseño industrial, continúa enfrentando altos requerimientos energéticos y costos elevados por tonelada de CO₂ capturada. En consecuencia, la DAC no debe analizarse únicamente por su eficiencia inmediata, sino por su función estratégica dentro de los objetivos climáticos de largo plazo, especialmente allí donde otras tecnologías no pueden intervenir directamente.

Por su parte, la absorción química con monoetanolamina (MEA) se posiciona como la referencia más sólida entre las técnicas comparadas, debido a que combina un estado de desarrollo comercial con una eficiencia de captura del 90%, lo que la convierte en la alternativa más madura y cercana a la aplicación inmediata a gran escala. Su principal fortaleza radica en la confiabilidad del proceso y en su capacidad para integrarse a sistemas de postcombustión ya existentes, lo que facilita su adopción en sectores industriales intensivos en carbono. Sin embargo, su principal limitación está asociada a la alta demanda energética requerida para regenerar el solvente, lo cual incrementa de forma importante los costos operativos. Este aspecto revela una tensión clave dentro de las tecnologías de captura: una técnica puede ser altamente eficiente y técnicamente probada, pero perder competitividad si su consumo energético afecta su viabilidad económica y ambiental global. Así, la absorción química destaca por su robustez tecnológica, aunque aún necesita mejoras en eficiencia energética para consolidarse como una solución más sostenible en el largo plazo.

En cuanto a la captura con membranas, la Tabla 1 la presenta como una tecnología en desarrollo que ofrece atributos muy valiosos, particularmente su alta selectividad y permeabilidad. Estas propiedades sugieren una gran capacidad para separar CO₂ de distintas corrientes gaseosas

con procesos potencialmente más compactos, modulares y versátiles que los sistemas convencionales. Su relevancia es notable porque podría adaptarse a múltiples fuentes de emisión y facilitar la ampliación de la captura en diferentes contextos industriales. Sin embargo, la fragilidad y la baja durabilidad de algunas membranas siguen siendo obstáculos críticos, ya que afectan la estabilidad operacional, los costos de mantenimiento y la confiabilidad del sistema a gran escala. Por ello, aunque esta técnica tiene un horizonte de aplicación amplio y prometedor, su consolidación depende de resolver problemas de resistencia mecánica, vida útil y desempeño sostenido bajo condiciones reales de operación.

La captura por ciclos sólidos también aparece como una alternativa de gran interés, sobre todo por su alta eficiencia térmica y su afinidad con procesos industriales de alta temperatura. Esta característica la convierte en una tecnología especialmente adecuada para sectores donde la integración térmica puede aprovecharse de manera más eficiente, mejorando el balance energético del proceso global. Su fortaleza no radica solamente en capturar CO₂, sino en hacerlo de una forma potencialmente más compatible con ciertos entornos industriales complejos. No obstante, la Tabla 1 señala que su principal limitación reside en la integración a gran escala, lo cual indica que aún persisten desafíos relacionados con diseño de procesos, estabilidad de los materiales, operación continua y adaptación a sistemas industriales reales. En ese sentido, los ciclos sólidos muestran una combinación atractiva entre eficiencia y aplicabilidad sectorial, pero todavía requieren una transición más clara desde la investigación avanzada hacia la demostración industrial sostenida.

Finalmente, el looping químico sobresale por registrar la mayor eficiencia de captura dentro de la Tabla 1, con un 95%, lo que lo sitúa como una de las tecnologías más prometedoras desde el punto de vista del rendimiento técnico. Además, su impacto potencial es altamente significativo, ya que puede aumentar la eficiencia de las plantas termoeléctricas y reducir los costos

energéticos frente a otros métodos de captura. Esto le confiere una ventaja comparativa importante en escenarios donde la captura debe integrarse al proceso energético sin penalizaciones excesivas. Sin embargo, su avance sigue limitado por la complejidad del diseño de los sistemas de oxigenación, lo cual sugiere que el reto principal no está en la capacidad de captura, sino en la sofisticación del sistema y en la dificultad de llevar esa eficiencia teórica o experimental a condiciones operativas estables y económicamente viables. En otras palabras, el looping químico parece reunir condiciones sobresalientes para el futuro, pero su escalamiento aún depende de resolver barreras de ingeniería avanzadas.

En conjunto, el análisis comparativo permite identificar una tendencia clara: las tecnologías más maduras, como la absorción química con MEA, ofrecen mayores certezas de implementación inmediata, mientras que las tecnologías emergentes más avanzadas, como el looping químico, la DAC, las membranas y los ciclos sólidos, concentran el mayor potencial transformador a mediano y largo plazo. Esto confirma que la evaluación de una técnica de captura no debe limitarse únicamente al porcentaje de eficiencia, sino que debe considerar simultáneamente su nivel de desarrollo, costo energético, complejidad operativa, escalabilidad e impacto climático. En este marco, la elección de una tecnología adecuada dependerá del contexto específico de aplicación: la absorción química puede ser más viable en escenarios industriales consolidados; la DAC resulta especialmente estratégica para la remoción atmosférica; las membranas y los ciclos sólidos pueden abrir oportunidades de integración sectorial más eficiente; y el looping químico emerge como una opción de alto desempeño con fuerte potencial industrial.

