

Revisión Sistemática de Tecnologías para Captura de CO₂

Lidia Esther Puentes Quiroz y Laura Andrea Velandia Charris

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

César Augusto Guevara Lastre

M.Sc. Ingeniería Química

Codirector

Omar Andrés Benavides Prada

M.Sc. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Estado del Arte	12
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo General	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. Marco Conceptual	15
3.1. Adsorción	15
3.2. Membranas	19
3.3. Absorción	21
4. Metodología	25
4.1. Búsqueda de Información	25
4.2. Selección de la Información	26
4.3. Análisis de la Información	27
5. Resultados	28
5.1. Ecuaciones de búsqueda y selección información: protocolo PRISMA	28
5.2. Criterios de Exclusión	29
5.3. Análisis Bibliométrico	30
5.4. Análisis de las tecnologías de captura de CO ₂	33
5.4.1. Adsorción	33
5.4.2. Membranas	39
5.4.3. Absorción	40
6. Conclusiones	48

7. Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	51
Apéndices.....	66

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Ventajas y desventajas de los materiales de adsorción en la captura de CO ₂	17
Tabla 2 Ventajas y desventajas de la relación entre la selectividad y la permeabilidad en los tres tipos de membrana	21
Tabla 3 Ventajas y desventajas de los absorbentes en absorción	23
Tabla 4 Criterios de selección de información empleados para la revisión sistemática	26
Tabla 5 Resultados de las ecuaciones de búsqueda utilizando Scopus fragmento 2019-2023	28
Tabla 6 Resultados de las ecuaciones de búsqueda en cada fuente bibliográfica	28
Tabla 7 Resultados obtenidos en el segundo proceso de filtrado.....	29
Tabla 8 Países con mayor número de artículos publicados acerca de métodos de captura de CO ₂	32
Tabla 9 Precursores de carbón activado.....	36
Tabla 10 Datos de síntesis de adsorbentes	37
Tabla 11 Procesos de adsorción con variación de Presión y/o Temperatura.....	38
Tabla 12 Nivel de madurez tecnológica (TRL) para las técnicas de regeneración	38
Tabla 13 Escalabilidad y nivel TRL para los tipos de membrana en la captura de CO ₂	40
Tabla 14 Catalizadores para la desorción y sus condiciones de operación	43
Tabla 15 Ventajas y desventajas para las tecnologías de separación para la captura de CO ₂	44
Tabla 16 Diferencia de costos, eficiencia, nivel TRL, concentración y pureza para las tecnologías de separación para la captura de CO ₂	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Representación esquemática de un proceso de adsorción	16
Figura 2 Diagrama de flujo de la tecnología básica de membranas para captura de CO ₂	19
Figura 3 Diagrama básico comercial para un sistema de absorción de CO ₂	22
Figura 4	25
Figura 5 Diagrama de flujo método PRISMA para esta revisión sistemática.....	30
Figura 6 Número de artículos totales por cada base de datos	31
Figura 7 Número de publicaciones por año	32
Figura 8 Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados, realizado en VosViewer	33

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Lista de Verificación Revisión Sistemática.....	66
Apéndice B. Niveles de Madurez de Proyectos de Innovación	69

Glosario

COF: estructuras orgánicas covalentes

CO₂: dióxido de carbono

DEA: dietanolamina

ESA: adsorción por cambio eléctrico

MOF: estructuras organometálicas

MMM: membranas de matriz mixta

MEA: monoetanolamina

MDEA: metildietanolamina

PSA: adsorción por cambio de presión

TSA: adsorción por cambio de temperatura

Resumen

Título: Revisión Sistemática de Tecnologías para Captura de CO₂^{1*}

Autores: Puentes Quiroz Lidia Esther, Velandia Charris Laura Andrea ^{**}

Palabras clave: Captura de CO₂, Tecnologías, Absorción, Adsorción, Desorción, Membranas.

Descripción:

El aumento de emisiones de gases de efecto invernadero debido al desarrollo industrial ha causado un rápido incremento en la temperatura global, generando el grave problema del calentamiento global. Para abordar esta crisis, se requieren estrategias eficientes, eco-amigables y económicas. El CO₂, principal gas implicado, ha impulsado una amplia investigación en métodos de captura para mitigar sus efectos nocivos en el medio ambiente. En este estudio, se realizó una revisión sistemática según la metodología PRISMA, con el fin de identificar las fortalezas y desafíos principales de cuatro tecnologías de captura de CO₂ (membrana, absorción, adsorción y desorción) investigadas. Se evidenció que absorción y adsorción son las tecnologías más estudiadas, con avances notables a lo largo de los años. La absorción centra la atención de sus investigaciones en el diseño de nuevos materiales de aminas y líquidos iónicos para mejorar la capacidad de captura y reducir costos de energía. La adsorción incorpora otros procesos como la irradiación por microondas para acelerar su operación. Además, el análisis TRL (*technology readiness levels*), mostró que las tecnologías de membrana y adsorción aún se encuentran en fases de desarrollo piloto y demostración. En contraste, el método de absorción ya ha alcanzado el mercado, lo que podría explicar su mayor adopción y uso.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: César Augusto Guevara Lastre. Ingeniero Químico, M.Sc. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada. Ingeniero Químico, M.Sc.

Abstract

Title: Systematic Review of Technologies for CO₂ Capture^{2*}

Authors: Puentes Quiroz Lidia Esther, Velandia Charris Laura Andrea **

Keywords: CO₂ Capture, Technologies, Absorption, Adsorption, Desorption, Membranes.

Description:

The increase in greenhouse gas emissions due to industrial development has caused a rapid increase in global temperature, leading to the serious problem of global warming. To address this crisis, efficient, eco-friendly and cost-effective strategies are required. CO₂, the main gas involved, has prompted extensive research into capture methods to mitigate its harmful effects on the environment. In this study, a systematic review was conducted according to the PRISMA methodology, in order to identify the main strengths and challenges of four CO₂ capture technologies (membrane, absorption, adsorption and desorption) investigated. It became evident that absorption and adsorption are the most studied technologies, with remarkable advances over the years. Absorption focuses research attention on the design of new amine materials and ionic liquids to improve capture capacity and reduce energy costs. Adsorption incorporates other processes such as microwave irradiation to accelerate its operation. In addition, the TRL (technology readiness levels) analysis showed that membrane and adsorption technologies are still in the pilot development and demonstration phases. In contrast, the adsorption method has already reached the market, which could explain its greater adoption and use.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering Department. Director: César Augusto Guevara Lastre. Chemical Engineer, M.Sc. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada. Chemical Engineer, M.Sc.

Introducción

En la actualidad, el cambio climático se está produciendo debido al aumento de la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂), conocido como el principal gas de efecto invernadero, esencial para mantener el equilibrio térmico de la Tierra y preservar la biodiversidad (Yan et al., 2017). Un aumento significativo en la concentración de CO₂ en la atmósfera provoca una serie de problemas como el aumento del nivel del mar, el deshielo de los glaciares y la acidificación de los océanos. Estos fenómenos afectan a todos los seres vivos, incluidos los seres humanos (Fu et al., 2022a). El gas de efecto invernadero es mayoritariamente emitido a gran escala por fuentes fijas de CO₂ más concentradas, como plantas generadoras de energía eléctrica y otros procesos industriales importantes después de quemar combustibles fósiles como gas natural, petróleo y carbón (Lillia et al., 2018a). Hasta la Revolución Industrial, los niveles de CO₂ se mantenían estables en alrededor de 280 ppm; desde entonces, las actividades humanas han generado aproximadamente 1.5 billones de toneladas de dióxido de carbono, y las emisiones totales han aumentado un 47 % en la última década, en 2022, los niveles alcanzaron 421 ppm (Cantador-Fernandez et al., 2023).

En vista de esto, es necesario la implementación de sistemas que ayuden la captura de carbono en los diseños de plantas industriales, tanto nuevas como existentes, con el objetivo de atrapar el 90 % de las emisiones y reducir los costos de energía en un 35 % (Lim et al., 2013). Como resultado, muchas fuentes importantes de emisiones han adoptado uno de los tres sistemas de captura de carbono disponibles: sistemas de captura de oxcombustible, precombustión y postcombustión. Estos sistemas están orientados hacia el rendimiento de la captura y los requisitos mínimos de energía (Yoro et al., 2016). El sistema de oxcombustible implica la utilización de un gas de combustión compuesto principalmente por CO₂ y H₂O, generado mediante oxígeno puro

en lugar de aire ambiente. En un sistema de precombustión se lleva a cabo un proceso de conversión donde el CO₂ es el subproducto no deseado que se genera y captura (Favre, 2007); tanto el monóxido de carbono como los gases de hidrógeno reaccionan con el oxígeno/aire en el convertidor de cambio, generando un exceso de CO₂ (The CMS et al., 2014). El sistema de captura postcombustión tiene la capacidad de reducir la concentración de CO₂ entre un 5 % y un 15 % al capturar la corriente de gas residual después de la conversión de la fuente de carbono (Tontiwachwuthikul et al., 2011). Al emplear este sistema existe flexibilidad en la operación, ya que pueden adaptarse a plantas existentes sin necesidad de revisiones en el ciclo de combustión (H. Wang et al., 2015). Los tres sistemas son potencialmente útiles para mitigar las emisiones globales de CO₂; sin embargo, la captura postcombustión presenta mayor ventaja porque puede adaptarse a las plantas existentes, reduciendo así los costos de capital iniciales de esta fuente de mitigación (Mahenthiran & Jawad, 2021a).

En este orden de ideas, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre sistemas de captura postcombustión, siguiendo las directrices de la metodología PRISMA, la cual consiste en un conjunto de 27 ítems (ver Apéndice A) que permite documentar de manera transparente el porqué de la revisión, qué hicieron los autores y qué encontraron (Yepes-Nuñez et al., 2021). Este proceso implicó recopilar toda la información relevante para identificar, seleccionar y evaluar los avances tecnológicos enfocados en procesos de absorción, adsorción y uso de membranas. Se realizó una revisión sistemática de los distintos materiales utilizados para cada tecnología, considerando factores como permeabilidad, temperatura, presión y selectividad, conduciendo a la identificación de desafíos y brechas que estas técnicas enfrentan para lograr una pureza y recuperación superiores al 90 % en la captura de CO₂.

1. Estado del Arte

Se llevó a cabo una revisión documental orientada a diversas investigaciones sobre vigilancia tecnológica y el protocolo empleado. Por ejemplo, Criado (2021) realizó un trabajo enfocado en la verificación de membranas para la pervaporación etanol-agua. La investigación se desarrolló de acuerdo con los parámetros PRISMA, gracias al cual elaboró un análisis bibliométrico del número de artículos publicados y citados por año, autores más relevantes, países y revistas con mayor número de publicaciones, analizando a su vez los avances, desarrollos y retos, así como los diferentes métodos para la síntesis de membranas, exponiendo tendencias en el uso de materiales, condiciones operativas y los desafíos de la tecnología bajo estudio.

Por otra parte, Ángel & Orozco (2021) realizaron un informe de vigilancia tecnológica enfocado en los sistemas de conservación que utiliza el CO₂ como gas refrigerante. Se elaboró una revisión exhaustiva de los aspectos técnicos y las modificaciones del ciclo relacionadas con este tipo de sistemas. Para llevar a cabo la investigación, se estableció una ecuación de búsqueda que se utilizó en la base de datos Scopus, obteniendo un conjunto de artículos publicados desde 1998 hasta 2020, que proporciona información sobre la cantidad de publicaciones, los países publicados y las áreas de conocimiento en las que se clasifican las referencias. Los autores demostraron que los desarrollos tecnológicos se están centrando en el aprovechamiento del calor generado en los intercambiadores de calor intermedios y en el condensador para suministrar agua caliente al proceso, además de integrar circuitos de calefacción de aire.

De igual forma, Villa & Quevedo (2022) realizaron una búsqueda bibliográfica enfocada en la adsorción de los aniones nitrato y fosfato de aguas residuales provenientes del sector agrícola, siguiendo el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Este protocolo es una guía que ayuda a los autores de revisiones sistemáticas a

documentar de manera transparente el porqué de la revisión, lo que hicieron los autores y lo que encontraron. En la investigación se realizó una verificación bibliométrica de las publicaciones entre los años 2016 y 2021, los países y científicos más relevantes, destacando las variables y mecanismos que influyen en la eficiencia de los materiales que pueden ser implementadas en el proceso de adsorción.

Finalmente, Serrano & Diaz (2022), en su trabajo de grado sobre vigilancia científica del desarrollo de alternativas tecnológicas anticorrosivas sobre acero al carbono de uso en la industria petroquímica, realizaron un análisis detallado también bajo los parámetros del protocolo PRISMA, en el cual realizaron una revisión bibliográfica de artículos y documentos científicos, sus autores más destacados y los países que lideran estas investigaciones entre los años 2011 y 2021; a su vez, indagaron aspectos como la evolución histórica, clasificación de las tecnologías, sus materiales y estrategias usadas en el recubrimiento. La revisión sistemática proporcionó una visión detallada de las tecnologías anticorrosivas utilizadas para el acero al carbono en la industria petroquímica, resaltando el potencial del método sol-gel como una estrategia de deposición prometedora para futuras investigaciones.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Elaborar un estudio de vigilancia científica orientado al desarrollo de métodos y tecnologías para la captación de CO₂.

2.2. Objetivos Específicos

Realizar un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas que tengan relación con los diversos métodos y tecnologías aplicados a la captación de CO₂.

Identificar los avances científicos más relevantes en el desarrollo de métodos de captación de CO₂, mediante el análisis comparativo de artículos publicados en revistas científicas.

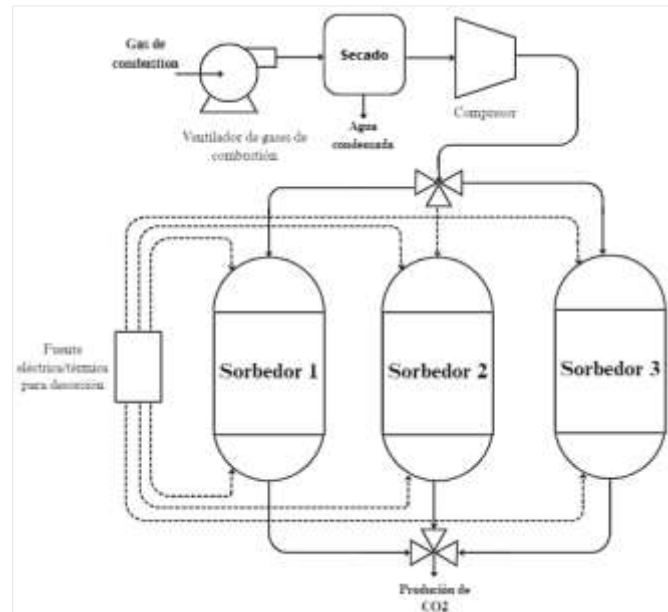
Definir los aspectos claves y desafíos actuales relacionados con la tecnología objeto de estudio.

