



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta preliminar de hoja de
ruta tecnológica para la captura,
uso y almacenamiento de CO₂ en
Colombia**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Abimael Yañez Tapia

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Moisés Dávila Serrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado PROPUESTA PRELIMINAR DE HOJA DE RUTA TECNOLÓGICA PARA LA CAPTURA, USO Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ EN COLOMBIA, que presenté para obtener el título de INGENIERO GEÓLOGO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ABIMAEEL YAÑEZ TAPIA
Número de cuenta: 420055161

Esta tesis fue posible gracias a la Beca de Iniciación a la Investigación otorgada por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cuyo apoyo financiero y confianza en jóvenes investigadores me permitieron dedicarme de tiempo completo a este proyecto. A mi alma máter, mi más sincero agradecimiento por abrirme las puertas al rigor científico y a la esperanza de un futuro más sostenible.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por abrirme las puertas de sus instalaciones y conocer en su país un segundo hogar.

Al Dr. Moisés Dávila, por todo el apoyo que me ha brindado, tanto en el ámbito académico como en el laboral.

A los PhD. Mauricio Bermúdez y Jorge Eliecer Mariño por invitarme a colaborar en este proyecto.

A mamá Flor, Fer y Devis y mi familia, por creer en mí con todo su corazón.

A mis amigos de la universidad, José, Yorch, Joseph y a mi Lupita, quienes me acompañaron en esta última etapa del camino.

Índice

Lista de Figuras	3
Lista de Tablas	6
Resumen	8
Objetivo	9
Justificación	10
Introducción	11
I. Marco teórico	12
1.1 Definición de Tecnología CCUS	12
1.2 Emisiones de GEI en Colombia.....	14
1.3 Acciones Estratégicas	19
1.4 Estudios previos en materia de CCUS.....	23
1.5 Hoja de Ruta Tecnológica definición (HRT).....	26
1.5.1 Etapas sugeridas de la HRT para la implementación de Tecnología CCUS.....	28
II. Fase embrionaria	32
2.1 Marco regulatorio.....	32
2.2 Acuerdo de París	33
2.3 Directiva Europea de Captura y Almacenamiento de Carbono	34
2.4 Normas ISO en materia de CCS	34
2.4.1 Marco regulatorio del Global CCS Institute y Pozos clase VI EPA.....	37
2.5 Análisis de mercados de Carbono	40
2.6 Estado actual de los mercados de carbono en Colombia.....	42
2.7 Vinculación Internacional	43
2.8 Redes y proyectos internacionales de investigación, casos de éxito.....	45
2.8.1 Proyecto Sleipner.....	46
2.8.2 <i>Carbon Capture Simulation Initiative (CCSI)</i>	47
2.8.3 Proyecto Peterhead CCS.....	47
2.8.4 CO2GeoNet.....	48
2.8.5 <i>North American Carbon Storage Atlas (NACSA)</i>	49
2.8.6 Proyecto Petrobras CCS.....	50
III. Política pública	51
3.1 Construcción de política pública.....	51
3.2 Programas educativos en universidades y centros de formación técnica	52
3.3 Divulgación y participación pública.....	56
3.4 Campañas de sensibilización y educación	58

3.5	Transparencia y acceso a la información	59
IV.	Planeación y Ejecución	59
4.1	Estudio de sumideros y estimación de capacidad de almacenamiento	61
4.2	Estrategia de caracterización del subsuelo para CCUS Ecopetrol	67
4.3	Fuentes estacionarias de gases de efecto invernadero	68
4.4	Planificación de una red de transporte de CO ₂	75
4.5	Monitoreo y evaluación de resultados	78
V.	Escala Comercial	81
5.1	Política de CCUS	82
5.2	Diseño de nuevas instalaciones industriales.....	83
VI.	Colaboración y Coordinación	85
6.1	Centro Nacional de CCUS/ Laboratorio de gases asociado al carbón.....	86
6.2	Participación en redes internacionales de I+D en CCUS	88
6.3	Proyectos conjuntos de investigación y desarrollo	88
6.4	Mapa de almacenamiento geológico de Colombia.....	91
6.5	Plataforma de tecnología (CCUSCo)	94
7.	Propuesta preliminar de hoja de ruta tecnológica.....	96
	Propuesta preliminar de hoja de Ruta tecnológica CCUS en Colombia.	100
	Conclusiones.....	101

Lista de Figuras

Figura 1. Procesos de captura de CO₂, postcombustión, precombustión, oxicombustión en su proceso obtención de CO₂ puro. Modificado de Jia Yao et al., (2023).

Figura 2. Esquema de utilización del CO₂ capturado. Tomado de Jia Yao et al., (2023).

Figura 3. Esquema de posibilidades de almacenamiento de CO₂. Tomado de Jia Yao et al., (2023).

Figura 4. Porcentaje de emisiones de cada uno de los sectores en los que Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) los divide. Fuente: Elaboración propia con datos de INGEI 2018.

Figura 5. Emisiones de CO₂ equivalente muestra que el sector que más gases de efecto invernadero produce es el de actividades agroindustriales. Fuente: Elaboración propia con datos de: INGEI (2018) Elaboración propia con datos de INGEI 2018.

Figura 6. Emisiones de CO₂ en la región, Elaboración propia con datos de World Bank data 2024.

Figura 7. Línea de tiempo donde se visualizan las emisiones de CO₂ per cápita en Colombia en los últimos 25 años. Tomado de Word Bank data, (2024).

Figura 8. Mapa de vulnerabilidad Ambiental del Territorio Colombiano frente al Cambio Climático para el periodo 2011–2040. Componente Amenazas-Vulnerabilidad-Riesgos Ambientales del Sistema Nacional Ambiental. Tomado de IDEAM (2010).

Figura 9. Casos de estudio locales realizados en el departamento de Tauramena, Colombia, donde se contaba con estudios de geología y registros geofísicos de pozo. Tomado de Mariño-Martínez et al., (2018).

Figura 10. Ubicación de zonas industriales (Clústeres) y propuesta de carboductos en Colombia. Tomado de Yáñez et al., (2021).

Figura 11. Emisiones de CO₂ en Colombia de los sectores industrial, energético y de transporte, en carmín las actividades de mayores emisiones de CO₂ a la atmósfera. Modificado de Yáñez et al., (2021).

Figura 12. Fase inicial del mapa de ruta tecnológica modificada en México en el año 2018 donde se contemplan los primeros procesos encaminados a la implementación de la tecnología CCUS en el país. Tomado de Secretaría de Energía “Mapa de ruta tecnológica CCUS” (2018).

Figura 13. La creación de un marco regulatorio también necesita una hoja de ruta, basándose en las recomendaciones de IEAGHG (**IEA Greenhouse Gas R&D Programme**) para establecer un marco regulatorio acorde a las necesidades de un país. Elaboración propia con datos de Legal and Regulatory Frameworks for CCUS (2022).

Figura 14. Mercados de carbono en fases de operación, desarrollo y consideración. Tomado de: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2020).