En conclusión, las seis técnicas de captura de CO₂ analizadas evidencian que la mitigación efectiva de emisiones requiere una visión tecnológica diversa, escalonada y complementaria, más que la dependencia de un único método. La absorción química con MEA destaca actualmente por

su madurez comercial y alta eficiencia, mientras que el looping químico, la captura directa de aire, las membranas y los ciclos sólidos representan apuestas estratégicas con gran potencial para transformar los sistemas de captura en el futuro. A su vez, la adsorción con carbón activado, aunque menos eficiente, sigue siendo relevante como línea de investigación por sus ventajas económicas y operativas. En consecuencia, el verdadero avance en la reducción de emisiones no dependerá solo de desarrollar tecnologías cada vez más eficientes, sino de lograr que estas sean técnica, energética y económicamente viables en contextos reales. Por ello, el panorama comparativo presentado en la Tabla 1 confirma que las tecnologías emergentes de captura de CO₂ constituyen un componente fundamental en la lucha contra el cambio climático, pero su consolidación exigirá investigación continua, optimización de materiales, disminución de costos e integración efectiva con los sistemas industriales y energéticos del futuro.

4.2.Objetivo 2. Determinar Identificar y comparar las diferentes técnicas emergentes de captura de CO₂ considerando desafíos como rendimiento, costos y la viabilidad de su implementación a gran escala en distintos contextos (industrial, energético y ambiental)

4.2.a. Clasificación de técnicas emergentes según su rendimiento, costos y escalabilidad.

La clasificación permite analizar las principales técnicas emergentes de captura de CO₂ con base en tres criterios fundamentales: rendimiento, costos de implementación y potencial de viabilidad. Este enfoque facilita la identificación de sus ventajas, limitaciones y posibilidades de aplicación en diferentes contextos industriales, energéticos y ambientales, así como su contribución a la reducción de emisiones y la mitigación del cambio climático. A continuación, se describen los principios de funcionamiento y las características de cada una de estas tecnologías.

- Adsorción (Carbón activado)

La adsorción con carbón activado consiste en hacer pasar una corriente gaseosa a través de un lecho poroso de material carbonoso con alta área superficial. En este proceso, las moléculas de CO₂ se fijan físicamente sobre la superficie del sólido debido a fuerzas intermoleculares, mientras que parte de los demás gases continúan su paso. La eficiencia del sistema depende de variables como la presión, la temperatura, el tiempo de contacto, el tamaño de poro y la composición de la mezcla gaseosa. Una vez el adsorbente se satura, debe regenerarse mediante cambios de presión o temperatura, liberando el CO₂ retenido para reutilizar el material. Su principal ventaja radica en su bajo costo relativo y en la simplicidad operativa; sin embargo, su principal limitación es la baja selectividad frente a otros gases y su menor capacidad de captura, lo que restringe su desempeño en corrientes complejas y en aplicaciones de gran escala.

- Absorción Química (MEA)

La absorción química con monoetanolamina (MEA) se desarrolla normalmente en dos etapas principales: absorción y regeneración. Primero, el gas con CO₂ entra a una torre absorbidora, donde entra en contacto con una solución líquida de MEA. Allí, el CO₂ reacciona químicamente con la amina y forma compuestos solubles, lo que permite retirarlo de la corriente gaseosa con alta eficiencia. Después, la solución rica en CO₂ se conduce a una columna regeneradora o stripper, donde se aplica calor para romper esos enlaces químicos, liberar el CO₂ concentrado y recuperar el solvente para reutilizarlo en el ciclo. Es una de las tecnologías más maduras y eficaces, especialmente en postcombustión, pero su desventaja principal es el alto consumo energético asociado a la regeneración del solvente, además de problemas de corrosión, degradación química y costos de operación elevados.

- Captura con membranas

La captura con membranas se basa en la separación selectiva del CO₂ mediante materiales semipermeables que permiten que este gas atraviese la barrera con mayor facilidad que otros componentes de la mezcla. El proceso ocurre porque existe una diferencia de presión, concentración o afinidad química entre ambos lados de la membrana, lo que impulsa el paso preferencial del CO₂. Dependiendo del tipo de membrana, la separación puede estar dominada por difusión, solubilidad o tamizado molecular. Esta tecnología puede operar en configuraciones modulares, lo que le da flexibilidad de diseño y facilidad de integración a distintas plantas industriales. No obstante, su rendimiento real depende de lograr un equilibrio entre permeabilidad y selectividad, ya que una membrana muy permeable no siempre separa bien, y una muy selectiva puede reducir el flujo del proceso. A esto se suma la posible pérdida de eficiencia por ensuciamiento, envejecimiento o fragilidad del material. Por eso, aunque es una tecnología prometedora, todavía requiere mejoras en durabilidad, estabilidad y costos para una implementación más amplia.