3. Marco Conceptual

3.1. Adsorción

La adsorción es un método muy utilizado para separar y concentrar el dióxido de carbono presente en mezclas gaseosas, como los gases de combustión o el aire ambiente (Mukherjee et al., 2019). Las partículas tienen la capacidad de unirse a adsorbentes específicos como zeolitas, carbonos porosos (carbón activado, tamices moleculares de carbono), óxidos metálicos, silicatos porosos y estructuras organometálicas. En la Figura 1 se muestra un proceso de adsorción, en el cual la mezcla de gases entra en contacto con el adsorbente y las moléculas de CO₂ se adhieren a su superficie, logrando así separarlas eficazmente de los otros componentes del gas (Sovacool & Brossmann, 2010); luego, el CO₂ capturado se recupera del adsorbente mediante un proceso de regeneración, y este ciclo se repite. La tecnología basada en adsorción, que generalmente utiliza adsorbentes en lechos empacados, puede agruparse en tres modos operativos principales, según cómo se lleva a cabo la regeneración del adsorbente: adsorción por oscilación de presión (PSA), adsorción por oscilación de vacío (VSA) y adsorción por cambio de temperatura (TSA) (Ruthven et al., 1994).

En el proceso de adsorción, se dispone de una amplia gama de sorbentes, tanto comercialmente disponibles como en desarrollo. Estos incluyen carbones activados, zeolitas, estructuras organometálicas (MOF) y estructuras orgánicas covalentes (COF) (Darunte et al., 2019; Findley et al., 2018). Este amplio espectro demuestra que la elección del adsorbente es esencial para llevar a cabo un proceso eficiente, considerando aspectos como alta capacidad de regeneración, alta selectividad, baja penalización de energía para la captura de CO₂, capacidad cíclica estable, estabilidad a largo plazo y bajo costo (S. H. Kim et al., 2022).

Figura 1*Representación esquemática de un proceso de adsorción**Nota.* Adaptado de Song et al., 2019

Carbón activado: es un adsorbente físico común que posee una estructura microporosa abundante y amplia superficie específica, que oscila entre 500 y 1700 m²/g. Se utiliza en diversas aplicaciones industriales, restauración ambiental, almacenamiento de energía, entre otras, convirtiéndolo en un adsorbente con grandes perspectivas de desarrollo (Patel et al., 2023).

Zeolita: ha ganado importancia como material adsorbente gracias a su estructura única y su potencial de intercambio catiónico. La zeolita exhibe una disposición de adsorción notable, presentando una capacidad de CO₂ de 0.9 a 1.4 mmol/g (Keller et al., 2019).

MOF: son estructuras cristalinas porosas formadas por bloques de construcción orgánicos e inorgánicos que poseen propiedades de adsorción robustas (Liu et al., 2017). Estos MOF pueden estar compuestos por ligandos de enlace orgánico y diversos metales de transición (iones metálicos o grupos de metales), unidos a través de enlaces de coordinación. La posibilidad de ajuste direccional permite el diseño de MOF variados (Missaoui et al., 2023).

COF: son materiales cristalinos porosos con una estructura extendida, conectada por elementos ligeros (H, C, N, O, B) mediante enlaces covalentes. Estas estructuras conservan sus propiedades a temperaturas de 500-600 °C, lo que los posiciona como potenciales adsorbentes de CO₂ (Stampi-Bombelli et al., 2020).

Además de lo anteriormente mencionado, en la Tabla 1 se hace una descripción detallada acerca de las ventajas y desventajas más relevantes de los materiales adsorbentes, teniendo en cuenta que factores como capacidad de adsorción, selectividad y costo, son determinantes a la hora de escoger el sólido más adecuado para la separación requerida.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de los materiales de adsorción en la captura de CO₂.

Material adsorbente	Ventajas	Desventajas	Fuente
Carbón activado	Fuerte capacidad de adsorción. Bajo costo de producción. Buena estabilidad química	Baja resistencia al agua; La capacidad de adsorción se ve significativamente influenciada por la presión parcial de CO ₂ .	(Sarwar et al., 2021; Serafin et al., 2021)
Zeolita	Después del proceso de adsorción, es posible reactivar y reciclar repetidamente mediante cambios en la presión. Posee una vida útil extensa, su capacidad de adsorción es superior a la de otros adsorbentes.	La capacidad de adsorción se ve afectada por la temperatura y la presión parcial de CO ₂ . Es apta únicamente para entornos sin humedad, ya que es sensible al vapor de agua y una reducción en la selectividad.	(S. J. Chen et al., 2017; M. Kim et al., 2022)
MOF	Reducir eficazmente la concentración de CO ₂ . Convierte el CO ₂ en elemento valioso.	Son inestables, y varios factores, como el volumen y las características de los poros, así como los sitios metálicos y la presión, limitarán la capacidad de adsorción de CO ₂ . Alto costo.	(Lei et al., 2022; Tapiador et al., 2022)
COF	Gran superficie específica, alta porosidad, alta cristalinidad, estructura ajustable.	El alto costo se debe a la complejidad en la síntesis de materiales.	(Gendy et al., 2021; J. Wang et al., 2022)

Por otra parte, la adsorción puede lograrse mediante cambios en la temperatura o la presión del adsorbente (Gendy et al., 2021). La adsorción por oscilación de temperatura (TSA) inicialmente opera a temperaturas bajas o a temperatura ambiente y, a continuación, en la etapa de desorción se requiere adición de calor para regenerar el adsorbente, manteniendo la presión baja y

constante (Chaparro et al., 2023); el CO₂ se libera del sistema al aumentar la temperatura, lo cual se logra mediante el uso de vapor o aire caliente. Aunque este método permite alcanzar una pureza y recuperación superiores al 95 y 80 %, respectivamente, sus principales inconvenientes son el alto consumo de energía en su operación y el tiempo que requiere regenerar el adsorbente (Bach et al., 2022a). Respecto a la tecnología de adsorción por oscilación de temperatura al vacío (TVSA), que combina adsorción al vacío con TSA, los adsorbentes capturan el CO₂ a presión y temperatura ambiente, siendo necesario un vacío moderado y un calentamiento para liberar CO₂ (Yang, M., 2019); esto permite resolver el problema de la regeneración del adsorbente, logrando llevarlo a cabo a bajas temperaturas, lo que resulta en un requerimiento energético menor que el de un proceso VSA. Este método permite alcanzar una pureza de hasta 99.96 % (Elfving et al., 2021).

En lo referente a la adsorción por cambio de presión (PSA), esta es un proceso donde el adsorbato se expone a una baja presión durante la adsorción y luego se desorbe a presiones reducidas o normales, manteniendo una temperatura constante (Broom, 2023). El objetivo de la técnica es lograr la recuperación de más del 85 % de las emisiones de CO₂ provenientes de las plantas (Iruretagoyena et al., 2023a). Cuando la desorción se lleva a cabo en condiciones de vacío, se denomina adsorción por cambio de presión al vacío (VPSA), y es óptima para la captura de CO₂ debido a su bajo consumo de energía, costos reducidos y alta flexibilidad operativa (Danaci et al., 2023).

Por último, la adsorción por cambio eléctrico (ESA) es similar a la TSA, pero en el caso de la ESA la desorción se favorece mediante el uso de corriente eléctrica para generar calor y aumentar la temperatura mediante el efecto Joule (Regufe et al., 2019). Esta técnica puede reducir el tiempo de calentamiento y la pérdida de transferencia de calor directamente al adsorbente, en comparación con la TSA; sin embargo, conlleva un alto consumo de energía. Por lo tanto, la

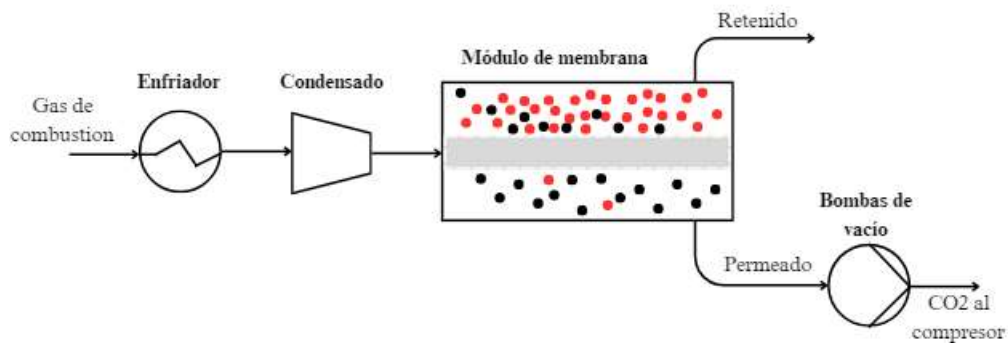
viabilidad de implementar esta tecnología depende de si el valor generado por unidad de CO₂ capturado puede compensar el consumo energético (Elfving et al., 2021). Se ha encontrado que la recuperación de CO₂ ha logrado ser del 72 % con una pureza del 89,7 %, lo que demuestra que la ESA puede ser una tecnología de captura de CO₂ digna de una mayor exploración (Fu et al., 2022).

3.2. Membranas

Las técnicas de membrana constituyen una innovación en la separación del CO₂ de las mezclas de gases de combustión. Este método se basa en el uso de una capa delgada de material semipermeable que separa un determinado medio gaseoso al aplicar una fuerza impulsora, como la diferencia de presión, temperatura o potencial eléctrico a ambos lados de la membrana. La membrana divide la corriente de gas (alimentación) en dos flujos: permeado y retenido (Dziejarski et al., 2023a). En la Figura 2 se puede observar la representación gráfica de un proceso de captura de CO₂ mediante membranas.

Figura 2

Diagrama de flujo de la tecnología básica de membranas para captura de CO₂



Nota. Adaptado Wang et al., 2017.

El rendimiento de la membrana depende de los materiales utilizados en la fabricación, así como de la permeabilidad al CO₂ y la selectividad, lo cual influye en la economía de un proceso de

separación de gases, siendo la selectividad esencial para lograr una alta pureza y rendimiento (Jasim et al., 2023). Existen tres tipos principales de membranas: poliméricas, inorgánicas y de matriz mixta (MMM), cada una de ellas clasificada en membranas porosas y no porosas (Mahenthiran & Jawad, 2021a).

Las membranas orgánicas se fabrican a partir de polímeros como acetato de celulosa y poliamidas aromáticas, ofrecen una permeabilidad y selectividad altamente ajustables gracias a la manipulación de la preparación del polímero y su composición química, (Song et al., 2023); sin embargo, sufre de problemas como el hinchamiento y la plastificación por el agua (G. Chen, Wang, et al., 2022). A pesar de estos inconvenientes, su costo relativamente bajo, variedad y fácil manipulación durante el procesamiento, pueden compensar dichas limitaciones; además, la capacidad de manipular el polímero y la combinación de elementos químicos durante la preparación de la membrana proporciona una ventaja adicional (Kamolov et al., 2023)

Las membranas inorgánicas (no poliméricas) incluyen materiales cerámicos, metálicos, zeolitas y redes organometálicas (Cheng et al., 2023). Ofrecen una mayor estabilidad química y térmica en comparación con las membranas poliméricas, y pueden clasificarse en tipos mesoporosos, microporosos y densos, según su propósito de uso. Las membranas microporosas tienen baja permeabilidad, pero mayor selectividad, mientras que las mesoporosas muestran características opuestas; en cuanto a las membranas densas, estas tienen un rendimiento superior en selectividad, aunque su permeabilidad es menor (Pham & Space, 2020). A pesar de ofrecer ventajas como su estabilidad y rendimiento, aún se requiere una reducción de costos significativa para su implementación comercial en procesos de captura de CO₂; además, el procesamiento de membranas inorgánicas presenta desafíos, ya que tienden a romperse fácilmente sin deformación plástica (Kamolov et al., 2023). Por otro lado, la membrana de matriz mixta (MMM) están

compuestas por un polímero con relleno inorgánico y combinan la permeabilidad del material polimérico con la selectividad de material inorgánico, para de esa manera crear una membrana híbrida (Richter, 2018). En la Tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas de cada tipo de membrana anteriormente mencionado.

Tabla 2

Ventajas y desventajas de la relación entre la selectividad y la permeabilidad en los tres tipos de membrana

Membranas	Ventajas	Desventajas	Fuente
Membranas poliméricas	Fácil síntesis y fabricación Bajo costo de producción Buena estabilidad mecánica.	Baja estabilidad térmica y química. Plastificación. El tamaño de los poros no se puede ajustar. Sigue el equilibrio entre selectividad y permeabilidad.	(Kamolov et al., 2023; Vinoba et al., 2017)
Membranas inorgánicas	Mayor estabilidad química, mecánica y térmica. El tamaño de los poros es ajustable. Capaz de trabajar en condiciones duras. Compensación moderada entre selectividad y permeabilidad.	Frágil. Alto costo. Dificultades a la hora de su aplicación.	(Kamolov et al., 2023)
Membrana de matriz mixta	Mejor estabilidad mecánica y térmica. Menor plastificación. Menor necesidad de energía. Compactos a mayor presión. Supera el equilibrio entre selectividad y permeabilidad.	La elevada fracción de cargas lo hace frágil en la matriz polimérica. La calidad de la matriz polimérica dicta la estabilidad química y térmica.	(Joglekar et al., 2019; Tang et al., 2021)

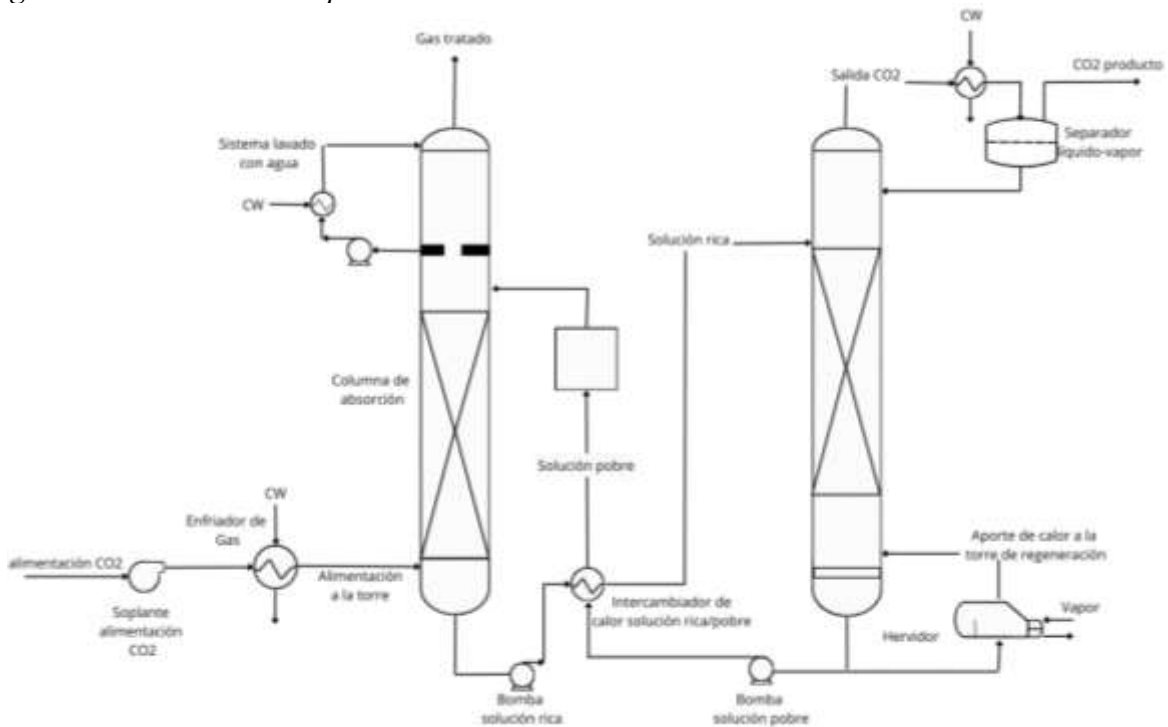
3.3. Absorción

La captura de carbono por el método de absorción se basa en el principio de que el CO₂ presente en un gas de alimentación se transfiere a una fase líquida mediante absorción selectiva en una disolución acuosa alcalina absorbente. El diagrama de flujo de un proceso comercial de absorción de CO₂ es presentado en la Figura 3. El proceso consiste en dos columnas: una de absorción, en la cual el CO₂ es absorbido por el solvente químico, donde la temperatura

oscila entre 40 y 60 °C, y, posteriormente, la solución rica en CO₂ es bombeada hacia una torre de regeneración. La regeneración química del solvente se lleva a cabo a un rango de temperatura entre 100 y 140 °C, a una presión no mucho más alta que la atmosférica. Luego, el disolvente es devuelto a la torre de absorción con mínima concentración de CO₂ (Luis & Fuentes).