Figura 15. La adquisición de cupos transferibles ya sea mediante subastas o en el mercado, permite a las empresas obtener derechos de emisión que pueden ser vendidos a otras que han reducido sus emisiones y cuentan con cupos sobrantes, un mecanismo que se asemeja al Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS). Esta información está tomada del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023)

Figura 16. Esquema del proyecto Sleipner de captura y almacenamiento de CO₂ en una formación salina. Tomado de Torp A. Tore. et al., (2004).

Figura 17. Instalaciones de CCS propuestas en la central eléctrica de Peterhead. Tomado de Peterheadlowcarbon.ia (2021).

Figura 18. Países de la unión europea pertenecientes al proyecto CO2GeoNet. Tomado de Czernichowski-Lauriol et al., (2017).

Figura 19. North American Carbon Storage Atlas (NACSA) estima en la capacidad de almacenamiento geológico de CO₂ en diferentes reservorios. Tomado de NACSA (2012).

Figura 20. En conjunto, estos proyectos y redes demuestran la importancia de la colaboración internacional en el avance de las tecnologías CCUS, permitiendo la compartición de conocimientos, la mitigación de riesgos y el desarrollo de infraestructuras compartidas que son esenciales para cumplir con los objetivos globales de reducción de emisiones de carbono. Elaboración propia.

Figura. 21 Japón aprovecha sus recursos audiovisuales para generar conciencia en sobre el cambio climático y las estrategias de mitigación y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Imagen tomada de: <https://www.japanccs.com/en/kids/> (2024).

Figura 22. Importancia cualitativa de los criterios a seleccionar para la encaminación del desarrollo CCUS en Colombia. Tomado de CIAT (2021).

Figura 23. Provincias fisiográficas de Colombia. La geología colombiana se caracteriza por su diversidad estructural, tectónica y de recursos naturales. Su compleja historia geológica ha dado lugar a una riqueza en hidrocarburos, minerales y suelos fértiles. El conocimiento geológico sigue siendo clave para la exploración sostenible de sus recursos y la gestión de desastres naturales. Tomado de Servicio Geológico Colombiano (2023).

Figura 24. Comportamiento de la inyección de CO₂ para la aplicación de la tecnología EOR. Tomado de Sánchez de la Vega et al., (2024).

Figura 25. Alternativas de mitigación y descarbonización, portafolio de investigación y desarrollo para la transición energética de Ecopetrol.

Figura 26. Representación del flujo de trabajo del proyecto Eco2Sight de Ecopetrol, el cual combina la cuantificación puntual de emisiones de CO₂ en fuentes estacionarias con la evaluación técnica de yacimientos candidatos para su utilización (EOR/EGR) o almacenamiento permanente, facilitando la planificación integrada de proyectos CCUS. Ecopetrol (2024).

Figura 27. Esquema de decisión multicriterio empleado en el proyecto Eco2Sight de Ecopetrol para determinar la ruta preferente del CO₂ capturado (utilización en recuperación mejorada de hidrocarburos –EOR/EGR–, conversión química, almacenamiento dedicado o combinación híbrida), integrando variables de capacidad de inyección, costo nivelado de almacenamiento, potencial de monetización y cumplimiento normativo. Ecopetrol (2024).

Figura 28. Sección estratigráfica A–A' y mapa de espesor de la Formación Colorado (VMM). La unidad exhibe excelente calidad reservorio ($\emptyset = 23 \%$, net/gross = 0,67) y un potencial de almacenamiento estimado de 21.2 Gt de CO₂ (dinámico) y 5.0 Gt en trampas estructurales.

Figura 29. Sección estratigráfica A–A' y mapa de espesor de la Formación Porquero (VIM–SSJ). La unidad exhibe un potencial de almacenamiento dinámico de 1. 75 Gt de CO₂ y una capacidad estructural conservadora de 42.3 Gt.

Figura 30. Mapa de espesor y sección estratigráfica de la Formación Siamana (Guajira Offshore). La unidad presenta una capacidad dinámica estimada de 223,3 Gt de CO₂ y una capacidad estructural conservadora de 50 Gt.

Figura 31. Posible ruta que modela Eco2sight para el almacenamiento de CO₂ a través de clústeres industriales. Ecopetrol (2024).

Figura 32. Principales fuentes estacionarias de emisiones de GEI, representan el 65% de las emisiones totales de GEI del sector industrial En Colombia. Se estimó que aproximadamente 18 MtCO₂ por año podrían destinarse a los procesos de captura. Sin embargo, solo 5.9 MtCO₂ fueron viables para su uso en proyectos de recuperación mejorada de petróleo (EOR). Yañez et al., (2021).

Figura 33. Líneas de ductos para cada clúster. Yañez et al., (2021).

Figura 34. El proyecto Boundary Dam, trajo retos en su desarrollo pues sería el primer proyecto de su tipo. Tomado de Canadian consulting resources (2016).

Figura. 35 Gunawan et al., mencionan que una optimización y un almacenamiento en cadena adecuando los diferentes sectores industriales trae beneficios ahorrativos en el impacto económico de los proyectos CCUS. Gunawan et al., (2024)

Figura 36. Intersección de diferentes disciplinas, beneficios y avances del trabajo conjunto. Elaboración propia

Figura 37. Relación entre dependencias reguladoras y generadoras de ciencia, política y decisiones. Elaboración propia.

Figura 38. La distribución de carbón en el departamento de Boyacá evidencia que Colombia aún posee un importante potencial energético para su explotación en los próximos años. (Tomado de Ingeominas,2000)

Figura 39. Estudio regional de cuenca VMM. Tomado de Domínguez et al., (2022).

Figura 40. Diagrama simplificado de la evaluación de sitios calificados según el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE). Modificado de Paredes Ángeles Jorge (2020).

Figura 41. Ejemplos de atlas de almacenamiento geológico de CO₂. Se exploran las capacidades de un país para el almacenamiento de sus gases de efecto invernadero. a) Atlas de almacenamiento del Mar del norte (Riis, F., & Halland, E. (2014).), b) Nacsa, Atlas de almacenamiento de CO₂ de América del norte (National Energy Technology Laboratory. (2015) c). Atlas de almacenamiento de CO₂ de Brasil (Machado, C. 2016) d) Atlas de almacenamiento geológico de CO₂ de México (SENER 2012). Por mencionar algunos.

Figura 42. Ejemplos de plataformas para acceder a datos y otros datos relevantes sobre el estado actual del avance de la implementación de técnicas de reducción de GEI EN España, Brasil, México y Estados Unidos.

Figura 43. Diagrama esquemático de la hoja de ruta preliminar para la adopción de tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en Colombia (2025-2030).

Lista de Tablas

Tabla 1. Categorías del INGEI susceptibles a incorporar tecnologías de captura de CO₂. Tomado de Yáñez et. Al (2021)

Tabla 2. Mecanismos de absorción propuestos por la iniciativa E2050

Tabla 3. Desarrollo de Mapa de ruta en países del contiene asiático.

Tabla 4. Desarrollo de Mapa de ruta en países de la unión europea.

Tabla 5. Desarrollo de Mapa de ruta en países del contiene americano.