- Captura por ciclos sólidos

La captura por ciclos sólidos emplea materiales sólidos reactivos o adsorbentes que capturan CO₂ de manera reversible en etapas sucesivas. De forma general, el sólido entra en contacto con una corriente gaseosa que contiene CO₂ y lo retiene; luego, en una segunda etapa, ese material se somete a condiciones de temperatura o presión que favorecen la liberación del gas capturado y su regeneración. En muchos casos se utilizan óxidos metálicos o materiales tipo sorbente que trabajan a temperaturas elevadas, por lo que esta tecnología resulta especialmente atractiva en industrias con calor residual disponible. Su ventaja principal es que puede reducir el gasto energético en la etapa de regeneración comparada con algunos solventes líquidos, además

de integrarse con procesos térmicos intensivos. Sin embargo, presenta desafíos relacionados con la pérdida progresiva de capacidad del sólido, la resistencia mecánica del material y la complejidad de integrar el sistema a operación continua sin afectar la eficiencia global de la planta.

- **Looping Químico**

El looping químico es un proceso más avanzado en el que se usa un material portador de oxígeno, generalmente un óxido metálico, para transferir oxígeno al combustible sin que este entre en contacto directo con el aire. En vez de quemarse con aire atmosférico, el combustible reacciona con el óxido metálico en un reactor, produciendo principalmente CO₂ y vapor de agua. Luego, en otro reactor, el material reducido se vuelve a oxidar con aire y se reutiliza en un ciclo cerrado. La gran ventaja de este esquema es que evita la dilución del CO₂ con nitrógeno atmosférico, por lo que el gas sale más concentrado y su separación posterior resulta mucho más sencilla. Esto mejora notablemente la eficiencia de captura y reduce la penalización energética del proceso.

- **Captura directa de aire**

La captura directa de aire es una tecnología independiente de los procesos convencionales de combustión, porque no trata gases de escape concentrados, sino que extrae el CO₂ directamente del aire atmosférico. Su funcionamiento parte de mover grandes volúmenes de aire a través de sistemas de contacto que contienen sorbentes líquidos o sólidos con alta afinidad por el CO₂. Una vez el dióxido de carbono queda retenido, el material capturante se somete a una etapa de regeneración, que puede requerir calor, vacío o cambios químicos, con el fin de liberar un flujo concentrado de CO₂ para su compresión, transporte, uso o almacenamiento geológico. La principal fortaleza de esta tecnología es su gran flexibilidad territorial, ya que puede instalarse cerca de sitios de almacenamiento o de uso industrial sin depender de una fuente puntual de emisiones. Además, tiene un valor estratégico porque permite remover CO₂ ya disperso en la atmósfera. Sin embargo,

también es una de las opciones más exigentes desde el punto de vista energético y económico, debido a la muy baja concentración del CO₂ en el aire, lo que obliga a procesar enormes volúmenes gaseosos para capturar cantidades relativamente pequeñas. Por eso, aunque su papel es clave en escenarios de neutralidad de carbono y emisiones negativas, su viabilidad a gran escala depende de avances importantes en materiales, eficiencia energética y reducción de costos.

A continuación, se presenta una clasificación comparativa de las principales técnicas emergentes de captura de CO₂, basada en su rendimiento de captura, costo operativo y viabilidad de implementación.

Tabla 2.

Comparación de las técnicas emergentes según rendimiento, costo y viabilidad.

Técnica de captura	Rendimiento de CO₂ capturado	Costo operativo	Viabilidad
Absorción química (MEA)	≈ 90%	Alto	Alta, especialmente en plantas de postcombustión, por su madurez tecnológica y aplicación industrial consolidada.
Adsorción con carbón activado	30–40%	Bajo	Baja a moderada, limitada por su menor eficiencia y por problemas de selectividad frente a otros gases.
Captura directa de aire (DAC)	≈ 74,5% en el contactor principal.	Alto	Moderada, con alto potencial estratégico, pero condicionada por el elevado consumo energético y los costos actuales.
Captura con membranas	Alto desempeño en selectividad y permeabilidad (sin un valor porcentual único reportado).	Alto	Moderada a alta, con potencial de escalamiento, aunque limitada por fragilidad, durabilidad y costo de los materiales.
Captura por ciclos sólidos	Alta eficiencia térmica (sin un porcentaje único homogéneo en la compilación).	Moderado	Moderada a alta, especialmente en procesos industriales de alta temperatura.
Looping químico	≈ 95%	Moderado	Alta, aunque con desafíos en el diseño e integración de los sistemas de oxigenación.