Figura 3

Diagrama básico comercial para un sistema de absorción de CO₂



Nota. Adaptado de Luis & Fuentes, s.f.

La absorción puede clasificarse dependiendo de la interacción entre los componentes del gas y el absorbente. En la absorción física, el CO₂ presente en la corriente de gas es más soluble en el líquido que en las demás sustancias, pero no ocurre reacción química. En la absorción química ocurre una reacción entre el CO₂ y un componente en la fase líquida, como lo es la absorción de CO₂ con aminas; el método consiste en eliminar el CO₂ del gas de alimentación (rico en CO₂) a través del contacto por convección entre la alimentación y el disolvente en una columna de relleno,

siendo el disolvente habitual monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) ó metildietanolamina (MDEA) (Buvik, Bernhardsen, et al., 2021). Estas aminas forman enlaces con el CO₂, lo que mejora su selectividad y capacidad de captura (Khan et al., 2023a). Durante décadas se han utilizado en endulzamiento de gas natural, aunque presentan un alto consumo de energía e inconvenientes relacionados con la corrosión en la captura de poscombustión, debido a su gran contenido de agua y la temperatura de regeneración (Chuahy et al., 2023). A pesar de ello, la absorción química da buenos resultados en términos de eficiencia de eliminación de CO₂ de baja concentración a bajas presiones (Dziejarski et al., 2023). En la Tabla 3 se describen de manera más detallada las ventajas y desventajas más destacadas de cada amina anteriormente mencionada.

Tabla 3*Ventajas y desventajas de los absorbentes en absorción*

Absorbente	Ventajas	Desventajas	Referencias
MEA	Alta velocidad de reacción con CO ₂ . Moderada capacidad de absorción. Bajo costo del disolvente.	Alto requisito de energía. Consume hasta el 50% de energía del proceso. Impacto nocivo para el medio ambiente. Alto consumo operativo	(Lee et al., 2023)
DEA	Bajo costo. Alta velocidad de reacción.	Alta energía para la regeneración del solvente debido a su alto calor de absorción.	(Janati et al., 2021)
MDEA	Bajo costo. propiedades mejoradas contra la degradación y la corrosión.	tasas de absorción más bajas.	(Bach et al., 2022; Kopitha et al., 2023)

La MEA es una amina altamente reactiva, es bastante económica y aunque es la menos estable del resto de etanolaminas, es la especie con mayor eficiencia de captura de CO₂ y, para el caso específico de separación de CO₂ de gases de combustión, es considerada la mejor opción (Nieminen et al., 2020). La literatura destaca que también cuenta con una cinética de reacción rápida, considerándose la estrategia más factible y la tecnología líder para la captura mediante absorción (Plesu Popescu et al., 2022). Respecto a la absorción de CO₂ con DEA, esta se lleva a

cabo utilizando concentraciones variables de amina desde el 1 al 5% en peso (Janati et al., 2021). Durante el proceso se observa que la descomposición térmica de la DEA ocurre en dos etapas distintas: una reacción intramolecular que produce MEA y óxido de etileno, y una descomposición del material residual. (de Ávila et al., 2015). Finalmente, la MDEA es una amina terciaria con una estructura estable que actúa como absorbente de CO₂. Durante el proceso forma bicarbonato mediante una reacción catalítica ácido-base, lo que se traduce en mayor capacidad de absorción: 1 mol de CO₂ por cada mol de MDEA. Además, el bicarbonato formado requiere menos energía para regenerarse, aproximadamente 58,8 kJ/mol de CO₂, en comparación con las aminas primarias y secundarias: 86,9 y 68,9 kJ/mol de CO₂, respectivamente (Kopitha et al., 2023).

4. Metodología

Esta revisión sistemática se llevó a cabo siguiendo las directrices de la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que establece un conjunto de 27 ítems (ver Apéndice A) estructurado en 7 etapas: formulación de la pregunta de investigación, búsqueda de artículos, selección de estudios, extracción de datos, análisis de riesgo de sesgo, análisis de datos y presentación de resultados preliminares. Mediante etapas específicamente diseñadas para asegurar la adecuada recolección, análisis y exposición transparente de la información, el propósito central de este estudio es sintetizar y presentar de forma clara los avances tecnológicos vinculados al tema en análisis. La metodología implementada se presenta en la Figura 4.

Figura 4

Diagrama metodológico



4.1. Búsqueda de Información

El método o protocolo PRISMA comienza con una etapa de selección de bases de datos, en donde se determinan las fuentes bibliográficas que serán útiles como herramienta de búsqueda. Se seleccionaron dos fuentes principales: Web of Science, y Scopus. Inicialmente, se realizó una

búsqueda preliminar de palabras claves y sus combinaciones, basándose en la plantilla de Excel “Estrategias de Búsqueda”, suministrada por la Biblioteca UIS para definir la ecuación de búsqueda. Dentro de las opciones de palabras claves se tienen: “*capture*”, “CO₂”, “*carbon dioxide*”, “*method*”, “*mechanism*”, “*technological surveillance*”, en conjunto con los operadores booleanos “AND” y “OR”. Estas combinaciones dieron como resultado varias ecuaciones, entre las cuales se seleccionó la que se consideró más adecuada. Teniendo definida la ecuación, se realizó la indagación en las tres fuentes bibliográficas seleccionadas, filtrando el tiempo desde enero 1 del 2019 hasta la actualidad. En la Tabla 4 se resumen los distintos criterios de inclusión y exclusión de la revisión.

Tabla 4

Criterios de selección de información empleados para la revisión sistemática

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos de investigación en los que el objetivo sea estudiar las siguientes técnicas: Tecnología con membranas, absorción, adsorción o desorción para la captación de CO ₂ .	Artículos de investigación que no estudien las técnicas mencionadas
	Información no presentada en idioma inglés
	Capítulos de libros
	Artículos

4.2. Selección de la Información

Posteriormente, se realizó un proceso de exclusión de documentos duplicados provenientes de los motores de búsqueda seleccionados, para lo cual se empleó la herramienta bibliográfica Mendeley. De acuerdo con el protocolo PRISMA, se considera recomendable tener el apoyo de un par evaluador en este paso de evaluación y construcción de los criterios de exclusión. Luego, se procedió con la lectura de los documentos y una depuración final, en la que se descartaron estudios que no contenían información valiosa para la investigación o que no fuesen a resultar útiles los datos que allí se contienen. Finalmente, se seleccionaron los documentos que se consideraron útiles y fueron destinados al análisis bibliométrico y bibliográfico.

4.3. Análisis de la Información

Los documentos obtenidos al aplicar el protocolo PRISMA se registraron en una matriz de Excel, con el fin de sintetizar la información obtenida y categorizarla en cuanto a año de publicación, autores con mayor participación, zona geográfica y revistas con el mayor número de citas. Seguido de esto, se realizó un estudio de tendencia en cuanto a los años de publicación para analizar el interés hacia este tipo de tecnologías. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación según el país donde fue publicado el documento. Luego, se procedió a identificar y determinar los distintos desafíos y avances que actualmente se presentan en el campo de los métodos de captación de CO₂; a su vez, se establecieron los aspectos considerados de gran relevancia para futuras investigaciones con base en la información obtenida y se llevó a cabo el análisis de los resultados reportados.

5. Resultados

5.1. Ecuaciones de búsqueda y selección información: protocolo PRISMA

En la actualidad, diversos procesos son empleados para la captura de dióxido de carbono; no obstante, con el fin de contar con gran cantidad de datos y a partir de ellos lograr comparar y realizar un análisis detallado de cada proceso, la presente investigación se centra en los tres métodos más estudiados y utilizados a lo largo del tiempo: absorción, adsorción y membranas. Los resultados preliminares de la formulación de la ecuación de búsqueda se encuentran en la Tabla 5. Este proceso de búsqueda permitió establecer el orden de las palabras clave, así como el manejo de los paréntesis y los operadores booleanos en la ecuación.

Tabla 5

Resultados de las ecuaciones de búsqueda utilizando Scopus fragmento 2019-2023

Ecuación de búsqueda	Documentos encontrados
(Ec.1) Capture AND methods AND carbon AND dioxide AND technology AND (absorption OR desorption OR adsorption OR membranes)	601
(Ec.2) Capture AND methods AND ("carbon dioxide" OR co2) AND technology	703
(Ec.3) Capture AND (methods OR techniques) AND ("carbon dioxide" OR co2) AND technology	878
(Ec.4) capture AND (methods OR techniques) AND ("carbon dioxide" OR co2) AND (technology OR process) AND (absorption OR desorption OR adsorption OR membranes)	1.792

Se optó por la Ecuación de búsqueda 4 debido a que proporcionó la mayor cantidad de resultados. Esta elección de ecuación se implementó en las dos herramientas de búsqueda implementadas y en la Tabla 6 se encuentra la cantidad de resultados obtenidos.

Tabla 6

Resultados de las ecuaciones de búsqueda en cada fuente bibliográfica

Base de Datos	Ecuación de Búsqueda	Resultados
Scopus	capture AND (methods OR techniques) AND ("carbon dioxide" OR co2) AND (1.792
Web Of Science	technology OR process) AND (absorption OR desorption OR adsorption OR membranes)	3.053
Total		4.845

En total se obtuvieron 4.845 resultados. Para todas las bases de datos se tuvo en cuenta el título, el *abstract* y palabras clave como filtro. A continuación, se llevó a cabo un segundo proceso de filtrado que se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7
Resultados obtenidos en el segundo proceso de filtrado

Base de Datos	Filtros aplicados	Resultados
Scopus	-Subject area: Environmental Science, Chemical Engineering -Document type: Articles, Reviews -Language: English -Keyword: CO ₂ capture -Open access: All open access	63
Web Of Science	-Document type: Article, Review article -Category: Chemical Engineering, Environmental Sciences -Language: English - Open access: All open access	371
	Total	434

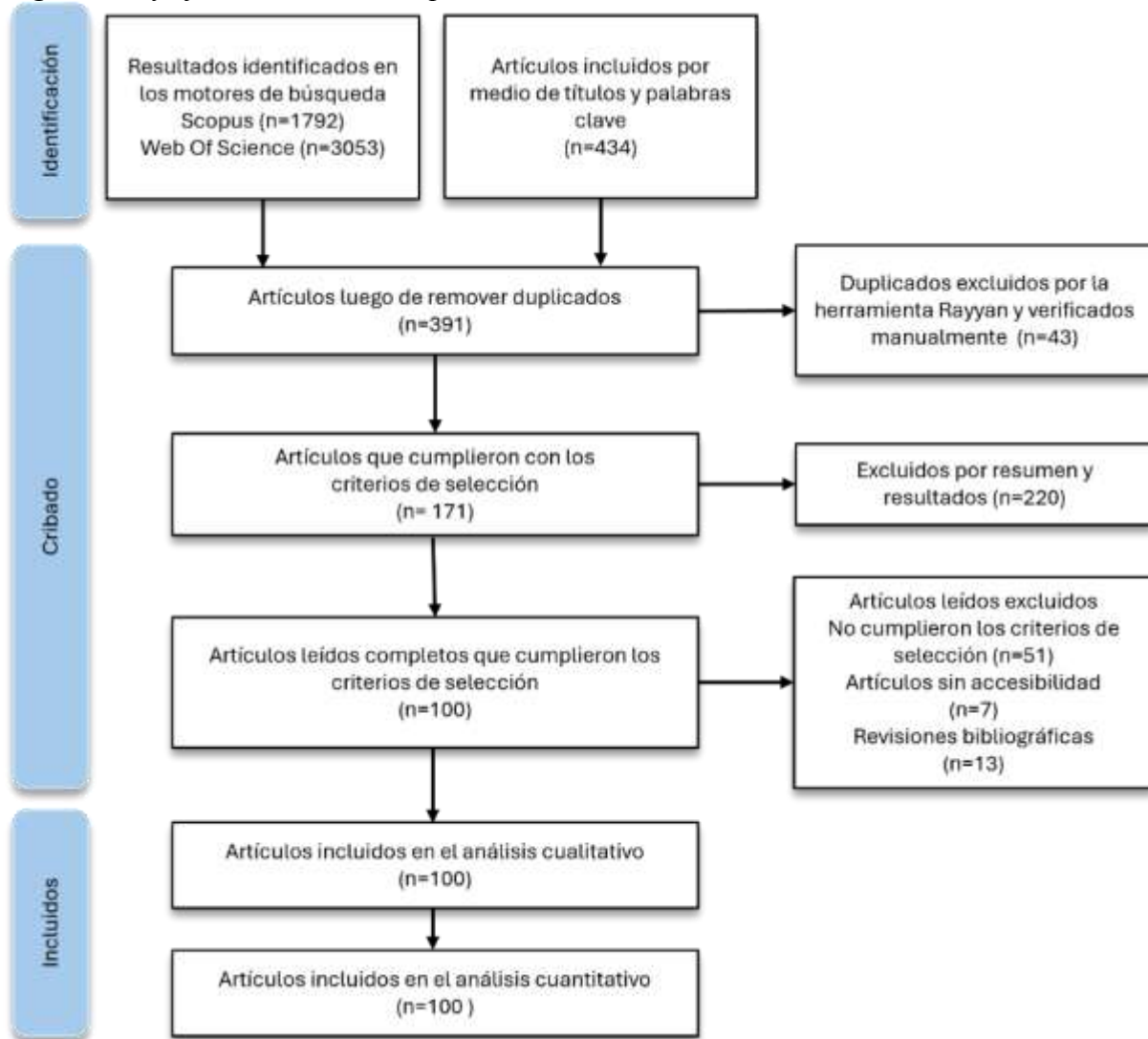
Con el fin de identificar y eliminar documentos duplicados, la información fue exportada como archivo BibTex y se ingresó a los softwares Mendeley y Rayyan; siendo el primero un gestor bibliográfico que facilita la creación y organización de bases de datos de referencias bibliográficas, y el segundo una herramienta que permite recopilar y examinar citas. Posteriormente, se realizó una verificación manual, debido a que estas plataformas no garantizan una eficacia del 100 %. Como resultado final, se identificaron 43 duplicados, dejando un total de 391 documentos que pasaron a un siguiente proceso de filtrado.