Tabla 6. Requisitos para el establecimiento de un marco regulatorio válido. Modificada de IEACCUS (2024).

Tabla 7. Áreas investigadas sobre CCUS por parte de la unión europea. Tomado de Directive 2009/31/EC.

Tabla 8. Estándares críticos establecidos por la EPA para la construcción, monitoreo y permisos de pozos de almacenamiento geológico de CO₂. Tomado de Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Construction (2012).

Tabla 9. Comparativa de Sistemas de Comercio de Emisiones (Carbon Pricing). Tomado de Environmental defense found.

Tabla 10. Organizaciones Internacionales de Apoyo a Tecnologías CCUS (Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono). Elaboración propia.

Tabla 11. Programas académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de América del Norte. Elaboración propia.

Tabla 12. Programas académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de Europa. Elaboración propia.

Tabla 13. Programas académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de América Latina.

Tabla 14. Programas académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de Oceanía.

Tabla 15. Tipos de Almacenamiento Geológico de CO₂: Mecanismos y Características. Modificado de Cavanagh et al., (2015).

Tabla 16. Métodos de cálculo de almacenamiento de CO₂ según el sitio de almacenamiento. Tomado de Cavanagh et al., (2015).

Tabla 17. Comparativa de métodos de almacenamiento de CO₂: ventajas, desafíos, proyectos de referencia y disponibilidad de datos. Tomado de Cavanagh et al., (2015).

Tabla 18. Los costos asociados al diseño del modelo de distribución varían según los materiales y propiedades a utilizar, considerando 3 fases importantes (bombeo, compresión y el carbo ducto). Yáñez et al., (2021).

Tabla 19. Técnicas de Monitoreo atmosférico. Tomado de Umer Zahid et al., (2010).

Tabla 20. técnicas de monitoreo cercanas a la superficie. Tomado de Umer Zahid et al., (2010).

Tabla 21. Técnicas de monitoreo superficial. Tomado de Umer Zahid et al., (2010)

Tabla 22. Actividades para la Implementación de CCUS (Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono) en Colombia. Tomado de CIAT (2021).

Tabla 23. Criterios Técnicos para la Selección de Sitios de Almacenamiento Geológico de CO₂, Tomado de Mariño et al., (2018).

Tabla 24. Objetivos y Descripciones para la Implementación de Tecnologías CCUS y Sostenibilidad. Tomado de Mota et al., (2023)

Resumen

El presente trabajo busca sintetizar, de manera general, las consideraciones conceptuales necesarias para implementar medidas efectivas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el CO₂ proveniente de fuentes antropogénicas fijas. La hoja de ruta tecnológica se plantea como una herramienta de planificación estructurada que fomenta la colaboración entre actores clave del Estado, funcionarios públicos, industria y academia, con el objetivo de proporcionar los recursos humanos y de capital necesarios para el despliegue de la tecnología CCUS en Colombia. Tras una revisión comparativa de otras hojas de ruta tecnológicas, se identifican las siguientes fases comunes: embrionaria, política pública, planeación, implementación y monitoreo que orientan su desarrollo, y se pueden adaptar al contexto colombiano. Este escrito recopila información de fuentes confiables y experimentadas en el tema, proponiendo procesos que podrían integrarse en una hoja de ruta tecnológica formal, destacando un enfoque interdisciplinario que combina conocimientos ingenieriles, técnicos y regulatorios para abordar los desafíos locales.

Objetivo

Elaborar una **propuesta** preliminar de hoja de Ruta Tecnológica (MRT) para la implementación de tecnologías de Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS por sus siglas en inglés) en Colombia, mediante el análisis comparativo de hojas de ruta internacionales, el diagnóstico del contexto normativo, industrial y geológico nacional, así como la identificación de clústeres estratégicos de desarrollo, para establecer una base técnica y conceptual que oriente la formulación futura de políticas públicas y proyectos piloto en el país.

Objetivos particulares

1. Analizar el estado actual de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Colombia y los sectores prioritarios para la aplicación de tecnologías CCUS.
2. Examinar las estrategias, políticas y marcos regulatorios internacionales sobre CCUS para identificar buenas prácticas aplicables al contexto colombiano.
3. Conocer el potencial técnico y estudios previos acerca de las principales cuencas sedimentarias del país como posibles sumideros de CO₂.
4. Identificar los actores clave y las fases estratégicas necesarias para estructurar una hoja de ruta tecnológica adaptada a la realidad institucional y económica de Colombia.
5. Proponer una hoja de Ruta Tecnológica preliminar (HRT) que integre las dimensiones científicas, técnica, regulatoria y socioeconómica para la adopción progresiva de CCUS en el país.

Justificación

Colombia ha asumido compromisos para cumplir en el marco del Acuerdo de París y otros tratados internacionales que contribuyan a la reducción de las emisiones de GEI del país. La implementación de tecnologías de CCUS es una estrategia clave para cumplir con estas metas de manera efectiva y sostenible. Un mapa de ruta tecnológica proporcionaría una guía estructurada para definir las estrategias que permitan alcanzar estos objetivos en función de: los acuerdos internacionales, las limitaciones y avances tecnológicos, viabilidad técnica, estudios previos sobre captura y uso de CO₂ y políticas públicas del estado colombiano.

Introducción

Posterior al Acuerdo de París, los países participantes se comprometieron a reducir las emisiones de GEI liberados a la atmósfera. Para alcanzar este objetivo se han propuesto diversas estrategias que van desde soluciones basadas en la naturaleza (SbN, por sus siglas en inglés) hasta alternativas de carácter industrial como el almacenamiento geológico de CO₂.¹

Desde un enfoque práctico, el almacenamiento geológico de CO₂ representa una alternativa atractiva y eficiente, ya que permite un confinamiento casi inmediato del gas, con la posibilidad de resguardarlo a escalas de tiempo geológicas (miles a millones de años). Su implementación en grandes centros industriales tendría impactos positivos en el clima, y muy importante, sin afectar el crecimiento económico de la región que lo adopte ya que permite que las industrias continúen operando sin enfrentar restricciones ambientales severas, impuestos por emisiones de carbono y pérdida de la competitividad internacional.

Sin embargo, este proceso presenta desafíos económicos importantes, ya que solo los países con un alto grado de industrialización o apoyos gubernamentales tienen la capacidad de costear y dotar este tipo de infraestructura para su adopción a gran escala. En este sentido, la investigación aplicada resulta fundamental, ya que, puede contribuir a optimizar los procesos de captura y almacenamiento, promoviendo el uso del CO₂ en ciclos combinados dentro de procesos industriales. Esto incluye aplicaciones como la recuperación mejorada de petróleo y su utilización en otros procesos químicos, biológicos y geológicos.²

La hoja de ruta tecnológica preliminar para la implementación de la tecnología CCUS en Colombia contempla, de forma estructurada, cinco grandes fases consideradas como básicas estas son: fase embrionaria, política pública, planeación y ejecución, escala comercial, así como colaboración y coordinación. Estas fases han sido estructuradas de esta manera porque representan una secuencia de eventos que, en algunos casos, deben desarrollarse de forma consecutiva. Cada uno de estos conceptos clave agrupa acciones específicas que buscan construir los cimientos para la adopción de esta tecnología en el país y de esta manera reunir a gobierno, industria y academia interesados en participar para alcanzar el objetivo de emisiones netas cero para el 2030.