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica.

La comparación de las principales técnicas emergentes de captura de CO₂ evidencia que no existe una alternativa que sobresalga simultáneamente en rendimiento, costo operativo y viabilidad de implementación. En términos de eficiencia de captura, el looping químico y la absorción química con MEA presentan los mejores resultados, con rendimientos cercanos al 95 % y 90 %, respectivamente. Sin embargo, la absorción con MEA se caracteriza por sus elevados costos operativos, mientras que el looping químico mantiene costos moderados, aunque todavía enfrenta desafíos tecnológicos para su implementación a gran escala.

En contraste, la adsorción con carbón activado representa la opción de menor costo operativo; no obstante, su rendimiento de captura y su viabilidad son inferiores debido a problemas de selectividad y menor capacidad de remoción de CO₂. Por su parte, la captura directa de aire (DAC) destaca por su potencial para remover CO₂ directamente de la atmósfera, lo que la convierte en una alternativa estratégica para alcanzar escenarios de neutralidad de carbono. Sin embargo, sus altos costos operativos y requerimientos energéticos limitan actualmente su adopción a gran escala.

Las tecnologías basadas en membranas y en ciclos sólidos se posicionan como alternativas con un importante potencial de desarrollo. Aunque no presentan un valor único de eficiencia de captura debido a la diversidad de configuraciones y condiciones de operación reportadas en la literatura, ambas muestran una viabilidad de moderada a alta, respaldada por sus posibilidades de integración en diferentes procesos industriales. No obstante, aún requieren avances en aspectos relacionados con la durabilidad de los materiales, la estabilidad operativa y el escalamiento tecnológico.

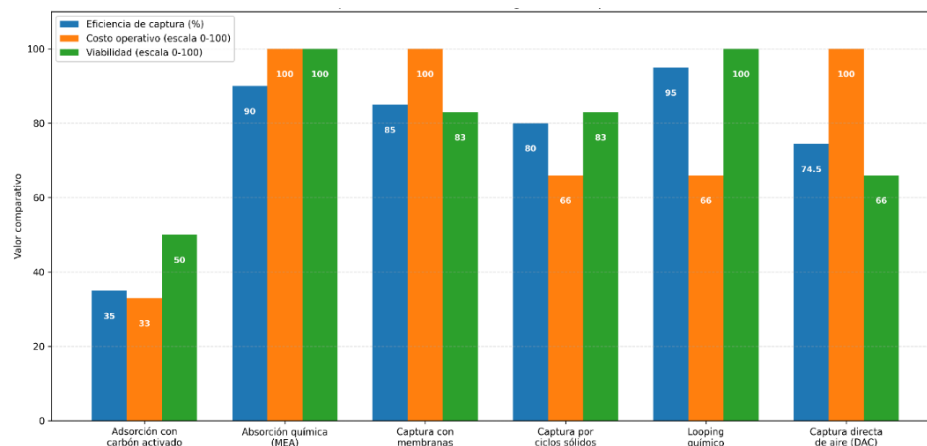
En conjunto, la comparación refleja que la selección de una tecnología de captura de CO₂ depende del equilibrio entre eficiencia, costos y viabilidad de implementación. Mientras las

tecnologías más maduras ofrecen altos niveles de captura, las alternativas emergentes representan oportunidades de innovación que podrían mejorar su competitividad conforme avancen su desarrollo tecnológico y disminuyan sus costos de implementación.

El siguiente gráfico de barras muestra una comparación general de las principales técnicas emergentes de captura de CO₂, tomando como criterios de análisis la eficiencia de captura, el costo operativo y la viabilidad de implementación.

Figura 2

Gráfico de barras donde se compara las técnicas emergentes de captura de CO₂.



Nota. La figura compara las principales técnicas emergentes de captura de CO₂ según su eficiencia de captura, costo operativo y viabilidad de implementación. Los criterios de costo operativo y viabilidad se representaron mediante una **escala comparativa de 0 a 100**, construida a partir de la clasificación cualitativa reportada en la literatura, con el fin de facilitar la comparación entre las tecnologías. Estos valores **no corresponden a mediciones absolutas**.

La **Figura 2** muestra un gráfico comparativo que permite observar que las tecnologías no se comportan de la misma manera cuando se analizan simultáneamente la eficiencia de captura, el costo operativo y la viabilidad. Por un lado, la absorción química con MEA y el looping químico sobresalen claramente, ya que ambas presentan los niveles más altos de eficiencia y viabilidad

dentro del conjunto evaluado; sin embargo, la MEA está asociada a un costo operativo alto, mientras que el looping químico muestra un costo moderado, lo que le da una ventaja comparativa importante. En un nivel intermedio se ubican la captura con membranas y la captura por ciclos sólidos, tecnologías que muestran un comportamiento favorable en viabilidad y desempeño técnico, pero con limitaciones relacionadas con el costo de los materiales, la durabilidad o la integración del proceso. Por su parte, la captura directa de aire (DAC) evidencia una eficiencia relevante y un gran valor estratégico, aunque su costo alto y su viabilidad moderada restringen su aplicación masiva en el corto plazo. Finalmente, la adsorción con carbón activado es la opción más económica, pero también la de menor eficiencia de captura y menor viabilidad relativa, lo que reduce su competitividad frente a las demás alternativas. En conjunto, el gráfico confirma que la mejor tecnología no depende únicamente de capturar más CO₂, sino del equilibrio entre rendimiento, costo y posibilidad real de implementación.