5.2. Criterios de Exclusión

Los criterios que se tuvieron en cuenta para filtrar los documentos y excluirllos fueron: i) artículos que, por su título y *abstract*, no corresponden a un método de captura de CO₂; ii) estudios que no contengan un análisis cuantitativo del método de captura; iii) procesos integrados que combinen tecnologías diferentes a las seleccionadas. En la Figura 5 se expone la cantidad de artículos seleccionados en cada etapa del proceso final de filtrado.

Figura 5

Diagrama de flujo método PRISMA para esta revisión sistemática



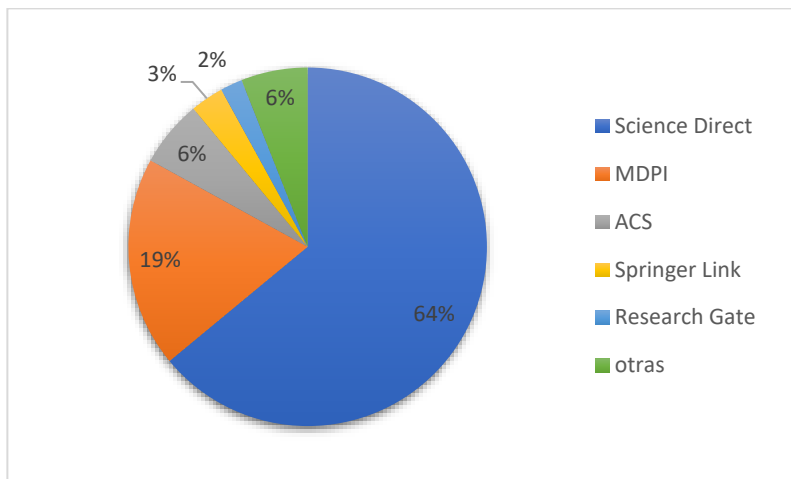
5.3. Análisis Bibliométrico

La información obtenida de los 100 artículos se registró en una tabla de Microsoft Excel y se clasificó de acuerdo con los autores, país, año de publicación, revista de origen y la base de datos donde se encuentra publicado. Además, se incorporaron datos esenciales para el análisis de las tecnologías empleadas como el tipo de material, el porcentaje de recuperación, los costos de operación, la selectividad y la permeabilidad (en el caso de captura con membranas), y condiciones de operación como temperatura y presión. La figura 6 revela que, entre las principales bases de

datos, *Science Direct* lidera con un 64 %, seguida por *MDPI*, que contribuye con un 19 % del total de publicaciones incluidas en esta revisión bibliográfica.

Figura 6

Número de artículos totales por cada base de datos



Se realizó un recuento de la cantidad de artículos publicados en cada uno de los años seleccionados, lo cual se detalla en la Figura 7. Se observa el crecimiento en la cantidad de investigaciones durante los últimos 5 años, debido, principalmente a los intereses actuales en mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y la búsqueda por la neutralidad de carbono, impulsado por el notable incremento en la demanda energética mundial, el mayor consumo de productos derivados del petróleo y más emisión de CO₂.

Con el propósito de determinar cuáles son las regiones más interesadas en el desarrollo de tecnologías de captura de CO₂, se realizó un análisis de publicaciones por países como se muestra en la Tabla 8, evidenciando los 10 países con más artículos publicados, siendo China el de mayor número de publicaciones (23 % del total de artículos). Este país ha invertido gran esfuerzo en la transición energética, puesto que desde el 2009 hasta el 2023 ha sido catalogado como el país con más emisiones de CO₂ en el mundo (IEA, 2023), incrementando en 750 millones de toneladas

entre 2019 y 2021. Por otro lado, también se resalta que Estados Unidos es el segundo país en nuestro análisis, representando el 13 % del total de artículos.

Figura 7

Número de publicaciones por año

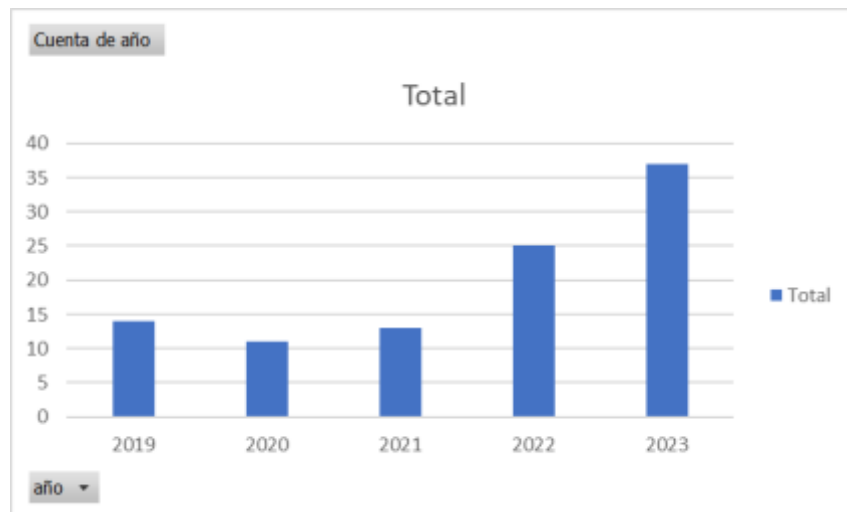


Tabla 8

Países con mayor número de artículos publicados acerca de métodos de captura de CO₂

País	Número de artículos	País	Número de artículos
China	23	Noruega	5
Estados Unidos	13	Italia	4
España	12	Corea del Sur	2
Reino Unido	9	Finlandia	2
Irán	6	México	2

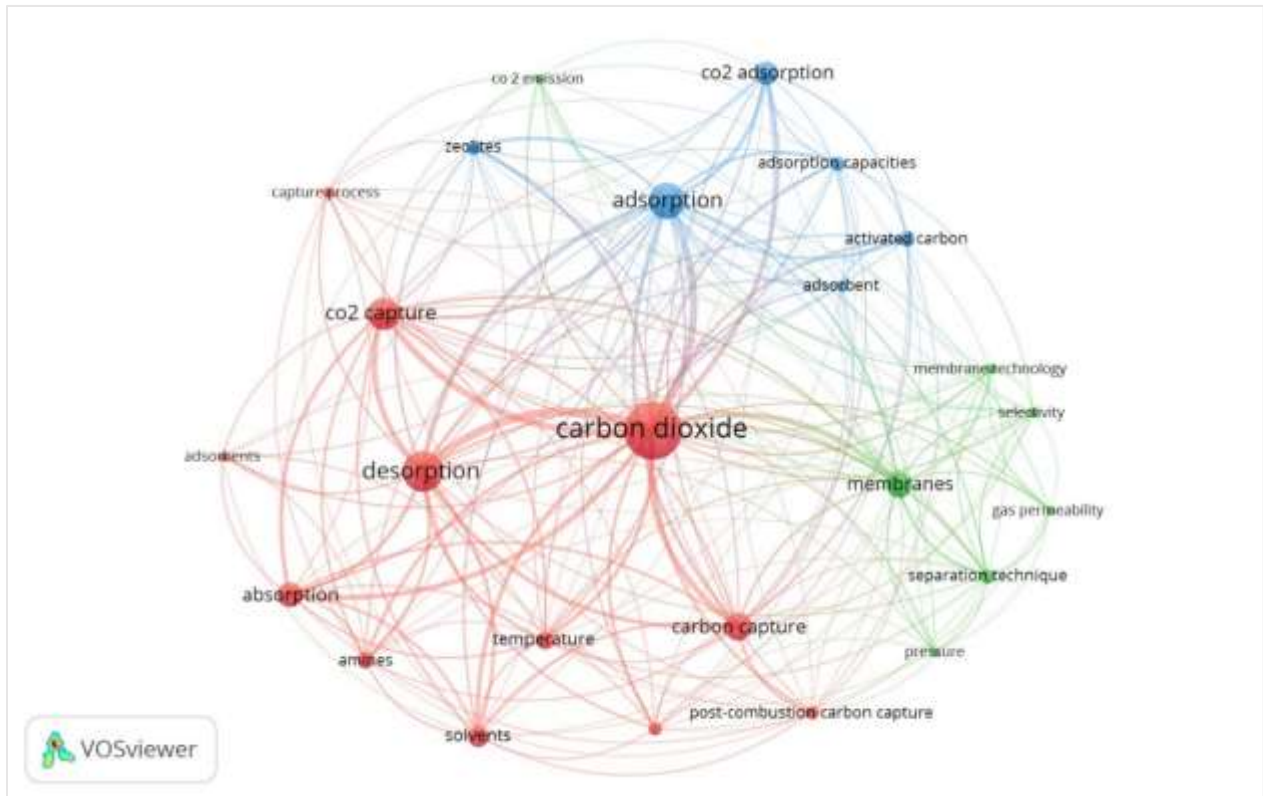
Se realizó un análisis de las revistas indexadas con más publicaciones, en donde se destacan divulgaciones de origen neerlandés (Chemical Engineer Journal), Suizo (Membranes) e Inglés (Carbon Capture Science & Technology), todas ellas enfocadas en reflejar investigaciones de vanguardia de alto impacto de captura de carbono.

Finalmente, la Figura 8 muestra las palabras que con más frecuencia se encontraron en los artículos analizados, que incluyen *carbon dioxide*, *adsorption*, *desorption*, *CO₂ capture* y

membranes. Además, se observa una agrupación de nodos verdes y azules que representan las tecnologías de adsorción y membranas, y palabras clave para estas dos tecnologías como lo son: adsorbentes, zeolitas, carbón activado, selectividad, permeabilidad del gas, presión. Por otro lado, los nodos de color rojo muestran los parámetros clave utilizados para lograr una alta pureza y recuperación: temperatura, presión, selectividad y permeabilidad. Se destaca que la zona de enfoque principal se encuentra en los nodos rojos, ya que conecta todas las técnicas y parámetros.

Figura 8

Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados, realizado en VosViewer



5.4. Análisis de las tecnologías de captura de CO₂

5.4.1. Adsorción

Se han dedicado esfuerzos a la búsqueda de adsorbentes que puedan capturar de manera eficiente el CO₂ de los gases de combustión, logrando desarrollar materiales que ofrecen ventajas

en términos de reciclabilidad, facilidad de manipulación y disposición para distintas condiciones de operación (Broom, D.P., 2023). En este orden de ideas, las MOF se benefician de versatilidad estructural y capacidad de ajuste en sus propiedades fisicoquímicas, ya que, al contar con una amplia gama de iones metálicos y ligandos orgánicos para ser diseñadas, permiten la creación de estructuras con propiedades específicas; lo anterior se debe a que las características de los componentes individuales afectan las propiedades globales del material. Entre los avances recientes en investigación de este adsorbente, se encuentran las MOF de cambio de fase, que muestran isothermas en forma de escalón, lo que significa que adsorben grandes cantidades de gas cuando se alcanza un umbral de presión parcial del adsorbato (Danasi et al., 2023); este comportamiento se asocia con la transición de fase del material sorbente y ello conduce a una mayor capacidad de adsorción. La MOF de cambio de fase F4-MIL-140A(Ce) tiene el potencial de ser un adsorbente más eficaz para la captura de CO₂ en corrientes de concentración altas (0.125 mol CO₂/mol de gas) en comparación con otros adsorbentes como Zeolita 13X, carbón activado, MOF UTSA-16, CALF-20 y HKUST-1 (Danasi et al., 2023). Sin embargo, este tipo de adsorbentes se encuentran apenas en fase de estudio y no han sido llevados a escala industrial. Por otro lado, la MOF n-ZIF-67 con ultra microporos (diámetro menor a 1 nm) es un adsorbente identificado como eficaz para la captura de gases de efecto invernadero por su tamaño de poro (0.6 nm), su área de superficie (1891 m²/g) y selectividad de CO₂ en mezclas de gases como CO₂/N₂ y CO₂/CH₄ (3.67 y 16.05, respectivamente), que además puede llegar a adsorber alrededor de 681 mg/g de CO₂, lo que representa una cantidad de captura superior al comparar con otras estructuras como n-ZIF-8, Zr-MOF y Mg-MOF-74 (Missaoui et al., 2023).

En el caso de las zeolitas, tanto las sintéticas como las naturales, han sido ampliamente estudiadas en la academia por su capacidad de capturar CO₂ de manera eficaz, principalmente a

temperaturas bajas. Sin embargo, para optimizar la adsorción de CO₂, la modificación de la superficie de las zeolitas se ha convertido en algo crucial (Cavallo, 2023). Se han investigado modificaciones de zeolitas con aminas, intercambio iónico, carbono, sílice y de tratamiento con ácido. Por un lado, la funcionalización de zeolitas con aminas ha demostrado mejorar la capacidad de captura de CO₂, puesto que esta alteración puede aumentar el área de superficie, reducir el tamaño de los poros y mejorar las propiedades de estabilidad y de regeneración (Bahmanzadegan, 2023). También, la modificación de zeolitas por medio de intercambio iónico ha demostrado mejorar la adsorción del CO₂ en presencia de gases de combustión, ya que mediante cationes se puede atraer el CO₂ específicamente y, por ende, aumentar la selectividad hacia este gas (Bahmanzadegan, 2023). Sin embargo, a pesar de las ventajas mencionadas que prometen las zeolitas como adsorbentes de CO₂, para una aplicación industrial los gases de combustión deben ser secados previamente, debido a que las zeolitas son hidrófilas, lo que reduce su capacidad de captura cuando hay humedad en el gas (Zhang, 2020), incidiendo en un incremento del consumo energético y en el coste final. Para que una tecnología de captura de CO₂ pueda ser considerada compatible y digna de potencial industrial, debe cumplir con requisitos específicos como alta capacidad de recuperación (o regeneración), bajos costos, estabilidad y alta selectividad por el CO₂.

Dado que el proceso de adsorción es costoso, se requiere el desarrollo de adsorbentes económicos y, en este contexto, los derivados de biomasa son de gran importancia. El carbón activado (CA) se desarrolla a partir de recursos renovables, económicos y abundantes, que proceden, en mayor medida, de desechos agrícolas o residuos de biomasa. Estos dos precursores son los más utilizados, ya que poseen un alto contenido de carbono y baja cantidad de cenizas. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 9, se han utilizado diferentes precursores para

sintetizar CA con porosidad alta y buenas propiedades de adsorción. El carbón activado se considera un adsorbente prometedor para la captura de CO₂, no solo por su bajo costo, sino también por su alta superficie específica, la textura de poros ajustable, la hidrofobicidad y, además, la biomasa tiene características clave como sostenibilidad, rentabilidad y alta disponibilidad (M. Li & Xiao, 2019).