¹Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. Tomado de <https://www.ipcc.ch/sr15/>

²International Energy Agency (IEA). (2020). *CCUS in clean energy transitions*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transition>

1. Marco teórico

1.1 Definición de Tecnología CCUS

El CCUS (Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono) es un conjunto de tecnologías que están diseñadas para reducir las emisiones de dióxido de carbono CO_2 a la atmósfera, provenientes de industrias puntuales (ej.: plantas de energía, cementeras, refinerías). Ya sea mediante su reutilización en procesos productivos (uso) o su almacenamiento permanente en formaciones geológicas. De manera general, proceso de CCUS involucra tres componentes principales.³

1. Captura: esta etapa implica la separación del CO_2 de otros gases producidos en procesos industriales y de combustión. Estas incluyen la captura postcombustión, precombustión y la oxicomcombustión (Figura 1); a su vez, cada una de estas tiene sus propias aplicaciones dependiendo del tipo de fuente emisora.

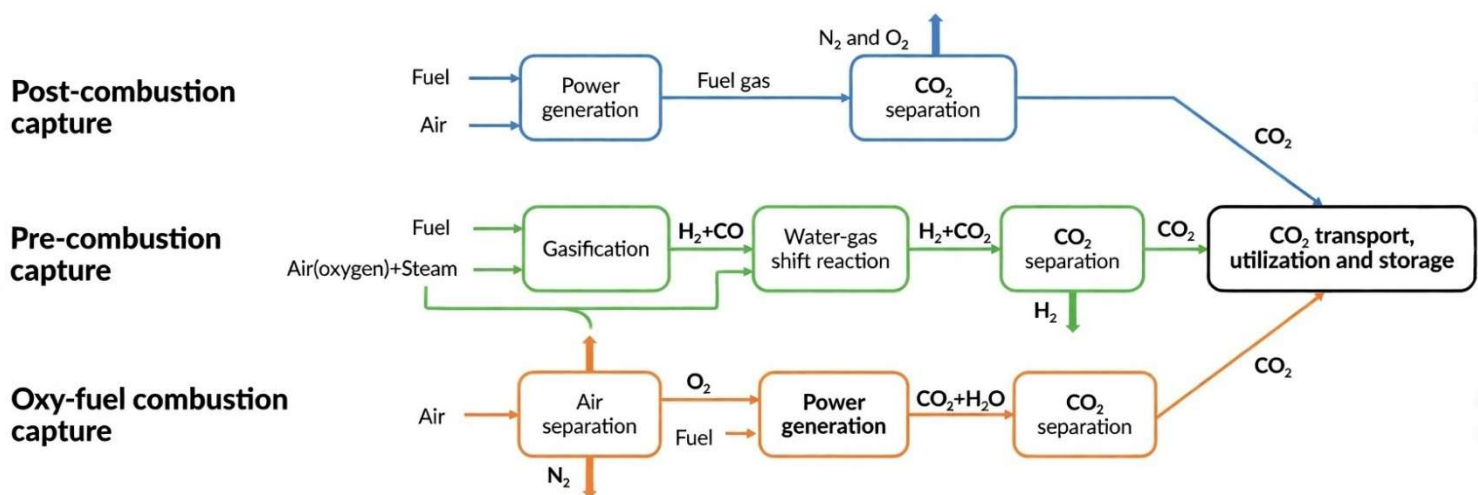


Figura 1. Procesos de captura de CO_2 , postcombustión, precombustión, oxicomcombustión en su proceso obtención de CO_2 puro. Modificado de Jia Yao et al., (2023).

Transporte: una vez capturado, el CO_2 se comprime y se transporta, generalmente por tuberías dedicadas o, en menor medida, por barcos o camiones, hasta el sitio de almacenamiento o utilización. La captura y el transporte representan conjuntamente hasta el 70-80 % del costo total de la cadena CCUS⁴, constituyendo la parte económicamente

³ Yao, J., Han, H., Yang, Y., Song, Y. y Li, G. (2023). A Review of Recent Progress of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in China. Applied Sciences, 13 (2), 1169. <https://doi.org/10.3390/app13021169>

⁴ International Energy Agency (IEA). (2023). *CO₂ Capture and Utilisation: A Vital Part of the Net Zero Pathway*. París: IEA. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/co2-capture-and-utilisation>

* EOR se refiere a las técnicas utilizadas para extraer petróleo de un yacimiento que no puede ser recuperado con métodos

más significativa de la tecnología y determinando en gran medida su rentabilidad a escala comercial.

2. Uso: algunas aplicaciones incluyen su utilización en la industria alimentaria para la carbonatación de bebidas, en la producción de plásticos y productos químicos, y en la recuperación mejorada de petróleo EOR (*Enhanced oil recovery* *) donde se inyecta en yacimientos petroleros para aumentar la extracción de crudo (Figura 2).

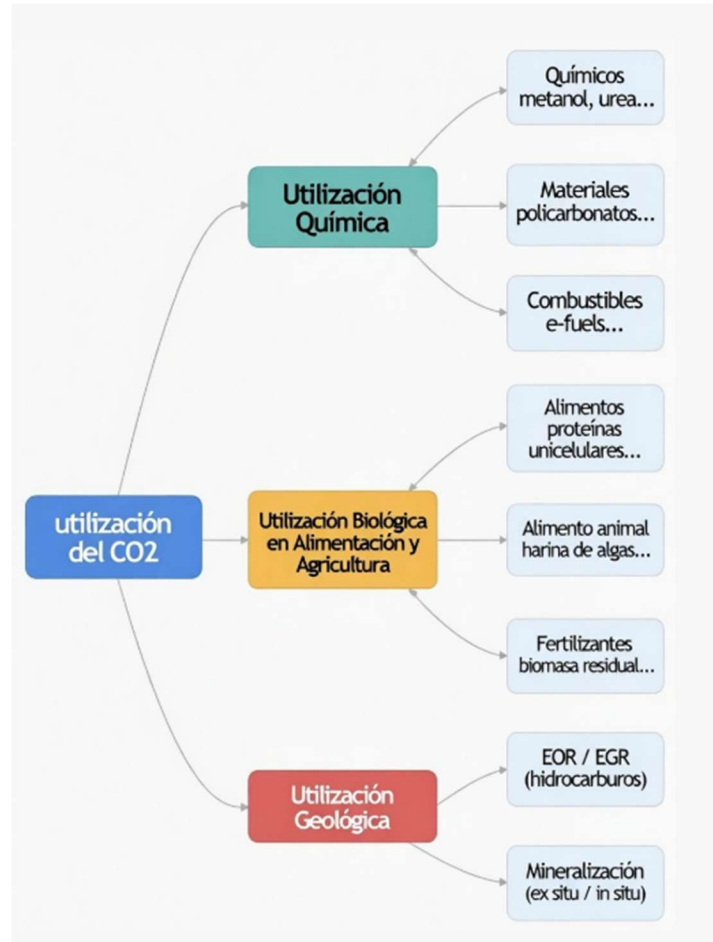


Figura 2. Esquema de utilización del CO₂ capturado. Modificado de Jia Yao et al., (2023).