A partir de la comparación integral entre eficiencia, costos y viabilidad, puede concluirse que la tecnología que presenta el mejor balance general para la captura de CO₂ es el looping químico, debido a que combina la mayor eficiencia de captura reportada, un costo operativo moderado y una alta viabilidad de aplicación, aunque todavía con retos de diseño e integración tecnológica. En segundo lugar, la absorción química con MEA se mantiene como una de las opciones más sólidas y maduras, especialmente por su alta eficiencia y amplia consolidación industrial, pero su principal desventaja sigue siendo el elevado costo operativo. En contraste, la adsorción con carbón activado resulta atractiva desde el punto de vista económico, aunque su bajo rendimiento limita su efectividad; la DAC tiene un papel estratégico para escenarios de remoción atmosférica, pero aún está condicionada por sus altos costos; y tanto las membranas como los ciclos sólidos representan alternativas prometedoras, aunque todavía requieren avances para

consolidarse plenamente a gran escala. Por tanto, si el criterio principal es seleccionar la tecnología más conveniente considerando simultáneamente los tres factores evaluados, el looping químico se perfila como la alternativa más favorable dentro del conjunto analizado.

4.3.Objetivo 3. Analizar el potencial de las técnicas emergentes para contribuir a la reducción global de emisiones de CO₂, dentro del marco de los objetivos climáticos internacionales.

4.3.a. Análisis de viabilidad de las técnicas emergentes y su impacto en la reducción global de emisiones.

En el marco del Acuerdo de París y del Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 (ODS 13), las técnicas emergentes de captura de CO₂ constituyen herramientas estratégicas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en sectores donde la descarbonización continúa representando un reto técnico (López Esteban, 2022; Lucas Garín, 2017). Su contribución al cumplimiento de estos compromisos internacionales no depende únicamente de su eficiencia de captura, sino también de su grado de madurez tecnológica, viabilidad de implementación y capacidad para complementar otras estrategias de mitigación.

En este contexto, la absorción química con MEA representa una de las alternativas con mayor potencial de contribución a corto plazo, debido a su alto nivel de desarrollo tecnológico y a su implementación comercial en sistemas de postcombustión. Estas características permiten reducir emisiones en fuentes industriales existentes sin requerir transformaciones estructurales del proceso productivo, favoreciendo el cumplimiento de las metas de reducción planteadas por el Acuerdo de París. No obstante, su sostenibilidad futura dependerá de disminuir el consumo energético asociado a la regeneración del solvente.

Por su parte, la adsorción con carbón activado constituye una alternativa complementaria para ampliar las opciones de captura en aplicaciones específicas donde el costo de implementación sea un factor determinante. Aunque su menor eficiencia limita su impacto frente a otras tecnologías, el desarrollo de materiales adsorbentes más selectivos podría fortalecer su contribución dentro de estrategias de mitigación orientadas a diferentes escalas industriales.

Las membranas, la captura por ciclos sólidos y el looping químico representan tecnologías con un importante potencial para fortalecer el cumplimiento de los objetivos climáticos en el mediano y largo plazo. Su desarrollo busca incrementar la eficiencia de los procesos de captura y ampliar las posibilidades de aplicación en sectores industriales con altas emisiones, favoreciendo la transición hacia sistemas productivos con menor intensidad de carbono. Sin embargo, su contribución dependerá del avance en aspectos como el escalamiento tecnológico, la integración de los procesos y la reducción de las barreras técnicas que aún limitan su implementación industrial.

Finalmente, la captura directa de aire (DAC) adquiere un papel estratégico dentro de los escenarios de neutralidad de carbono promovidos por el Acuerdo de París, ya que permite remover CO₂ directamente de la atmósfera y complementar las estrategias convencionales de reducción de emisiones. Aunque actualmente presenta altos costos y requerimientos energéticos, su capacidad para actuar sobre emisiones ya acumuladas le confiere un potencial significativo para apoyar el cumplimiento de las metas climáticas de largo plazo.

En conjunto, las técnicas analizadas evidencian que el cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales no dependerá de una única tecnología, sino de la implementación complementaria de soluciones con diferentes niveles de madurez y horizontes de aplicación, capaces de responder a las necesidades de los distintos sectores productivos.