Tabla 9*Precursores de carbón activado*

Precursor	Diámetro de poro	Adsorción de CO ₂	Costo	Fuente
Tapabocas M800	0.7-1 nm	3.91 mmol/g	2.10 €/kg	(Jaroslaw-Serafin et al., 2022)
Biomasa residual de té (activado con KOH)	1-16 nm	2.32 mmol/g	-	(Maryam Tahmasebpoor et al., 2023)
Semillas de oleaster (OS) mezclado con partículas gruesas de craqueo catalítico	250-300 μm	2.78 mmol/g	-	(Mir-Jamaledin Athari et al., 2023)
Aserrín de pino	1.14 nm	6.35 mmol/g	-	(Himanshu-Patel et al., 2023)
Cáscara de arroz	2.42-3.38 nm	110.78 mg/g	-	(E. Gutiérrez-Bonilla et al., 2022)

En la Tabla 10 se detalla la capacidad de adsorción de distintos materiales, así como el tiempo que tomó llevar a cabo su síntesis. El carbón activado que se menciona en dicha tabla, es una estructura microporosa con diámetro de poro entre 2.42 y 3.2 nm, con un área superficial de 1384.4 m²/g que alcanza una capacidad de adsorción de 110.78 mg/g. Respecto a la amina MCM-41 integrada con HNT (nanotubos de Halloysite huecos, con diámetro interior de 15-30 nm) y APTES (3-aminopropiltriétoxissilano), esta presenta un diámetro de poro entre 2 y 4 nm, con área superficial de 1418 m²/g y una capacidad de adsorción de 1.53 mmol/g. Finalmente, la zeolita 4A (a partir de la calcinación de la Zeolita Kaolinita a 600 °C) presenta una capacidad de captura de 2.5 mmol/g con un área superficial menor a 15 m²/g. De acuerdo con lo anterior, el carbón activado tiene una ventaja sobre los otros dos materiales descritos, pues su síntesis toma mucho menos

tiempo y muestra una capacidad de adsorción mayor que la zeolita; sin embargo, debe alcanzarse una temperatura bastante elevada para que logre ser sintetizado (600°C), lo que aumenta los costos totales del proceso, esto si se tiene en cuenta su síntesis dentro del análisis económico, sin embargo, es importante precisar que estos materiales se encuentran en etapa temprana de investigación y no cuentan con análisis económicos del proceso.

Tabla 10*Datos de síntesis de adsorbentes*

Metodología	Tiempo de síntesis	Adsorción de CO ₂	Temperatura [°C]	Presión [atm]	Fuente
carbón activado	1h	110.78 mg/g	600	1	(Gutiérrez-Bonilla et al., 2022)
Amina MCM-41 con APTES	37h	1.53 mmol/g	80	1	(Ajumobi et al., 2023)
Zeolitas a base de metakaolinita	48h	2.5 mmol/g	100	1	(Cecilia et al., 2022)

En la Tabla 11 se detallan las condiciones de operación para diversos procesos de regeneración de adsorbentes como TSA, PSA, T/ESA, T/ESA, TVSA y VSA, en orden creciente de capacidad de captura de CO₂. La aplicación de una técnica u otra depende de factores como la composición del gas que se busca separar, las condiciones de operación y las impurezas presentes en el gas. El método PSA (el adsorbente se regenera mediante reducción de la presión), al tratarse de una variación en la presión, obtiene la energía requerida mediante trabajo mecánico únicamente; esto, aunque es un factor que facilita su aplicación, un aumento de costos totales, pues el valor de modificar la presión es mayor en comparación a una variación de temperatura (TSA) (Brieuc Verougstraete, 2020). A diferencia de los otros métodos, la adsorción por variación eléctrica (ESA) requiere de un calentamiento por corriente eléctrica de bajo voltaje para que el adsorbente se regenere, mientras que la adsorción por oscilación eléctrica de temperatura (T/ESA) puede funcionar como una adsorción por variación de temperatura (TSA), aumentando su temperatura

por efecto Joule, siempre y cuando el material adsorbente cuente con una buena conductividad eléctrica.

Tabla 11*Procesos de adsorción con variación de Presión y/o Temperatura*

Material empleado	Método de regeneración	Parámetros	% de adsorción	Fuente
Carbón activado	TSA	TA: 50 °C TD:120°C P:1.3 bar	82	(Verougstraete et al., 2020)
Zeolita-13x	PSA	TA:200°C P: hasta 10 bar	88.2	(Iruetagoiena et al., 2023)
Zeolita MS-13x	T/ESA	T:100°C P:1.04 bar	92.14	(Lillia et al., 2018)
Zeolita-13x	TVSA	TA:25°C TD:140°C P:1.5 bar	97.66	(Jiang et al., 2020)
Carbón activado	VSA	T:30°C P:1.3 bar	100	(Akdag et al., 2022)

Tabla 12*Nivel de madurez tecnológica (TRL) para las técnicas de regeneración*

Técnica de regeneración	Nivel de madurez tecnológica (TRL)
ESA	Entre 3 a 4
TSA	Tiene un nivel de 5 a 7
VPSA y TPSA	6
PSA y VSA	9

En la Tabla 12 se encuentran las técnicas de adsorción anteriormente mencionadas con sus respectivos niveles de madurez tecnológica (TRL). Como se puede observar, la ESA se encuentra en un nivel de madurez entre 3 y 4, lo que significa a escala de laboratorio. La TSA está en un nivel entre 5 y 7; esto hace referencia a que se ha llevado a cabo una evaluación económica de sus tecnologías y que el sistema se encuentra próximo a operar en escala pre-comercial. Las técnicas VPSA y TPSA tienen un nivel de madurez tecnológica 6, significando que, al igual que TSA, se encuentra en la validación y simulación del prototipo. En lo referente a PSA y VSA, estas encuentran en un nivel 9, pues la técnica ya se encuentra en el mercado. Para establecer el grado

de avance tecnológico, COLCIENCIAS usa como referente el esquema TRL (ver Apéndice B), el cual sirve para identificar las diferentes etapas del desarrollo (Colciencias, 2016).

5.4.2. Membranas

Aunque las membranas poliméricas han sido utilizadas industrialmente para capturar CO₂, presentan una baja capacidad; a escala piloto, para los gases de combustión de una central eléctrica de carbón, se logró una tasa de captura de máximo el 90 % (Godin et al., 2021). Así mismo, las membranas inorgánicas pueden funcionar a temperaturas altas, poseen estabilidad, resistencia a la corrosión y un mejor rendimiento de separación, lo que las convierte en un material prometedor, pero, debido a su alto costo, no son muy utilizadas en la industria (Zhu et al., 2019). Una forma alternativa para mejorar el rendimiento de la separación de gases es la utilización de MMM (membranas mixtas), las cuales están compuestas por un polímero con relleno inorgánico, y combinan la permeabilidad del material polimérico con la selectividad de material inorgánico, para de esa manera crear lo que también se conoce como membrana híbrida (Richter, 2018). Otra posible aplicación de las membranas es utilizarlas como unidad adicional en la absorción, esta técnica permite reducir el tamaño del absorbedor y, por ende, el flujo de gas puede ser reducido a la mitad, logrando así mejorar la concentración de CO₂ en los gases de combustión desde 13 hasta 23 % (Azizbek Kamolov, 2022). Esta técnica es una opción factible para gases de combustión con baja presión parcial de CO₂; sin embargo, actualmente se encuentra en fase de investigación.

En la Tabla 13 se puede observar la escalabilidad y el nivel de madurez tecnológica (TRL) para las membranas poliméricas, membranas inorgánicas, membranas híbridas y membranas mixtas en la captura de CO₂. La absorción por membranas híbridas y membranas inorgánicas se encuentran en nivel 3, lo que significa que se encuentran aún a escala de laboratorio. Así mismo, las membranas poliméricas y mixtas se encuentran en nivel 6-7; es decir, que han superado pruebas

de factibilidad en condiciones de operación o funcionamiento real y cuentan con prototipos piloto, lo que implica que se encuentran próximas a operar en escala pre-comercial.

Tabla 13*Escalabilidad y nivel TRL para los tipos de membrana en la captura de CO₂*

Método	TRL	Escalabilidad	Comentario	Fuente
Membranas poliméricas	6-7	Pequeña y mediana escala	Están en transición de escala piloto a demostración con alta posibilidad de comercialización	(Bui et al., 2018)
Membranas inorgánicas	3	Temprano para evaluar	Debido a la complejidad del procesamiento del material y a su alto costo, este tipo de membrana se prueba principalmente a escala de laboratorio	(Garcia et al., 2022)
Membranas híbridas	3-4	Mediana y larga escala	Está en evaluación este método para lograr una caotura de CO ₂ con un bajo costo	(Freeman al., 2020)
Membranas mixtas	6-7	Pequeña a mediana escala	Se implementó una prueba de campo pre-piloto en la industria cementera	(He,X et al., 2021)

5.4.3. Absorción

Los absorbentes a base de aminas han surgido como una solución para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en procesos industriales y generadores de energía. Las aminas se han utilizado y desarrollado desde la década de 1930, donde se descubrió que reaccionaban atractivamente con el CO₂ formando compuestos químicos estables mediante absorción (Hassan Srour et al., n.d.). Estas soluciones acuosas ofrecen altas capacidades de recuperación, alcanzando eficiencias de hasta el 99.9 %, y además, son económicas de producir (Khan et al., 2023); sin embargo, los solventes tienen varias desventajas. En primer lugar, pueden ser corrosivos para los equipos utilizados en el proceso, lo que puede causar daños y requerir costosas reparaciones. También, son propensos a degradarse con el tiempo debido a factores como altas temperaturas (entre 120 y 150°C) o reacciones químicas, lo que puede afectar su composición, propiedades y eficacia en la captura de CO₂. Esta degradación puede provocar la necesidad de reemplazar los solventes con alta frecuencia. Otro de los principales desafíos que enfrenta la absorción con aminas

es el alto consumo de energía para separar el CO₂ del solvente, debido a la alta capacidad calorífica y entalpía de vaporización del agua presente en la solución. Esta demanda energética elevada representa un obstáculo importante que debe abordarse urgentemente para hacer que el proceso sea más eficiente y económicamente viable. (Buvik, Høisæter, et al., 2021).

En el caso de la monoetanolamina (MEA), convencionalmente utilizada a gran escala, presenta una tasa de rendimiento superior al 90 % (Einbu et al., 2022; Lee et al., 2023; Plesu Popescu et al., 2022). Sin embargo, su principal desventaja es que requiere temperaturas de calentamiento más altas, alrededor de 120 °C, para desorber y liberar el CO₂. Esto representa aproximadamente el 65 % del consumo total de energía del proceso (X. Li et al., 2021a). A pesar de esta limitación, la MEA acuosa siguen siendo ampliamente utilizada y, a menudo, sirve como punto de referencia para nuevas sustancias absorbentes.

Por otra parte, la N-metildietanolamina (MDEA) es una amina terciaria conocida por su estructura estable y su bajo costo como absorbente de CO₂. Una de sus principales ventajas radica en que no forma carbonatos, lo que evita la corrosión en los equipos del proceso de absorción de CO₂. A diferencia de la MEA, que forma carbonatos y tiene un mayor calor de absorción, la MDEA logra un rendimiento superior con una capacidad de absorción de CO₂ que puede ser entre un 15 y un 50 % mayor que la MEA en condiciones similares (Soo et al., 2024). Así mismo, mientras la capacidad de regeneración de la MEA convencional (30 % en peso) alcanza, aproximadamente, el 90 %, la MDEA llega a un 94.07 %; esto la convierte en una opción más eficiente y económica para la captura de CO₂ ((Sharif et al., 2020); Zheng et al., 2022). Además, la MDEA presenta una mayor resistencia a la degradación y requiere menos energía para la regeneración (aproximadamente, 58,8 kJ/mol de CO₂) en comparación con las aminas primarias (MEA) y

secundarias (DEA), que necesitan 86,9 y 68,9 kJ/mol de CO₂, respectivamente (Kopitha et al., 2023).

Por otra parte, una de las desventajas significativas es el alto costo de capital asociado con el proceso, así como la penalización energética significativa requerida para la regeneración del solvente. Esta penalización energética representa aproximadamente el 80 % del costo operativo total del sistema, ya que ocurre a temperaturas de 120-150 °C para poder compensar la mala cinética de desorción de CO₂ (G. Chen, Chen, et al., 2022; Zhong et al., 2023). Las soluciones de aminas son a base de agua (70-80 % mol de agua), y mantenerlas a temperaturas tan elevadas implica una mayor cantidad de calor para calentar y hervir (U. H. Bhatti et al., 2021). En este orden de ideas, ha sido un desafío la búsqueda por mejorar la eficiencia en la regeneración energética del disolvente; sin embargo, estudios (Barzagli et al., 2023) han demostrado que la regeneración de aminas a bajas temperaturas puede ser factible agregando un catalizador al proceso para aumentar la tasa de desorción de CO₂ a menos de 100 °C. Varios informes demostraron que la incorporación de un catalizador ácido sólido resulta menores requerimientos de energía (Barzagli et al., 2023). Dentro de estos se incluyen catalizadores mesoporosos de HZSM-5 (zeolita tipo ZSM-5 tratada con iones de hidrógeno) que aumentan la cantidad total de CO₂ desorbido hasta en un 60 %, reduciendo la carga térmica entre un 24 y 37% (U. H. Bhatti et al., 2020). En la Tabla 14 se observa que todos los catalizadores (carbón activado, HZSM-5, KHCO₃, ácidos sólidos) muestran un incremento del 25 % en la cantidad de CO₂ liberado, al tiempo que reducen la carga térmica de regeneración en un 20 %, en comparación con la solución de MEA no catalizada en condiciones térmicas similares. Aunque existen algunas pruebas de campo, las investigaciones se encuentran a escala de laboratorio.