3. Almacenamiento: el objetivo del almacenamiento geológico es evitar que el CO₂ sea liberado hacia la atmósfera y su almacenamiento se prevería en escalas de tiempo geológicas (millones de años). En caso de que las formaciones geológicas cumplan con las características adecuadas, el CO₂ puede inyectarse y almacenarse de manera segura en el subsuelo en formaciones geológicas como; acuíferos salinos profundos, yacimientos de petróleo y gas agotados, capas de carbón no explotables, e incluso

basaltos (Figura 3).

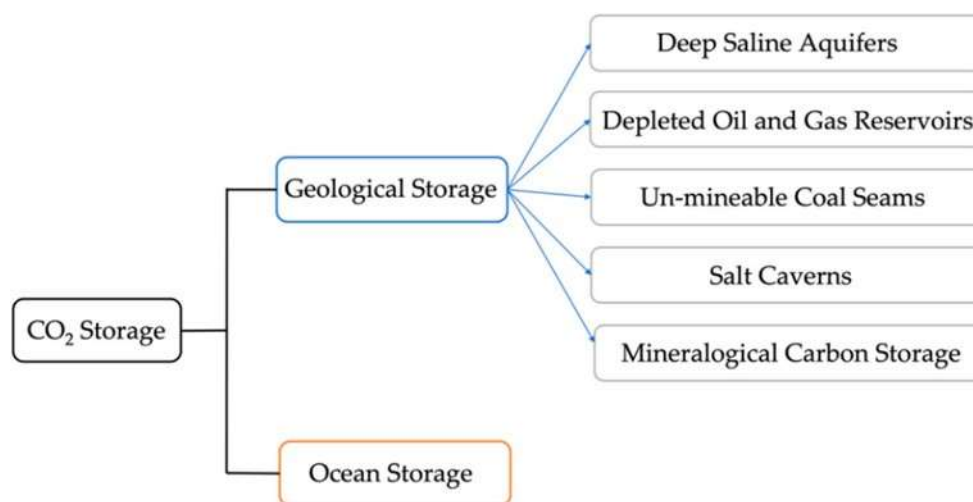


Figura 3. Esquema de posibilidades de almacenamiento de CO₂. Tomado de Jia Yao et al., (2023).

Es correcto considerar que la implementación de las tecnologías CCUS debe estar acompañada de un fuerte apoyo a políticas de ahorro de energía, energías renovables y otras tecnologías limpias y de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) bajas.

La captura y utilización de carbono es una tecnología base para abonar a la descarbonización sin que sea necesario frenar el desarrollo industrial. Aunque todavía existen dudas sobre sus costos y su viabilidad económica a gran escala en países que no cuentan con políticas establecidas para la reducción de los GEI por medio de estas técnicas, resulta indispensable su integración, ya que no hay alternativas efectivas que permitan reducir de forma rápida las emisiones en plantas industriales en expansión. En este sentido, el CCUS puede coadyuvar la transición hacia un modelo de desarrollo bajo en carbono sin comprometer el crecimiento del sector industrial y sus implicaciones.⁵

1.2 Emisiones de GEI en Colombia

Colombia se encuentra en una etapa de implementación de acciones climáticas y estrategias de sostenibilidad⁶ al incluirse en el Acuerdo de París, y adquiriendo el compromiso de reducir sus emisiones de GEI en un 51 % para 2030 y alcanzar la

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Industry. En *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 739–810). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

⁶ Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (n.d.). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia (BUR3)*. Recuperado de <https://www.andi.com.co/Uploads/BUR3%20-%20COLOMBIA.pdf>

carbononeutralidad para 2050. Aunque se trata de una meta ambiciosa, diversos estudios y planes nacionales han identificado que es técnicamente viable, especialmente mediante la reducción de la deforestación, la transición energética y el fortalecimiento de políticas ambientales, es decir, mediante estrategias combinadas. Por estas razones, el país está desarrollando tecnologías y métodos para cumplir con los compromisos adquiridos en los acuerdos internacionales en materia de cambio climático.^{7 8}

El Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) es el organismo público que estima las emisiones derivadas de actividades humanas y la absorción realizada por los reservorios de carbono del país. Con recomendaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 2006 el inventario agrupa las emisiones y absorciones en cuatro categorías principales, ver Figura 4:

1. Energía, 2. Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU), 3. Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU), 4. Residuos.

Para el inventario nacional, las emisiones estimadas en estos cuatro grupos se relacionan con ocho sectores principales de la economía de Colombia: Minas y Energía, Industria Manufacturera, Transporte, Residencial, Comercial, Agropecuario, Forestal y Saneamiento, teniendo como foco de emisiones mayoritario el sector agropecuario (Figura 5).

Cabe destacar que, al momento de elaborar este trabajo, no existen datos más actualizados, ya que los reportes que se generan para la contabilización de las emisiones se realizan bienalmente, por lo que la última referencia que se tiene es del 2022.

⁷ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.ideam.gov.co>

⁸ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2022). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia*. Gobierno de Colombia. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co>

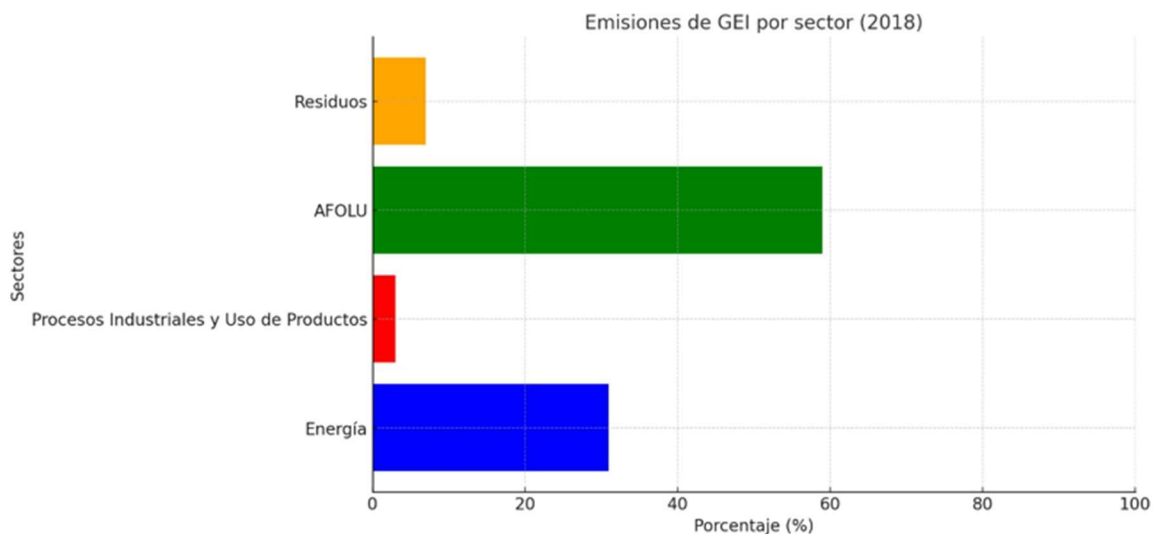


Figura 4. Porcentaje de emisiones de cada uno de los sectores en los que Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) los divide. Elaboración propia con datos de INGEI 2018.