4.3.b. Integración de los resultados para la evaluación de las contribuciones potenciales a los objetivos climáticos internacionales.

La integración de los resultados permite establecer que las seis técnicas emergentes analizadas no compiten entre sí, sino que ofrecen alternativas complementarias para reducir emisiones en diferentes contextos industriales y horizontes temporales. En términos generales, los resultados muestran que tecnologías como la absorción química con MEA y, en menor medida, la adsorción con carbón activado, presentan ventajas para la mitigación inmediata en fuentes fijas de emisión, debido a su mayor cercanía a condiciones de aplicación industrial. En contraste, alternativas como las membranas, los ciclos sólidos y el looping químico destacan por su potencial de optimización futura, al ofrecer perspectivas de mayor eficiencia energética, mejor integración con procesos industriales y posibilidades de reducción progresiva de costos. Por su parte, la captura directa del aire (DAC) amplía el alcance de la mitigación, ya que no se limita al control de emisiones en puntos específicos, sino que introduce una vía para remover CO₂ ya acumulado en la atmósfera, aspecto especialmente relevante en escenarios de neutralidad de carbono y emisiones netas cero.

A continuación, se muestra una integración comparativa de los resultados obtenidos para las seis técnicas de captura de CO₂ analizadas en este estudio, con énfasis en su contribución potencial al cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales. A partir de la revisión de aspectos como eficiencia, viabilidad, nivel de desarrollo y posibilidades de aplicación en distintos contextos industriales y ambientales.

Tabla 3

Técnicas de captura y su contribución al cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales.

Técnica de captura	Tipo	Horizonte temporal (paris)	Rol principal	Madurez (TRL) aprox.	Ventajas	Limitaciones
Absorción química (MEA)	Postcombustión	Corto Plazo (2030)	Reducción inmediata de emisiones.	Alta (8-9)	Tecnología comercial, alta eficiencia (85%-95%).	Alto consumo energético, corrosión.
Adsorción (carbón activado, zeolitas)	Postcombustión	Corto-Mediano	Reducción + optimización.	Media-Alta (6-8)	Menor energía que MEA, regeneración posible.	Sensible a humedad, menor capacidad.
Membranas	Post/Pre	Mediano Plazo (2050)	Separación eficiente en procesos continuos.	Media (5-7)	Bajo consumo energético, modular.	Selectividad limitada, aún en desarrollo.
Captura por ciclos solidos	Post/Pre	Mediano plazo	Alternativa eficiente a absorción.	Media (5-7)	Menor degradación química.	Escalabilidad limitada actualmente.
Looping químico	Precombustión	Mediano plazo (2050)	Producción energética con captura integrada.	Media (4-6)	Alta eficiencia, captura inherente	Complejidad tecnológica.
Captura directa del aire (DAC)	Post-atmósferica	Largo plazo	Remoción directa de CO ₂ .	Baja-media (3-6)	Reduce CO ₂ ya emitido.	Muy costosa, alto consumo energético

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica.

Las seis técnicas emergentes de captura de CO₂ presentan contribuciones distintas pero complementarias frente al cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales, especialmente los asociados al Acuerdo de París y al ODS 13, ya que algunas ofrecen reducción directa de emisiones en fuentes industriales, mientras otras amplían el alcance de la mitigación hacia escenarios de neutralidad de carbono y remoción atmosférica. No obstante, al integrar los resultados de viabilidad, eficiencia, nivel de desarrollo y aporte potencial a la reducción global de emisiones, se identifica que el looping químico es la técnica que, en términos generales, más contribuye potencialmente a la reducción de emisiones, debido a que combina la mayor eficiencia de captura reportada, una menor penalización energética frente a otros métodos y una alta compatibilidad con sectores intensivos en carbono, lo que le otorga una fuerte alineación con las metas de descarbonización planteadas en los acuerdos climáticos internacionales. Aun así, es importante precisar que la absorción química con MEA continúa siendo la alternativa con mayor capacidad de contribución inmediata en el corto plazo, gracias a su madurez tecnológica y aplicación comercial, mientras que la captura directa de aire (DAC) cumple un papel estratégico en el largo plazo por su capacidad de remover CO₂ ya acumulado en la atmósfera. En este sentido, aunque el looping químico se perfila como la opción de mayor aporte potencial global dentro del conjunto analizado, el cumplimiento efectivo de los objetivos climáticos internacionales dependerá de la articulación de varias tecnologías, según el tipo de fuente emisora, el horizonte temporal de implementación y las necesidades específicas de cada sector.

5. Conclusiones

La presente investigación permitió identificar y analizar seis técnicas emergentes de captura de CO₂ con potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático. Los resultados

evidenciaron diferencias significativas en términos de madurez tecnológica, eficiencia, costos y posibilidades de escalamiento, lo que demuestra que cada tecnología presenta fortalezas y limitaciones particulares. En este sentido, la caracterización realizada proporciona una base para comprender el estado actual de estas alternativas y facilita su evaluación según las necesidades y condiciones de distintos sectores industriales y energéticos.