Tabla 14*Catalizadores para la desorción y sus condiciones de operación*

Catalizadores	Tiempo [min.]	Temperatura [°C]	Rendimiento de CO ₂	Fuente
MEA sin catalizadores	26	86	113,8 mmol	(Bhatti et al., 2023)
Carbón activado	26	86	142 mmol	(Bhatti et al., 2023)
Mesoporosos (HZSM-5)	23	82	5. 12x10 ⁻² mol/kg min	(U. H. Bhatti et al., 2020)
KHCO ₃	40	80	115,2 mmol	(L. Wang et al., 2022)
Ácidos sólidos	60	85	90 %	(Barzagli et al., 2023)

En la Tabla 15 se resumen las ventajas y desventajas de las tres tecnologías valoradas. La absorción destaca como una técnica confiable para la separación de CO₂ en centrales eléctricas de carbón, especialmente en instalaciones existentes con altos costos operativos y recursos limitados de infraestructura. La absorción de CO₂ emerge como una tecnología comercialmente viable, debido a sus ventajas como su eficiencia técnica, capacidad de manejo y nivel de sofisticación. Aunque es una técnica madura, presenta desafíos, como los solventes que promueven la corrosión del equipo y la alta demanda energética para la regeneración los mismos, lo que puede afectar su viabilidad económica; además, la evaporación que conlleva una pérdida considerable agente extractor (X. Li et al., 2021a; Shen et al., 2021). Así mismo, aunque la adsorción presenta una capacidad de captura menor en comparación con la absorción, esta tecnología se ha investigado intensamente como método potencial para separar el CO₂ de los gases de combustión, debido a su alta eficiencia de adsorción, menor impacto ambiental, posibilidad de completa automatización de su proceso y un proceso reversible con absorbentes reciclables. Como desventaja se tiene la operación a alta temperatura, los altos costos relacionados con la necesidad de reemplazar frecuentemente el adsorbente y la importante demanda energética para la desorción de CO₂ (Mahenthiran et al., 2021a).

Respecto a la separación por membranas, se tiene bajo costo operativo y consumo de energía; también, ha ido ganando reconocimiento al ser una tecnología respetuosa con el medio ambiente

al requerir menos energía (operación a temperatura ambiente) y poder fabricarse con materiales sostenibles y reciclables. Como desventaja se tiene que su rendimiento disminuye a concentraciones más bajas de CO₂; cuando la concentración de CO₂ en la corriente de gas es inferior al 20 %, la membrana muestra baja flexibilidad, lo que significa que tiene una capacidad limitada para adaptarse o ajustarse a diferentes condiciones o situaciones. Esta falta de flexibilidad hace que el proceso de separación por membrana sea poco práctico debido a que estas membranas pueden requiere etapas adicionales en el proceso o el reciclaje de una de las corrientes. Otros problemas incluyen el funcionamiento a altas temperaturas, la sensibilidad a gases corrosivos y la dificultad para mantener una eficiencia adecuada a largo plazo, debido a factores como la degradación de las membranas por exposición prolongada a condiciones operativas y la acumulación de contaminantes (Dziejarski et al., 2023a; Kamolov et al., 2023e; S. Li et al., 2021).

Tabla 15*Ventajas y desventajas para las tecnologías de separación para la captura de CO₂*

Procesos	Ventajas	Desventajas	Fuentes
Absorción	Tecnología más madura. Altas eficiencias de absorción (>90%). El disolvente se regenerar por encima 95 %. Los absorbentes se pueden regenerar mediante despresurización y calentamiento. La alta reactividad. Bajo costo del solvente.	Degradación del disolvente. La regeneración requiere una gran cantidad de energía. Entorno corrosivo. Emisiones por degradación del disolvente. Costo de mantenimiento relativamente alto. La eficiencia de la absorción depende en gran medida de las concentraciones de CO ₂ .	(X. Li et al., 2021b; Shen et al., 2021)
Adsorción	Proceso reversible y absorbentes reciclables. Altas eficiencias de adsorción (>85%). Baja generación de residuos. Resistente al uso a largo plazo. Menor impacto ambiental.	Se necesitan adsorbentes de alta temperatura. Requiere alta energía para la desorción de CO ₂ . El proceso de desorción consume mucha energía.	(Mahenthiran et al., 2021a)
Membrana	Altas eficiencias de separación (>80%). Sin procesos de regeneración. Se producen menos residuos sólidos. Menos consumo de químicos.	Equilibrio de permeabilidad y selectividad. Altos costos de funcionamiento. Alta energía para las compresiones.	(Kamolov et al., 2023e; S. Li et al., 2021)

Absorción-Desorción	Bajas temperaturas (<100 °C). reduce la carga térmica de regeneración hasta en un 20%.	Alto costo de capital. Uso intensivo de energía. La corrosión en la instalación. Degradación de los solventes	(U. H. Bhatti et al., 2020) (A. H. Bhatti et al., 2023)
---------------------	---	--	--

En la Tabla 16 se expone que la técnica de captura de carbono poscombustión basada en absorción es la de mayor avance tecnológico, debido a su buena capacidad del solvente de capturar y retener el CO₂ de manera eficiente durante el proceso, tratar grandes volúmenes de gas y su facilidad para adaptarse a las instalaciones ya existentes. Sin embargo, su aplicación comercial se ve limitada por el alto costo de inversión y el significativo consumo energético durante el proceso de regeneración del solvente. Específicamente, este consumo energético representa alrededor del 80 % del costo operativo total (A. H. Bhatti et al., 2023).

Tabla 16

Diferencia de costos, eficiencia, nivel TRL, concentración y pureza para las tecnologías de separación para la captura de CO₂

Procesos	Nivel TRL	Costo USD/ton.CO ₂	Eficiencia de CO ₂ (%)	Concentración de CO ₂ (vol.%)	Pureza de CO ₂ (%)	Fuente
Absorción	9	26.2	95	<30,4	99	(Khan et al., 2023)
Adsorción	5 - 7	6.94	<85	28--34	99,98	(Athari et al., 2023)
Membrana	6 - 7	3 - 10	90	11.8	95	(Abuelgasim et al., 2021)

Es a precisar que los niveles de TRL clasifican las tecnologías existentes según la etapa en la que se encuentran en la industria; esta clasificación es útil para la toma de decisiones y proporciona pronósticos sobre tiempo, costos e implicaciones ambientales. Dado que las tecnologías de captura suelen ser costosas, un análisis de madurez tecnológica sirve para identificar posibles soluciones, así como de guía a los investigadores hacia enfoques más prometedores (Bach et al., 2022a). La absorción se ha aplicado en plantas de energía grandes y pequeñas, convertidores de combustible e instalaciones de producción industrial. Además, es importante destacar que esta

investigación ha estado en curso desde la década de 1930, lo que demuestra el largo tiempo de investigación invertido (Khan et al., 2023a). Por otro lado, la adsorción se emplea en el procesamiento de gas natural y etanol, y se han realizado pruebas piloto a gran escala para capturar el CO₂, con el fin de su posterior aplicación en plantas comerciales. Esta técnica presenta una variedad de aplicaciones potenciales como plantas de energía, instalaciones industriales, convertidores de combustibles; destacando por su sencillez de funcionamiento (Athari et al., 2023). En cuanto a las tecnologías de separación por membrana, las de tipo poliméricas están en transición de escala piloto a demostración con alta posibilidad de comercialización, mientras que las inorgánicas, debido a la complejidad del procesamiento del material y al costo relativamente alto, están en fase laboratorio. Aunque algunas aplicaciones comerciales de las membranas se enfocan en la separación de gases, la purificación de agua, el procesamiento de alimentos, la pervaporación y algunos tipos de reactores, su uso en captura de CO₂ está en una fase de pruebas a mayor escala, como pruebas piloto y demostraciones a escala semi-industrial. En este punto, se está evaluando la viabilidad técnica y la eficacia de las membranas en condiciones reales de proceso (Abuelgasim et al., 2021; Mahenthiran et al., 2021a).

Por otra parte, cada tecnología se enfrenta a nuevos retos y desafíos para mejorar sus procesos. La absorción han emergido como una solución prometedora y económicamente viable para capturar las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, para su implementación exitosa es crucial abordar una serie de desafíos, que van desde cuestiones tecnológicas y económicas hasta consideraciones ambientales y de seguridad. Entre estos desafíos, la selección del solvente juega un papel fundamental; este solvente debe ser altamente selectivo, minimizar su impacto en el medio ambiente y cumplir con las exigencias técnicas del proceso (Khan et al., 2023a). También es importante destacar que la degradación y evaporación de los disolventes

pueden generar costos adicionales significativos, además de traducirse en una reducción de la tasa de captura. Estrategias como la regeneración de solventes, la implementación de sistemas de recuperación de solventes y un diseño adecuado del sistema, pueden contribuir a minimizar el impacto de la degradación y evaporación de los solventes (Khan et al., 2023a). Respecto a las membranas, los estudios de (Kamolov et al., 2023a) sugieren que sus ventajas, como su fácil aplicación y menor consumo de energía, podrían superar a la tecnología de absorción de CO₂ de primera generación, aunque existen desafíos en la implementación en condiciones reales, especialmente en términos de permeabilidad y selectividad; por ello, es crucial desarrollar materiales con altos valores en los parámetros mencionados, así como garantizar su facilidad de fabricación y bajo costo. Así mismo, existe el reto de encontrar materiales óptimos que no se vean afectados por las impurezas en los gases de combustión. Finalmente, el estudio de (Querejeta et al., 2023) sobre la adsorción representa un campo de investigación prometedor, explorando modificaciones con aminas para superar limitaciones en capacidad, selectividad y calor de adsorción, ya que tales alteraciones pueden aumentar el área de superficie y el volumen de microporos, mejorando así la eficiencia del proceso. Por último, es fundamental examinar el rendimiento de los adsorbentes a base de carbono, incluida su estabilidad, capacidad de adsorción, selectividad de gases y regeneración; la inclusión de rellenos como óxidos metálicos podría mejorar las propiedades mecánicas de los carbones de base biológica.

6. Conclusiones

Mediante la aplicación del protocolo PRISMA se evidenció un número notable en la cantidad de investigaciones realizadas en China, representando un 23 % del total de divulgaciones incluidas en el presente estudio. También es relevante señalar que *Science Direct* fue la base de datos con mayor cantidad de artículos identificados durante el proceso de revisión, con un total del 64 % de las publicaciones, donde revistas como *Chemical Engineering Journal*, *Membranes* y *Carbon Capture Science & Technology* son las más destacadas en la difusión de la información.

La revisión bibliográfica se centró en las tres tecnologías más estudiadas en el ámbito de la captura de CO₂ (absorción, adsorción y separación por membrana) ya que se poseen gran cantidad de datos en la literatura asociados a su eficacia potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La absorción, al utilizar aminas como la MEA, ha sido ampliamente empleada industrialmente; sin embargo, enfrenta desafíos como el alto consumo energético para la regeneración del solvente. La exploración de nuevos absorbentes como mezclas de aminas, nanofluidos y líquido iónico busca dar solución a dichos inconvenientes. Respecto a la adsorción, se utilizan materiales como carbón activado, zeolitas y MOF, que ofrecen una captura eficiente de CO₂, pero con altos costos debido a la regeneración y reemplazo de los adsorbentes; sin embargo, la investigación en este campo es prometedora, especialmente al combinar la adsorción con otras técnicas de separación. En cuanto a la separación por membranas, se destaca su menor consumo energético al aprovechar gradientes de presión y concentración, lo cual demanda menos energía; además, su capacidad para operar a temperatura ambiente o moderada reduce los costos en comparación con otros métodos de captura. Sin embargo, enfrenta desafíos en la comercialización industrial debido al equilibrio entre permeabilidad y selectividad, lo que implica estar en fase piloto y demostración.

Por otra parte, se requiere un esfuerzo continuo en investigaciones futuras con el fin de seguir avanzando en el desarrollo de tecnologías que mejoren la eficiencia de la captura de CO₂ en cada uno de los métodos mencionados. Esto incluye el desarrollo de nuevos absorbentes y adsorbentes con mayor capacidad de captura, selectividad y permeabilidad (en caso de materiales sólidos), buscando aumentar su eficacia en la separación de gases. Así mismo, es necesario reducir los costos asociados a las técnicas de captura, buscando que sean viables comercialmente y respetuosos con el medio ambiente, de manera que puedan contribuir significativamente a la mitigación de cambio climático.

7. Recomendaciones

Complementar las revisiones sistemáticas con los análisis económico y energético para las técnicas de captura de CO₂. Esto permitiría tener un panorama más amplio al momento de seleccionar la técnica y los agentes de separación más adecuados para el proceso.

Referencias Bibliográficas

- Abuelgasim, S., Wang, W., & Abdalazeez, A. (2021). A brief review for chemical looping combustion as a promising CO₂ capture technology: Fundamentals and progress. *Science of The Total Environment*, 764, 142892. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142892>
- Ajumobi, O., Wang, B., Farinmade, A., He, J., Valla, J. A., & John, V. T. (2023). Design of Nanostraws in Amine-Functionalized MCM-41 for Improved Adsorption Capacity in Carbon Capture. *Energy and Fuels*, 37(16), 12079–12088. https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.3C01318/ASSET/IMAGES/LARGE/EF3C01318_0009.JPEG
- Akdag, A. S., Durán, I., Gullu, G., & Pevida, C. (2022). Performance of TSA and VSA post-combustion CO₂ capture processes with a biomass waste-based adsorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108759. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.108759>
- Athari, M. J., Tahmasebpoor, M., Azimi, B., Heidari, M., & Pevida, C. (2023). Waste oleaster seed-derived activated carbon mixed with coarse particles of fluid catalytic cracking as a highly-efficient CO₂ adsorbent at low temperatures. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 580–594. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.08.062>
- Bach, V., Raganati, F., Okiemute Akpasi, S., & Makarfi Isa, Y. (2022a). Review of Carbon Capture and Methane Production from Carbon Dioxide. *Atmosphere 2022, Vol. 13, Page 1958*, 13(12), 1958. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13121958>
- Barzagli, F., Bhatti, U. H., Kazmi, W. W., & Peruzzini, M. (2023). Solid acid catalysts for low-temperature regeneration of non-aqueous sorbents: An innovative technique for energy-

- efficient CO₂ capture processes. *Carbon Capture Science & Technology*, 8, 100124.
<https://doi.org/10.1016/J.CCST.2023.100124>
- Bhatti, A. H., Waris, M., Kazmi, W. W., Kang, K. H., & Bhatti, U. H. (2023a). Acid-treated activated carbon as simple and inexpensive catalyst to accelerate CO₂ desorption from aqueous amine solution. *Carbon Capture Science & Technology*, 8, 100131.
<https://doi.org/10.1016/J.CCST.2023.100131>
- Bhatti, U. H., Kazmi, W. W., Min, G. H., Haider, J., Nam, S., & Baek, I. H. (2021). Facilely Synthesized M-Montmorillonite (M = Cr, Fe, and Co) as Efficient Catalysts for Enhancing CO₂ Desorption from Amine Solution. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60(36), 13318–13325.
https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.1C02487/SUPPL_FILE/IE1C02487_SI_001.PDF
- Bhatti, U. H., Shah, A. K., Hussain, A., Khan, H. A., Park, C. Y., Nam, S. C., & Baek, I. H. (2020). Catalytic activity of facilely synthesized mesoporous HZSM-5 catalysts for optimizing the CO₂ desorption rate from CO₂-rich amine solutions. *Chemical Engineering Journal*, 389, 123439. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.123439>
- Broom, D. P. (2023). Challenges in characterizing adsorbents for gas storage and separation. *Adsorption*. <https://doi.org/10.1007/S10450-023-00424-9>
- Buvik, V., Bernhardsen, I. M., Figueiredo, R. V., Vevelstad, S. J., Goetheer, E., van Os, P., & Knuutila, H. K. (2021). Measurement and prediction of oxygen solubility in post-combustion CO₂ capture solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 104, 103205.
<https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2020.103205>