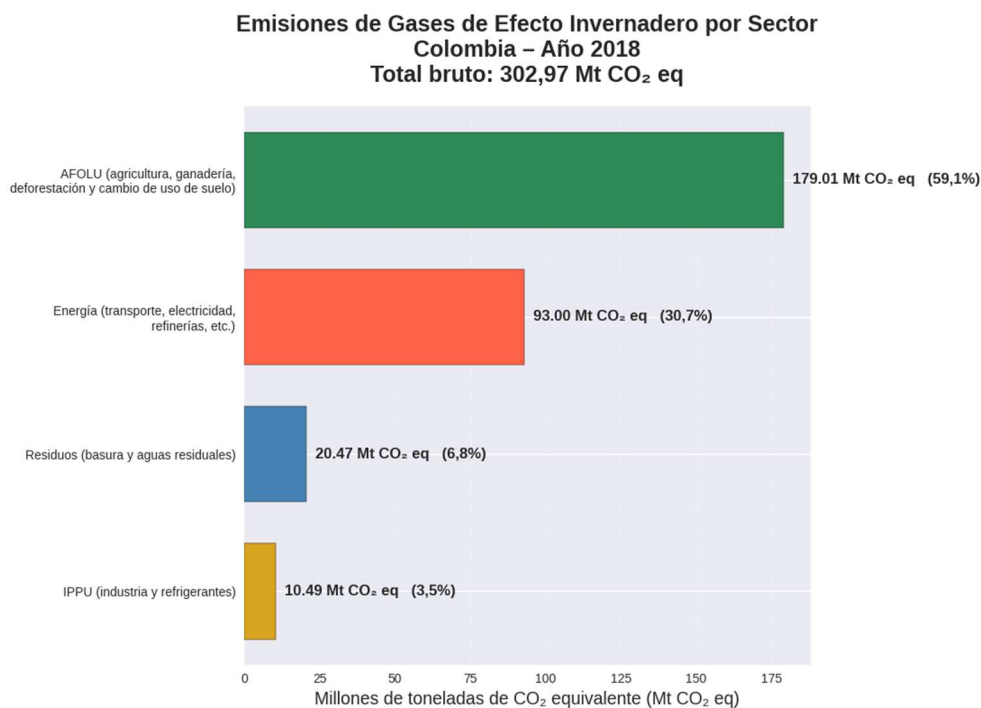


Figura 5. Emisiones de CO₂ equivalente muestra que el sector que más gases de efecto invernadero produce es el de actividades agroindustriales. Elaboración propia con datos de INGEI (2018).

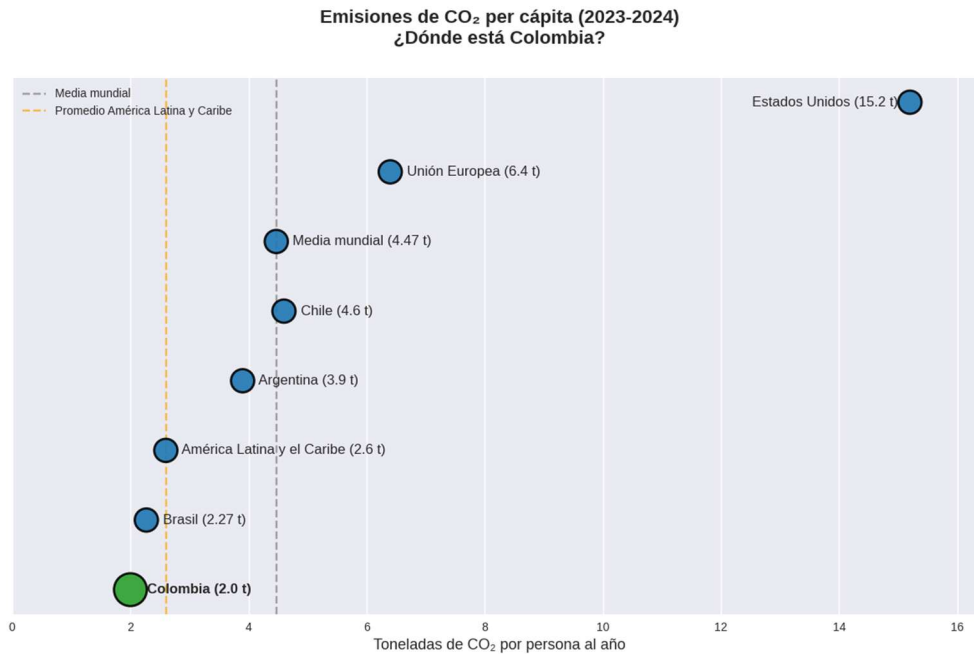


Figura 6. Emisiones de CO₂ en la región. Elaboración propia con datos de World Bank data 2024.

La información que se presenta en los gráficos anteriores es importante debido a que la media de emisiones en Colombia sugiere que el país se encuentra en vías de desarrollo (Figura 6), lo cual implica un crecimiento económico potencial a través de la industrialización, lo que a su vez aumentará las emisiones per cápita (Figura 7). Segunda, la existencia de mercados de carbono está directamente relacionada con la actividad económica de un país, resultando esencial para evaluar la viabilidad económica de implementar tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) o únicamente de captura y uso (CCU). Aunque en este trabajo se hace mayor énfasis en el CCUS por el almacenamiento geológico permanente, es importante reconocer que el CCU centrado en la reutilización del CO₂ en productos o procesos industriales también representa una opción complementaria, especialmente en sectores con limitaciones para el almacenamiento subterráneo.