A partir de la comparación entre eficiencia, costos y viabilidad, se concluye que el looping químico presenta el mejor balance general entre las tecnologías analizadas para la captura de CO₂, al combinar una alta eficiencia de captura, costos operativos moderados y un elevado potencial de aplicación. Aunque aún enfrenta desafíos relacionados con su diseño e integración tecnológica, se perfila como la alternativa más prometedora dentro del conjunto evaluado. Por su parte, la absorción química con MEA destaca por su madurez tecnológica y elevada eficiencia, mientras que tecnologías como la captura directa de aire (DAC), las membranas, los ciclos sólidos y la adsorción con carbón activado requieren avances adicionales o enfrentan limitaciones económicas y técnicas que restringen, por ahora, su implementación a gran escala.

Desde la perspectiva de los objetivos climáticos internacionales, se concluye que las técnicas emergentes de captura de CO₂ poseen un potencial complementario para contribuir a la reducción global de emisiones. Los resultados evidencian que tecnologías como la absorción química con MEA pueden generar impactos a corto plazo gracias a su mayor madurez, mientras que alternativas como las membranas, los ciclos sólidos, el looping químico y la captura directa de aire representan opciones estratégicas para fortalecer la descarbonización en el mediano y largo plazo. En conjunto, estas tecnologías constituyen herramientas que, de acuerdo con su nivel de

desarrollo y ámbito de aplicación, pueden apoyar el cumplimiento de las metas del Acuerdo de París y del ODS 13.

De manera general, se concluye que las tecnologías emergentes de captura de CO₂ representan alternativas fundamentales para avanzar hacia la descarbonización de los sectores industriales y energéticos. Si bien el análisis realizado identifica al looping químico como la tecnología con el balance más favorable entre eficiencia, costos y potencial de aplicación, la investigación evidencia que ninguna técnica, por sí sola, será suficiente para responder a la magnitud del desafío climático. En consecuencia, el cumplimiento efectivo de las metas globales de reducción de emisiones requerirá la implementación complementaria de distintas tecnologías de captura de CO₂, seleccionadas de acuerdo con las características de cada contexto, y respaldadas por investigación continua, innovación tecnológica, reducción de costos y políticas públicas que promuevan su adopción a gran escala.

6. Recomendaciones

Se recomienda fortalecer la investigación, el desarrollo tecnológico y la implementación progresiva de las técnicas emergentes de captura de CO₂ con mayor potencial de mitigación, especialmente el looping químico, la captura por ciclos sólidos, las membranas y la captura directa de aire (DAC). Para ello, es necesario orientar los esfuerzos hacia la optimización de materiales, el diseño de reactores y sistemas, la integración energética de los procesos y la reducción de los costos y requerimientos energéticos, con el fin de facilitar su escalamiento y aplicación en condiciones industriales reales. Asimismo, futuras investigaciones deberían incorporar análisis técnico-económicos, balances energéticos, estudios de escalabilidad y evaluaciones del desempeño operativo, que permitan comparar de manera integral estas tecnologías y respaldar la toma de decisiones para su implementación.

Se recomienda fortalecer la articulación entre la academia, la industria y los formuladores de política pública para consolidar un ecosistema que favorezca la investigación aplicada, el desarrollo de proyectos piloto y la adopción gradual de tecnologías de captura de CO₂, en concordancia con las metas del Acuerdo de París y el ODS 13. En este contexto, resulta pertinente priorizar la implementación de tecnologías con mayor madurez, como la absorción química con MEA, en fuentes fijas de alta emisión, mientras que alternativas como la adsorción con carbón activado pueden promoverse como soluciones complementarias en aplicaciones específicas, de acuerdo con sus características técnicas, económicas y el contexto de cada sector.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez Gutiérrez, N. (2016). *Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás* [Universidad de Oviedo]. <http://hdl.handle.net/10261/137813>
- Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowell, N., Fernández, J. R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J. P., Haszeldine, R. S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter, R. T. J., Pourkashanian, M., Rochelle, G. T., Shah, N., ... Fennell, P. S. (2014). Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science*, 7(1), 130-189. <https://doi.org/10.1039/c3ee42350f>
- Borges Hernández, L. (2023). *Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ como vía hacia la descarbonización*. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33898>
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P. S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L. A., Hallett, J. P., Herzog, H. J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G. C., Matuszewski, M., Metcalfe, I. S., Petit, C., ... Mac Dowell, N. (2018). Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062-1176. <https://doi.org/10.1039/c7ee02342a>
- Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization*, 9, 82-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>
- EPA. (2025). *Understanding global warming potentials*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- FAO. (2019). *Strengthening monitoring and evaluation for adaptation planning in the agriculture sectors* (UNDP). FAO.