- Buvik, V., Høisæter, K. K., Vevelstad, S. J., & Knuutila, H. K. (2021). A review of degradation and emissions in post-combustion CO₂ capture pilot plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *106*, 103246. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2020.103246>
- Cantador-Fernandez, D., Suescum-Morales, D., Esquivel, D., Jiménez, J. R., & Fernández-Rodríguez, J. M. (2023a). CO₂ adsorption by ethane periodic mesoporous organosilica at low temperatures and high pressure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(5), 110582. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.110582>
- Cecilia, J. A., Vilarrasa-García, E., Morales-Ospino, R., Finocchio, E., Busca, G., Sapag, K., Villarroel-Rocha, J., Bastos-Neto, M., Azevedo, D. C. S., & Rodríguez-Castellón, E. (2022). Kaolinite-based zeolites synthesis and their application in CO₂ capture processes. *Fuel*, *320*, 123953. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.123953>
- Chen, G., Chen, G., Peruzzini, M., Zhang, R., & Barzagli, F. (2022). Understanding the potential benefits of blended ternary amine systems for CO₂ capture processes through ¹³C NMR speciation study and energy cost analysis. *Separation and Purification Technology*, *291*, 120939. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2022.120939>
- Chen, G., Wang, T., Zhang, G., Liu, G., & Jin, W. (2022). Membrane materials targeting carbon capture and utilization. *Advanced Membranes*, *2*, 100025. <https://doi.org/10.1016/J.ADVMEM.2022.100025>
- Chen, S. J., Zhu, M., Fu, Y., Huang, Y. X., Tao, Z. C., & Li, W. L. (2017). Using 13X, LiX, and LiPdAgX zeolites for CO₂ capture from post-combustion flue gas. *Applied Energy*, *191*, 87–98. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.01.031>

- Chen, T. Y., Deng, X., Lin, L. C., & Ho, W. S. W. (2022). New sterically hindered polyvinylamine-containing membranes for CO₂ capture from flue gas. *Journal of Membrane Science*, *645*, 120195. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2021.120195>
- Cheng, X., Liao, Y., Lei, Z., Li, J., Fan, X., & Xiao, X. (2023). Multi-scale design of MOF-based membrane separation for CO₂/CH₄ mixture via integration of molecular simulation, machine learning and process modeling and simulation. *Journal of Membrane Science*, *672*, 121430. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2023.121430>
- Danaci, D., Pulidori, E., Bernazzani, L., Petit, C., & Taddei, M. (2023). Evaluating the CO₂ capture performance of a “phase-change” metal–organic framework in a pressure-vacuum swing adsorption process. *Molecular Systems Design & Engineering*, *8*(12), 1526–1539. <https://doi.org/10.1039/D3ME00098B>
- Darunte, L. A., Sen, T., Bhawanani, C., Walton, K. S., Sholl, D. S., Realff, M. J., & Jones, C. W. (2019). Moving beyond Adsorption Capacity in Design of Adsorbents for CO₂ Capture from Ultradilute Feeds: Kinetics of CO₂ Adsorption in Materials with Stepped Isotherms. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *58*(1), 366–377. https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.8B05042/SUPPL_FILE/IE8B05042_SI_001.PDF
- de Ávila, S. G., Logli, M. A., & Matos, J. R. (2015). Kinetic study of the thermal decomposition of monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), triethanolamine (TEA) and methyldiethanolamine (MDEA). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *42*, 666–671. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2015.10.001>
- D. F. Chuahy, F., Kincaid, K., & Nawaz, K. (2023). A thin-film modeling approach for analysis of carbon capture sorbent-based devices. *Carbon Capture Science & Technology*, *9*, 100134. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2023.100134>

- Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023a). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, 342, 127776. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.127776>
- Einbu, A., Pettersen, T., Morud, J., Tobiesen, A., Jayarathna, C. K., Skagestad, R., & Nysæther, G. (2022). Energy assessments of onboard CO₂ capture from ship engines by MEA-based post combustion capture system with flue gas heat integration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 113, 103526. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2021.103526>
- Elfving, J., Kauppinen, J., Jegoroff, M., Ruuskanen, V., Järvinen, L., & Sainio, T. (2021a). Experimental comparison of regeneration methods for CO₂ concentration from air using amine-based adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 404, 126337. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126337>
- Favre, E. (2007). Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: Can gas permeation membranes compete with absorption? *Journal of Membrane Science*, 294(1–2), 50–59. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2007.02.007>
- Findley, J. M., Ravikovitch, P. I., & Sholl, D. S. (2018). The Effect of Aluminum Short-Range Ordering on Carbon Dioxide Adsorption in Zeolites. *Journal of Physical Chemistry C*, 122(23), 12332–12340. https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.8B03475/SUPPL_FILE/JP8B03475_SI_001.PDF
- Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J., & Xu, P. (2022a). Research progress on CO₂ capture and utilization technology. *Journal of CO₂ Utilization*, 66, 102260. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2022.102260>
- Gendy, E. A., Ifthikar, J., Ali, J., Oyekunle, D. T., Elkhelifia, Z., Shahib, I. I., Khodair, A. I., & Chen, Z. (2021). Removal of heavy metals by covalent organic frameworks

- (COFs): A review on its mechanism and adsorption properties. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105687. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105687>
- Godin, J., Liu, W., Ren, S., & Xu, C. C. (2021). Advances in recovery and utilization of carbon dioxide: A brief review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105644. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105644>
- Gutiérrez-Bonilla, E., Granados-Correa, F., Roa-Morales, G., & Balderas-Hernández, P. (2022). CO₂ capture on an optimally prepared highly microporous KOH-activated carbon from rice husk. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 21(3). <https://doi.org/10.24275/RMIQ/MAT2528>
- Hassan Srour, Janah Shaya, & Iyad Karamé. (n.d.). *Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil Recovery*.
- Iruretagoyena, D., Fennell, P., & Pini, R. (2023a). Adsorption of CO₂ and N₂ on bimetallic Mg-Al hydrotalcites and Z-13X zeolites under high pressure and moderate temperatures. *Chemical Engineering Journal Advances*, 13, 100437. <https://doi.org/10.1016/J.CEJA.2022.100437>
- Janati, S., Aghel, B., & Shadloo, M. S. (2021a). The effect of alkanolamine mixtures on CO₂ absorption efficiency in T-Shaped microchannel. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102006. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.102006>
- Jasim, D. J., Mohammed, T. J., Harharah, H. N., Harharah, R. H., Amari, A., & Abid, M. F. (2023). Modeling and Optimal Operating Conditions of Hollow Fiber Membrane for CO₂/CH₄ Separation. *Membranes 2023, Vol. 13, Page 557, 13(6)*, 557. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES13060557>

- Jiang, N., Shen, Y., Liu, B., Zhang, D., Tang, Z., Li, G., & Fu, B. (2020). CO₂ capture from dry flue gas by means of VPSA, TSA and TVSA. *Journal of CO₂ Utilization*, 35, 153–168. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2019.09.012>
- Joglekar, M., Itta, A. K., Kumar, R., Wenz, G. B., Mayne, J., Williams, P. J., & Koros, W. J. (2019). Carbon molecular sieve membranes for CO₂/N₂ separations: Evaluating subambient temperature performance. *Journal of Membrane Science*, 569, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2018.10.003>
- Kamolov, A., Turakulov, Z., Rejabov, S., Díaz-Sainz, G., Gómez-Coma, L., Norkobilov, A., Fallanza, M., & Irabien, A. (2023a). Decarbonization of Power and Industrial Sectors: The Role of Membrane Processes. *Membranes 2023, Vol. 13, Page 130*, 13(2), 130. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES13020130>
- Keller, L., Lohaus, T., Abduly, L., Hadler, G., & Wessling, M. (2019). Electrical swing adsorption on functionalized hollow fibers. *Chemical Engineering Journal*, 371, 107–117. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.04.029>
- Khan, U., Ogbaga, C. C., Abiodun, O. A. O., Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., Okoye, P. U., & Okolie, J. A. (2023a). Assessing absorption-based CO₂ capture: Research progress and techno-economic assessment overview. *Carbon Capture Science & Technology*, 8, 100125. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2023.100125>
- Kim, M., Lee, J. W., Kim, S., & Kang, Y. T. (2022). CO₂ adsorption on zeolite 13X modified with hydrophobic octadecyltrimethoxysilane for indoor application. *Journal of Cleaner Production*, 337, 130597. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130597>

- Kim, S. H., Landa, H. O. R., Ravutla, S., Realff, M. J., & Boukouvala, F. (2022). Data-driven simultaneous process optimization and adsorbent selection for vacuum pressure swing adsorption. *Chemical Engineering Research and Design*, *188*, 1013–1028. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2022.10.002>
- Kopitha, K., Elakneswaran, Y., Kitagaki, R., Saito, R., Tsujino, M., Nishida, A., Senboku, H., & Hiroyoshi, N. (2023a). N-methyldiethanolamine (MDEA) as an effective CO₂ absorbent for direct air capture (DAC) in cement-based materials. *Chemical Engineering Journal*, *475*, 146067. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.146067>
- Lee, Y. S., Galindo, A., Jackson, G., & Adjiman, C. S. (2023a). Enabling the direct solution of challenging computer-aided molecular and process design problems: Chemical absorption of carbon dioxide. *Computers & Chemical Engineering*, *174*, 108204. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2023.108204>
- Lei, L., Cheng, Y., Chen, C., Kosari, M., Jiang, Z., & He, C. (2022). Taming structure and modulating carbon dioxide (CO₂) adsorption isosteric heat of nickel-based metal organic framework (MOF-74(Ni)) for remarkable CO₂ capture. *Journal of Colloid and Interface Science*, *612*, 132–145. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2021.12.163>
- Li, H., Zhang, S., Sengupta, B., Li, H., Wang, F., Li, S., & Yu, M. (2022). Polystyrene sulfonate (PSS) stabilized polyethylenimine (PEI) membranes fabricated by spray coating for highly effective CO₂/N₂ separation. *Journal of Membrane Science*, *657*, 120617. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2022.120617>

- Li, M., & Xiao, R. (2019). Preparation of a dual Pore Structure Activated Carbon from Rice Husk Char as an Adsorbent for CO₂ Capture. *Fuel Processing Technology*, 186, 35–39. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2018.12.015>
- Li, S., Liu, Y., Wong, D. A., Yang, J., Sabatini, V., Meroni, D., & Americas, A. (2021). Recent Advances in Polymer-Inorganic Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation. *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 2539, 13(15), 2539. <https://doi.org/10.3390/POLYM13152539>
- Li, X., Liu, J., Jiang, W., Gao, G., Wu, F., Luo, C., & Zhang, L. (2021a). Low energy-consuming CO₂ capture by phase change absorbents of amine/alcohol/H₂O. *Separation and Purification Technology*, 275, 119181. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2021.119181>
- Lillia, S., Bonalumi, D., Grande, C., & Manzolini, G. (2018a). A comprehensive modeling of the hybrid temperature electric swing adsorption process for CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 74, 155–173. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2018.04.012>
- Lim, Y., Kim, J., Jung, J., Lee, C. S., & Han, C. (2013). Modeling and Simulation of CO₂ Capture Process for Coal- based Power Plant Using Amine Solvent in South Korea. *Energy Procedia*, 37, 1855–1862. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2013.06.065>
- Liu, F., Huang, K., Yoo, C. J., Okonkwo, C., Tao, D. J., Jones, C. W., & Dai, S. (2017). Facilely synthesized meso-macroporous polymer as support of poly(ethyleneimine) for highly efficient and selective capture of CO₂. *Chemical Engineering Journal*, 314, 466–476. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2016.12.004>

- Mahenthiran, A. V., Abbas Jawad, Z., Othman, D., Jaafar, J., & Rahman, M. A. (2021a). A Prospective Concept on the Fabrication of Blend PES/PEG/DMF/NMP Mixed Matrix Membranes with Functionalised Carbon Nanotubes for CO₂/N₂ Separation. *Membranes* 2021, Vol. 11, Page 519, 11(7), 519. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES11070519>
- Missaoui, N., Chrouda, A., Kahri, H., Gross, A. J., Rezaei Ardani, M., Pang, A. L., & Ahmadipour, M. (2023). PEG-templated synthesis of ultramicroporous n-ZIF-67 nanoparticles with high selectivity for the adsorption and uptake of CO₂ over CH₄ and N₂. *Separation and Purification Technology*, 316, 123755. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2023.123755>
- Mukherjee, A., Okolie, J. A., Abdelrasoul, A., Niu, C., & Dalai, A. K. (2019). Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. *Journal of Environmental Sciences*, 83, 46–63. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2019.03.014>
- Nieminen, H., Järvinen, L., Ruuskanen, V., Laari, A., Koiranen, T., & Ahola, J. (2020). Insights into a membrane contactor based demonstration unit for CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 231, 115951. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2019.115951>
- Patel, H., Weldekidan, H., Mohanty, A., & Misra, M. (2023). Effect of physicochemical activation on CO₂ adsorption of activated porous carbon derived from pine sawdust. *Carbon Capture Science & Technology*, 8, 100128. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2023.100128>

- Pham, T., & Space, B. (2020). Insights into the Gas Adsorption Mechanisms in Metal–Organic Frameworks from Classical Molecular Simulations. *Topics in Current Chemistry*, 378(1), 1–65. <https://doi.org/10.1007/S41061-019-0276-X/METRICS>
- Plesu Popescu, A. E., González, À., Llorens, J., & Bonet, J. (2022a). Investigating best available technique for CO₂ chemical absorption: solvent selection based on empirical surrogate model and exergy loss. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(1), 333–350. <https://doi.org/10.1007/S10098-021-02143-7/METRICS>
- Querejeta, N., Gil, M. V., Rubiera, F., & Pevida, C. (2023). Prospects of low-temperature solid sorbents in industrial CO₂ capture: A focus on biomass residues as precursor material. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 13(2), 245–284. <https://doi.org/10.1002/GHG.2210>
- Regufe, M. J., Ferreira, A. F. P., Loureiro, J. M., Rodrigues, A., & Ribeiro, A. M. (2019). Electrical conductive 3D-printed monolith adsorbent for CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 278, 403–413. <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2019.01.009>
- Ruthven, D. M. (Douglas M., Farooq, Shamsuzzaman., & Knaebel, K. S. (1994). *Pressure swing adsorption*. 352.
- Sarwar, A., Ali, M., Khoja, A. H., Nawar, A., Waqas, A., Liaquat, R., Naqvi, S. R., & Asjid, M. (2021). Synthesis and characterization of biomass-derived surface-modified activated carbon for enhanced CO₂ adsorption. *Journal of CO₂ Utilization*, 46, 101476. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2021.101476>
- Serafin, J., Ouzzine, M., Cruz, O. F., Sreńscek-Nazzal, J., Campello Gómez, I., Azar, F. Z., Rey Mafull, C. A., Hotza, D., & Rambo, C. R. (2021). Conversion of fruit waste-

derived biomass to highly microporous activated carbon for enhanced CO₂ capture.