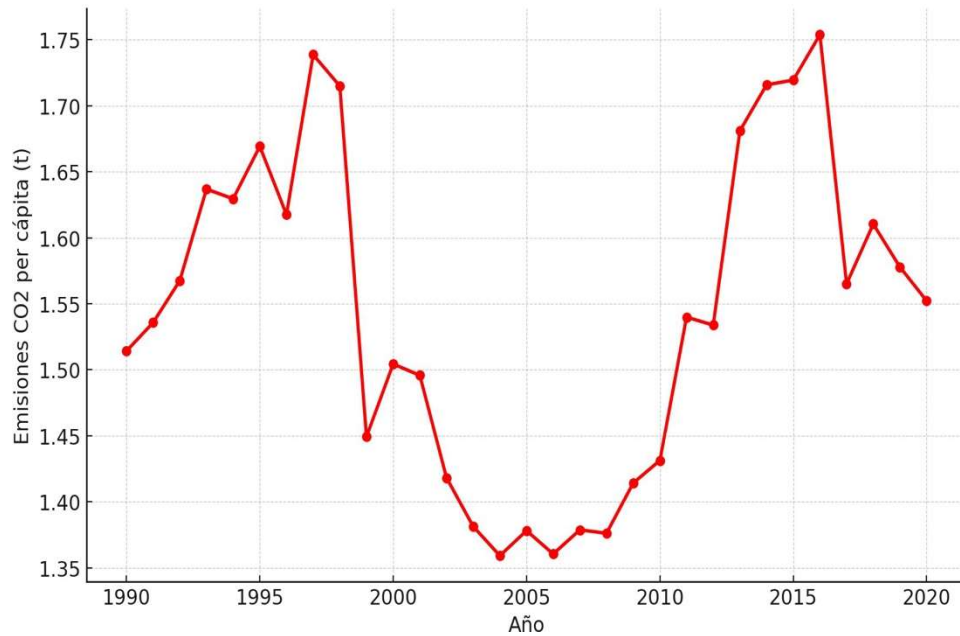


Figura 7. Toneladas de emisiones de CO₂ per cápita en Colombia en los últimos 25 años. Tomado de World Bank data, (2024).

Tercera, la visualización de los datos de emisiones permite identificar los sectores que más contribuyen a su generación, diferenciando entre fuentes más limpias, como la hidroeléctrica, y menos limpias como las termoeléctricas. Esta distinción determina en qué segmentos de la cadena energética resulta viable utilizar tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono, ya sea en procesos industriales intensivos en carbono o en instalaciones emergentes como las de hidrógeno azul.

Para estimar el potencial máximo de captura de CO₂ en Colombia, se toman en cuenta las emisiones provenientes de actividades industriales específicas, tal como lo reporta Yáñez et al., en el 2021.⁹ Estas actividades incluyen la producción de cemento y acero, la generación de electricidad mediante la quema de combustibles, el refinamiento de petróleo, así como la extracción y procesamiento de gas natural, petróleo y carbón. Analizar las emisiones asociadas a estas industrias permite estimar el volumen de CO₂ susceptible de ser capturado, permite dimensionar el potencial de tecnologías CCUS. Esta aproximación facilita la planificación de estrategias coordinadas entre sectores, orientadas a maximizar la reducción de emisiones en los puntos de mayor impacto (Tabla 1).

⁹ Yáñez, E., Olaya, Y., López, J., & Rodríguez, D. (2021). Exploring the potential of carbon capture and storage-enhanced oil recovery as a mitigation strategy in the Colombian oil industry. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104028. Recuperado de <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2654>

Tabla 1. Categorías del INGEI susceptibles a incorporar tecnologías de captura de CO₂.
Tomado de Yáñez et al., (2021)

Sector	Código INGEI	Actividad	Emisiones de CO ₂ (Mt)
Energía	1A1ai	Generación termoeléctrica	11.938
Energía	1A1b	Refinación de petróleo	2.560
Energía	1A1cii	Extracción y procesamiento de petróleo y gas natural	4.601
Energía	1A1cii	Producción de carbón	2.689
Energía	1A2a	Producción de hierro y acero	0.940
Industrial	1B2aii	Quema de antorcha en petróleo	0.011
Industrial	2A1	Producción de cemento	0.021
Industrial	2C1	Producción de hierro y acero	0.698
Industrial	2C2	Producción de ferroaleaciones	0.865

El CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) estima que, en sectores con alta concentración de emisiones (ej. generación termoeléctrica, cemento), las tecnologías actuales de CCUS podrían capturar entre el 80% y 90% del CO₂ emitido. Asumiendo condiciones óptimas de operación y disponibilidad de infraestructura, se estima un máximo teórico de captura de aproximadamente 25.2 MtCO₂ al año¹⁰.

1.3 Acciones Estratégicas

Considerando el artículo 4 del Acuerdo de París y respondiendo a la invitación del numeral 4.19, Colombia ha desarrollado y comunicado su estrategia climática de largo plazo conocida como E2050.¹¹ En el plan de acción E2050 Colombia establece el objetivo de tener un balance neto de cero de emisiones para 2050, es decir Colombia deberá alcanzar un balance entre sus emisiones y la neutralización de los gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2050, tomando como referencia las emisiones reportadas en 2015, se establecen dos condiciones:

1. Lograr una reducción de las emisiones de GEI en un 90% respecto a los niveles de 2015 y el 10% restante de las emisiones deberá ser balanceado con absorciones

¹⁰ Ministerio de Minas y Energía de Colombia & Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2021). Convenio de Cooperación Internacional GGC No. 632 de 2021. Colombia

¹¹ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f). Estrategia 2050: Estrategia de Largo Plazo para la Resiliencia Climática y la Carbono Neutralidad de Colombia. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climático-y-gestión-del-riesgo/estrategia-2050/>

(Tabla 2), logrando así un balance neto cero.

Tabla 2. Mecanismos de absorción propuestos por la iniciativa E2050.

Categoría	Mecanismos de Absorción	Descripción
1. Sumideros naturales	Reforestación y restauración ecosistémica Conservación y manejo sostenible de bosques Restauración de manglares, humedales y páramos	Aprovechamiento de la capacidad de captura de carbono por biomasa vegetal y suelos. Colombia cuenta con ~60 millones de hectáreas de bosque natural como base.
2. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN)	Agroforestería y silvopastoriles Prácticas agrícolas regenerativas	Integración de árboles en sistemas productivos para secuestrar carbono y mejorar resiliencia.
3. Captura y almacenamiento geológico (CCS/CCUS)	Almacenamiento en formaciones salinas Uso en EOR (recuperación mejorada de petróleo) Mineralización en basaltos (en evaluación).	Secuestro permanente de CO ₂ en el subsuelo. Prioridad en cuencas sedimentarias (Llanos, Valle Medio del Magdalena).
4. Remociones tecnológicas (CDR)	Bioenergía con captura y almacenamiento (BECCS) (en fase exploratoria) Captura directa del aire (DACCS) (escenario futuro)	Tecnologías emergentes con potencial, pero con barreras de costo y escalabilidad.

- El segundo objetivo recae en la reducción de la vulnerabilidad del entorno al cambio climático considerando el riesgo de los municipios y departamentos colombianos en categorías de bajo o muy bajo (≤ 0.4), comparado con la clasificación actual de alto (0.88), para esto debe enfocarse en disminuir los daños y pérdidas causados por el cambio climático a través de un enfoque territorial integral y multisectorial (Figura 8).

MinAmbiente (Ministro de Medio Ambiente de Colombia) invita a reflexionar que la implementación de las acciones climáticas en Colombia no es responsabilidad únicamente del gobierno nacional. Las regiones, los ciudadanos y las empresas privadas también juegan un papel determinante en las trayectorias de descarbonización y resiliencia climática establecidas por la Estrategia Climática de Largo Plazo. Sin embargo, aún no existe plena conciencia entre estos actores sobre lo que la E2050 establece para facilitar estas transformaciones.