- Fernández López, D. (2024). *Modelado y Control Predictivo de una Planta de Captura de CO₂* [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/69366>
- Friedlingstein, P., Artaxo, P., Gallego-Sala, A. V. V., Jia, G., Jones, C. D., Kawamiya, M., Loisel, J., Loutre, M.-F., Rehfeld, K., Rovere, A., Smith, C., Séférian, R., van der Wel, N., & Ziegler, E. (2024). Earth system responses to different levels of greenhouse gas emissions mitigation. *Frontiers in Climate*, Volume 6-2024. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1480208>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301-5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- González-Abrego, D. O., Rojo-Gómez, E. G., Ochoa-Garfias, Á. F., & Trejo-Bautista, R. (2023). Captura, almacenamiento y conversión de CO₂: Nuevas técnicas de reducción. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(22), 20-27.
- Guha, F., Abser, M. N., Mandal, B. H., & Mondal, B. K. (2025). Recent advancements in carbon capture, utilization, and sequestration technologies. *Sustainable Chemistry One World*, 7, 100075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scowo.2025.100075>
- Gutiérrez Guerrero, S. (2025). *Determinación del panorama de oportunidades para la implementación de CCUS (carbon capture, utilization, and storage) en Colombia* [Universidad del Atlántico]. <https://hdl.handle.net/20.500.12834/2099>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio*

- Climático* [Inventario]. IDEAM. <https://observatorio.epacartagena.gov.co/inventario-nacional-y-departamental-de-gases-efecto-invernadero-colombia/>
- IEA. (2026). Carbon Capture, Utilisation and Storage CCUS Projects Database [Informativa]. *International Energy Agency*. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database?utm_source
- Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573-1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., ... Zheng, B. (2018). Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 2141-2194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>
- Leung, D. Y. C., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. (2014). *An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies*. 39, Pages 426-443.
- Liu, T., Wu, Y., & Chau, C. (2023). Una visión general de la mitigación de las emisiones de carbono en la industria alimentaria: Esfuerzos, desafíos y oportunidades. *Processes*, 11(7), 1993. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr11071993>
- López Esteban, C. (2022). *Los ODS. Avanzando hacia una educación sostenible* (1.^a ed.). https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=v-92EAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA213&dq=ODS+13&ots=apTEndblKy&sig=St34LYqi7mcFS8LpPdC6Er26LO8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Lucas Garín, A. (2017). Novedades del Sistema de Protección Internacional de Cambio Climático: El Acuerdo de París. *Estudios internacionales (Santiago)*, 49, 137-167.

- Magri, G. M., Caldas, M. A., do Carmo, T. C. S., & Quintinoa, W. de A. (2024). *Captura de CO₂ de Fontes Estacionárias: Técnicas atuais e tendências*. <https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/219/292>
- Marzouk, O. (2025). *Resumen del Informe TCEP (Seguimiento del Progreso de la Energía Limpia) de 2023 (1.^a edición) de la Agencia Internacional de Energía (AIE) y Proceso Propuesto para Calcular una Calificación Agregada Única* (No. 1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5099325>
- National Center for Biotechnology Information. (2026). *Carbon Dioxide*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Carbon-Dioxide>.
- Palone, O., Cedola, L., Borello, D., & Markides, C. N. (2024). Decarbonizing power and fuels production by chemical looping processes: Systematic review and future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 254, 123844. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123844>
- Parada González, N. A. (2017). *Tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ en sectores industriales* [Universidad de América]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7123>
- Pathak, M., Slade, R., Shukla, P., Skea, J., Pichs-Madruga, R., & Ürge-Vorsatz, D. (2022). *Cambio climático 2022: Mitigación del cambio climático*. (Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático No. 6). <https://doi.org/10.1017/9781009157926.002>
- Pörtner, H., Roberts, D., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., & Rama, B. (2022). *Cambio Climático 2022: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. (No. 6; pp. 37-118). <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>.

- Queijo Fraga, A. (2017). *Sistemas de captura de CO₂*. Universidade da Coruña. Escola Técnica Superior de Náutica e Máquinas.
- Ren, F., & Liu, W. (2023). Review of CO₂ Adsorption Materials and Utilization Technology. *Catalysts*, 13(8), 1176. <https://doi.org/10.3390/catal13081176>
- Santos, T. R. (2025). *TÉCNICAS DE CAPTURA E CONVERSÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO* [Instituto Federal Goiano]. <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/5416>
- Saravanan A, Senthil Kumar, P., Voz D, Jeevanantham S, Bhuvaneswari V, Anantha Narayanan V, Yaashikaa P, Swetha S, & Reshma B. (2021). *Una revisión exhaustiva de los diferentes enfoques para la utilización y conversión de CO₂*. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116515>
- Stocker, TF, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & PM Midgley. (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 1535). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>