Waste Management, 136, 273–282.

<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.10.025>

Sharif, M., Zhang, T., Wu, X., Yu, Y., & Zhang, Z. (2020). Evaluation of CO₂ absorption performance by molecular dynamic simulation for mixed secondary and tertiary amines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 97, 103059.

<https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2020.103059>

Shen, L., Liu, F., Shen, Y., Sun, C., Zhang, Y., Wang, Q., Li, S., & Li, W. (2021). Novel biphasic solvent of AEP/1-propanol/H₂O for CO₂ capture with efficient regeneration performance and low energy consumption. *Separation and Purification Technology*, 270, 118700.

<https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2021.118700>

Song, X., Yao, X., Zhang, F., Ang, E. H., Rong, S., Zhao, K., He, K., & Xiang, H. (2023). Nanofiber membrane coated with lithiophilic polydopamine for lithium metal batteries. *Journal of Membrane Science*, 685, 121951.

<https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2023.121951>

Soo, X. Y. D., Lee, J. J. C., Wu, W. Y., Tao, L., Wang, C., Zhu, Q., & Bu, J. (2024). Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. *Journal of CO₂ Utilization*, 81, 102727. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2024.102727>

Sovacool, B. K., & Brossmann, B. (2010). Symbolic convergence and the hydrogen economy. *Energy Policy*, 38(4), 1999–2012.

<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2009.11.081>

- Stampi-Bombelli, V., van der Spek, M., & Mazzotti, M. (2020). Analysis of direct capture of CO₂ from ambient air via steam-assisted temperature–vacuum swing adsorption. *Adsorption*, *26*(7), 1183–1197. <https://doi.org/10.1007/S10450-020-00249-W/TABLES/5>
- Sun, W. S., Yin, M. J., Zhang, W. H., Li, S., Wang, N., & An, Q. F. (2023). Tailor-made microstructures lead to high-performance robust PEO membrane for CO₂ capture via green fabrication technique. *Green Energy & Environment*, *8*(5), 1389–1397. <https://doi.org/10.1016/J.GEE.2022.01.016>
- Tang, P. H., So, P. B., Li, W. H., Hui, Z. Y., Hu, C. C., & Lin, C. H. (2021). Carbon dioxide enrichment pebax/mof composite membrane for co₂ separation. *Membranes*, *11*(6), 404. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES11060404/S1>
- Tapiador, J., Leo, P., Rodríguez-Diéguez, A., Choquesillo-Lazarte, D., Calleja, G., & Orcajo, G. (2022). A novel Zn-based-MOF for efficient CO₂ adsorption and conversion under mild conditions. *Catalysis Today*, *390–391*, 230–236. <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2021.11.025>
- The CMS, Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Bergauer, T., Dragicevic, M., Erö, J., Fabjan, C., Friedl, M., Frühwirth, R., Ghete, V. M., Hartl, C., Hörmann, N., Hrubec, J., Jeitler, M., Kiesenhofer, W., Knünz, V., ... Zielinski, K. (2014). Measurement of pseudorapidity distributions of charged particles in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV by the CMS and TOTEM experiments. *The European Physical Journal C* *2014 74:10*, *74*(10), 1–26. <https://doi.org/10.1140/EPJC/S10052-014-3053-6>

- Tontiwachwuthikul, P., Idem, R., Gelowitz, D., Liang, Z. H., Supap, T., Chan, C. W., Sanpasertparnich, T., Saiwan, C., & Smithson, H. (2011). Recent progress and new development of post-combustion carbon-capture technology using reactive solvents. *Carbon Management*, 2(3), 261–263. <https://doi.org/10.4155/CMT.11.20>
- Verougstraete, B., Martín-Calvo, A., Van der Perre, S., Baron, G., Finsy, V., & Denayer, J. F. M. (2020). A new honeycomb carbon monolith for CO₂ capture by rapid temperature swing adsorption using steam regeneration. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123075. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.123075>
- Vinoba, M., Bhagiyalakshmi, M., Alqaheem, Y., Alomair, A. A., Pérez, A., & Rana, M. S. (2017). Recent progress of fillers in mixed matrix membranes for CO₂ separation: A review. *Separation and Purification Technology*, 188, 431–450. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2017.07.051>
- Wang, H., Hao, Y., & Kong, H. (2015). Thermodynamic study on solar thermochemical fuel production with oxygen permeation membrane reactors. *International Journal of Energy Research*, 39(13), 1790–1799. <https://doi.org/10.1002/ER.3335>
- Wang, J., Wang, L., Wang, Y., Yang, F., Li, J., Guan, X., Zong, J., Zhou, F., Huang, J., & Liu, Y. N. (2022). Covalently connected core-shell NH₂-UiO-66@Br-COFs hybrid materials for CO₂ capture and I₂ vapor adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 438, 135555. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.135555>
- Wang, L., Saeed, M., Luo, J., Lee, A., Simonet, R., Sun, Z., Walker, N., Aro, M., Davis, R., Zahra, M. A., Alkasrawi, M., & Toan, S. (2022). Highly Efficient Removal of CO₂ Using Water-Less KHCO₃/Isopropanol Solutions. *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 1521, 13(9), 1521. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13091521>

- Yan, M., Li, Y., Chen, G., Zhang, L., Mao, Y., & Ma, C. (2017). A novel flue gas pre-treatment system of post-combustion CO₂ capture in coal-fired power plant. *Chemical Engineering Research and Design*, 128, 331–341. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2017.10.005>
- Yepes-Nuñez, J. J., Urrútia, G., Romero-García, M., & Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/J.RECESP.2021.06.016>
- Yoro, K. O., Sekoai, P. T., Levy, J. K., & Yu, P. (2016). The Potential of CO₂ Capture and Storage Technology in South Africa's Coal-Fired Thermal Power Plants. *Environments 2016, Vol. 3, Page 24*, 3(3), 24. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS3030024>
- Zheng, H., Mirlekar, G., & Nord, L. O. (2022). Agent-Based and Stochastic Optimization Incorporated with Machine Learning for Simulation of Postcombustion CO₂ Capture Process. *Processes* 2022, Vol. 10, Page 2727, 10(12), 2727. <https://doi.org/10.3390/PR10122727>
- Zhong, X., Li, C., Hu, X., & Zhang, R. (2023). A modified semi-empirical model for correlating and predicting CO₂ equilibrium solubility in aqueous 2-[2-(dimethylamino)ethoxy]ethanol solution. *Separation and Purification Technology*, 323, 124364. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2023.124364>
- Zhou, F., Dong, Q., Chen, J. T., Sengupta, B., Jiang, J., Xu, W. L., Li, H., Li, S., & Yu, M. (2022). Printed graphene oxide-based membranes for gas separation and carbon capture. *Chemical Engineering Journal*, 430, 132942. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.132942>
- Zhu, B., Liu, J., Wang, S., Wang, J., Liu, M., Yan, Z., Shi, F., Li, J., & Li, Y. (2019). Mixed matrix membranes containing well-designed composite microcapsules for CO₂ separation. *Journal of Membrane Science*, 572, 650–657. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2018.11.039>

Apéndices

Apéndice A. Lista de Verificación Revisión Sistemática

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
TÍTULO		
Título	1	Identifique la publicación como una revisión sistemática.
RESUMEN		
Resumen estructurado	2	Vea la lista de verificación para resúmenes estructurados de la declaración PRISMA 2020
INTRODUCCIÓN		
Justificación	3	Describa la justificación de la revisión en el contexto del conocimiento existente.
Objetivos	4	Proporcione una declaración explícita de los objetivos o las preguntas que aborda la revisión.
MÉTODOS		
Criterios de elegibilidad	5	Especifique los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.
Fuentes de información	6	Especifique todas las bases de datos, registros, sitios web, organizaciones, listas de referencias y otros recursos de búsqueda o consulta para identificar los estudios. Especifique la fecha en la que cada recurso se buscó o consultó por última vez.
Estrategia de búsqueda	7	Presente las estrategias de búsqueda completas de todas las bases de datos, registros y sitios web, incluyendo cualquier filtro y los límites utilizados.
Proceso de selección de los estudios	8	Especifique los métodos utilizados para decidir si un estudio cumple con los criterios de inclusión de la revisión, incluyendo cuántos autores de la revisión cribaron cada registro y cada publicación recuperada, si trabajaron de manera independiente y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.
Proceso de extracción de los datos	9	Indique los métodos utilizados para extraer los datos de los informes o publicaciones, incluyendo cuántos revisores recopilaron datos de cada publicación, si trabajaron de manera independiente, los procesos para obtener o confirmar los datos por parte de los investigadores del estudio y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.
Lista de los datos	10a	Enumere y defina todos los desenlaces para los que se buscaron los datos. Especifique si se buscaron todos los resultados compatibles con cada dominio del desenlace (por ejemplo, para todas las escalas de medida, puntos temporales, análisis) y, de no ser así, los métodos utilizados para decidir los resultados que se debían recoger.
	10b	Enumere y defina todas las demás variables para las que se buscaron datos (por ejemplo, características de los participantes y de la intervención, fuentes de financiación). Describa todos los supuestos formulados sobre cualquier información ausente (<i>missing</i>) o incierta.
Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	11	Especifique los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo de los estudios incluidos, incluyendo detalles de las herramientas utilizadas, cuántos autores de la revisión evaluaron cada estudio y si trabajaron de manera independiente y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.
Medidas del efecto	12	Especifique, para cada desenlace, las medidas del efecto (por ejemplo, razón de riesgos, diferencia de medias) utilizadas en la síntesis o presentación de los resultados.
Métodos de síntesis	13a	Describa el proceso utilizado para decidir qué estudios eran elegibles para cada síntesis (por ejemplo, tabulando las características de los estudios de intervención y comparándolas con los grupos previstos para cada síntesis (ítem 5).

	13b	Describa cualquier método requerido para preparar los datos para su presentación o síntesis, tales como el manejo de los datos perdidos en los estadísticos de resumen o las conversiones de datos.
	13c	Describa los métodos utilizados para tabular o presentar visualmente los resultados de los estudios individuales y su síntesis.
	13d	Describa los métodos utilizados para sintetizar los resultados y justifique sus elecciones. Si se ha realizado un metaanálisis, describa los modelos, los métodos para identificar la presencia y el alcance de la heterogeneidad estadística, y los programas informáticos utilizados.
	13e	Describa los métodos utilizados para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios (por ejemplo, análisis de subgrupos, metarregresión).
	13f	Describa los análisis de sensibilidad que se hayan realizado para evaluar la robustez de los resultados de la síntesis.
Evaluación del sesgo en la publicación	14	Describa los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (derivados de los sesgos en las publicaciones).
Evaluación de la certeza de la evidencia	15	Describa los métodos utilizados para evaluar la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace.
RESULTADOS		
Selección de los estudios	16a	Describa los resultados de los procesos de búsqueda y selección, desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.
	16b	Cite los estudios que aparentemente cumplían con los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.
Características de los estudios	17	Cite cada estudio incluido y presente sus características.
Riesgo de sesgo de los estudios individuales	18	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada uno de los estudios incluidos.
Resultados de los estudios individuales	19	Presente, para todos los desenlaces y para cada estudio: a) los estadísticos de resumen para cada grupo (si procede) y b) la estimación del efecto y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza), idealmente utilizando tablas estructuradas o gráficos.
	20a	Para cada síntesis, resuma brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes.
Resultados de la síntesis	20b	Presente los resultados de todas las síntesis estadísticas realizadas. Si se ha realizado un metaanálisis, presente para cada uno de ellos el estimador de resumen y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza) y las medidas de heterogeneidad estadística. Si se comparan grupos, describa la dirección del efecto.
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones sobre las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.
Sesgos en la publicación	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (derivados de los sesgos de en las publicaciones) para cada síntesis evaluada.
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace evaluado.
DISCUSIÓN		
Discusión	23a	Proporcione una interpretación general de los resultados en el contexto de otras evidencias.
	23b	Argumente las limitaciones de la evidencia incluida en la revisión.
	23c	Argumente las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.

OTRA INFORMACIÓN	23d	Argumente las implicaciones de los resultados para la práctica, las políticas y las futuras investigaciones.
Registro y protocolo	24a	Proporcione la información del registro de la revisión, incluyendo el nombre y el número de registro, o declare que la revisión no ha sido registrada.
	24b	Indique dónde se puede acceder al protocolo, o declare que no se ha redactado ningún protocolo.
	24c	Describa y explique cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.
Financiación	25	Describa las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.
Conflicto de intereses	26	Declare los conflictos de intereses de los autores de la revisión.
Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales	27	Especifique qué elementos de los que se indican a continuación están disponibles al público y dónde se pueden encontrar: plantillas de formularios de extracción de datos, datos extraídos de los estudios incluidos, datos utilizados para todos los análisis, código de análisis, cualquier otro material utilizado en la revisión.

Apéndice B. Niveles de Madurez de Proyectos de Innovación

Nivel TRL	ENTORNO	Descripción
1	Laboratorio e Invención	Nivel de madurez más bajo de un proyecto de innovación donde comienza la idea investigación científica básica y se inicia la transición a la investigación o idea aplicada.
2	Laboratorio e Invención	La idea o investigación ya se ha aterrizado y los principios científicos están enfocados en áreas específicas de aplicación para definir el concepto.
3	Laboratorio y Validación del concepto	Actividades de I+D incluyendo pruebas analíticas, pruebas de concepto a escala de laboratorio, orientadas a demostrar la factibilidad técnica de los proyectos de innovación.
4	Simulación y Validación del prototipo	Los componentes que integran determinado proyecto de innovación han sido identificados y se busca establecer si dichos componentes individuales cuentan con las capacidades para actuar de manera integrada, funcionando conjuntamente en un sistema.
5	Simulación y Validación del prototipo	Los elementos básicos de la innovación son integrados de manera que la configuración final es similar a su aplicación final, es decir que está listo para ser usado en la simulación de un entorno real. Se mejoran los modelos tanto técnicos como económicos del diseño inicial, se ha identificado adicionalmente aspectos de seguridad, limitaciones ambientales y/o regulatorios entre otros.
6	Simulación y Validación del prototipo	Se cuenta con prototipos piloto capaces de desarrollar todas las funciones necesarias dentro de un sistema determinado, habiendo superado pruebas de factibilidad en condiciones de operación o funcionamiento real.
7	Real y Producción piloto y demostración	El sistema se encuentra o está próximo a operar en escala pre-comercial. Es posible llevar a cabo la fase de identificación de aspectos relacionados con la fabricación, la evaluación del ciclo de vida, y la evaluación económica de las tecnologías, contando con la mayor parte de funciones disponibles para pruebas.
8	Real y Producción piloto y demostración	los sistemas están integrados, han sido probados en su forma final y bajo condiciones supuestas, habiendo alcanzado en muchos casos, el final del desarrollo del sistema.
9	Real y Llegada a mercado	En esta fase la innovación está en su fase final y es operable en un sin número de condiciones operativas, está probada y disponible para su comercialización y/o producción disponible para la sociedad. Entrega de producto o tecnología para producción en serie y comercialización.