De acuerdo con el decreto “Por el cual se reglamentan los artículos 22 y 57 de la Ley 2099 de 2021 sobre las tecnologías de Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS)”¹² en Colombia, el Ministerio de Minas y Energía emitió la regulación con el objetivo de establecer los lineamientos técnicos y normativos para el desarrollo de dichas tecnologías en el sector minero-energético. Este decreto se enmarca en los lineamientos de la Ley 2099 de 2021, orientada a impulsar la transición energética del país mediante la adopción de mecanismos que contribuyan a un balance neto de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) igual a cero.

El documento normativo define conceptos esenciales tales como: captura de dióxido de carbono, transporte, utilización y almacenamiento, los cuales constituyen la base terminológica y operativa del marco regulatorio estas definiciones permiten establecer un primer marco conceptual que facilita comprender el alcance, los requerimientos técnicos y las condiciones bajo las cuales se podrán implementar proyectos en el territorio nacional.

Se determina que la implementación de CCUS en el sector minero energético será considerada como una iniciativa de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI). Y a su vez define a los organismos en este caso, el Ministerio de Minas y Energía que debe expedir reglamentos técnicos para asegurar que los equipos y procesos utilizados en la captura de CO₂ cumplan con criterios de eficiencia y niveles de madurez tecnológica.

Se describe de forma general el procedimiento para habilitar la infraestructura existente destinada al transporte, señalando que la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) evaluará la practicabilidad de emplear la infraestructura (rutas) de gas natural con este fin. Asimismo, se interpreta la posibilidad de un convenio marco que regule el uso del CO₂ capturado en actividades de recobro mejorado en la industria petrolera.

Se designa al Ministerio de Minas y Energía, en coordinación con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y otras entidades, la función de emitir normativas técnicas para garantizar el almacenamiento seguro y permanente de CO₂ en formaciones geológicas, asimismo, se formulan lineamientos para la identificación de sitios de almacenamiento y los

¹² Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022). Proyecto de Decreto sobre Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS). Recuperado de https://www.minenergia.gov.co/documents/8470/220804_-_vF_Proyecto_Decreto_CCUS_V6_Para_publicar.pdf

permisos requeridos para su operación.

Se fomenta el desarrollo de programas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) orientados a fortalecer competencias científicas y tecnológicas en el sector minero-energético para respaldar las tecnologías. También se estipula que las iniciativas deberán ajustarse a la normativa del Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) para garantizar la transparencia y efectividad en la reducción de emisiones.

Por último, se dispone que las actividades que incorporen tecnologías CCUS estarán obligadas a obtener las autorizaciones necesarias para el uso de recursos naturales y a cumplir con los procedimientos de licenciamiento ambiental, garantizando así su conformidad con la normativa ambiental vigente.

A través de los mecanismos exploratorios de regulación, se introduce la posibilidad de implementar proyectos piloto bajo un "sandbox regulatorio" que es un entorno controlado que permite a las empresas probar productos, servicios o modelos de negocio innovadores, con flexibilidad en las normativas aplicables y en la duración de las pruebas, con el objetivo de experimentar y adaptar dichas tecnologías al contexto industrial.

Finalmente, se establece que las medidas antes expuestas entrarán en vigor a partir de su publicación en el Diario Oficial (publicada el 10 de julio de 2021), obligando a las entidades involucradas a acatar las normas establecidas en dicho documento. Cabe destacar que, aunque el decreto que regula la Ley 2099 de 2021 no presenta un desarrollo normativo exhaustivo, sí ofrece una orientación conceptual sobre las acciones necesarias para el conocimiento y difusión de las tecnologías CCUS.

1.4 Estudios previos en materia de CCUS

La implementación de tecnologías CCUS en Colombia ha sido objeto de algunos estudios que han sentado las bases para el desarrollo de proyectos en este campo. Estos estudios han evaluado el potencial geológico del país para el almacenamiento de CO₂ de manera local (Figura 9).¹³ Además, se ha analizado la rentabilidad económica de la implementación de esta tecnología en el país en el ámbito petrolero por medio de la aplicación de EOR¹⁰ y revisado la capacidad técnica de las tecnologías de captura para integrar CCUS en

¹³ Mariño-Martínez, J. E., & Moreno-Reyes, L. E. (2018). Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) en Colombia – caso Tauramena (Casanare). *Boletín de Geología*, 40(1), 109–122. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018007>

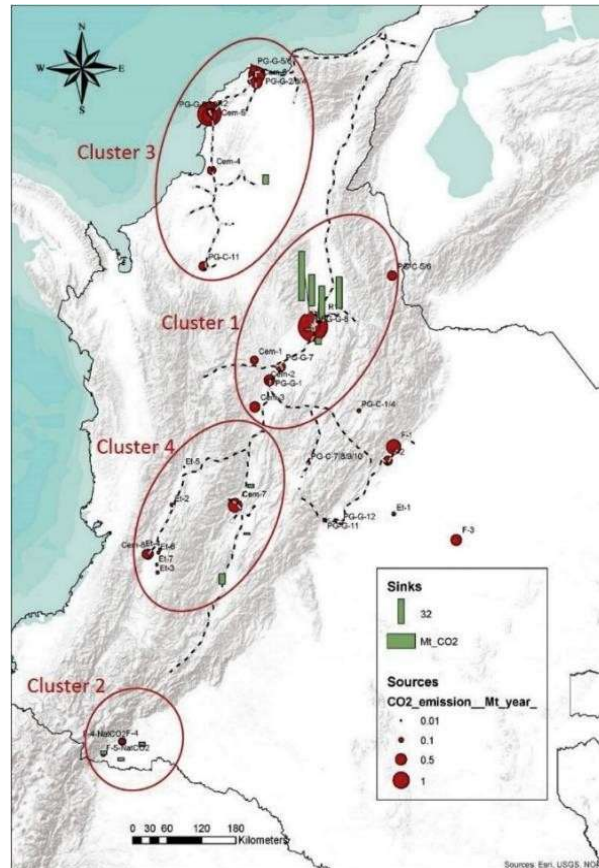


Figura 10. Ubicación de zonas industriales (Clústeres) y propuesta de carbo ductos en Colombia. Tomado de Yañez et al., (2021).

Otro ejemplo es el del CIAT en el Convenio de Cooperación Internacional GGC No. 632 de 2021, que se enfoca en el desarrollo de tecnologías y prácticas sostenibles que contribuyan a la lucha contra el cambio climático y promuevan el desarrollo sostenible en Colombia. Este documento detalla el contexto global y nacional de las emisiones de gases de efecto invernadero y subraya la necesidad urgente de adoptar medidas efectivas para reducir las emisiones como el caso de la implementación de tecnologías CCUS realizando un análisis de consideraciones económicas, aproximaciones a un marco regulatorio, sectores donde se puede implementar la tecnología, estudio de zonas de inyección y consideraciones geológicas generales, propuestas de grupos de gobernanza responsables de la planificación del proyecto de mitigación realizando un cronograma las actividades necesarias.¹⁰

Aunque Colombia aún no cuenta con estudios de viabilidad profunda sobre CCUS realizados por dependencias públicas, ni con propuestas de proyectos piloto a escala

comercial con información de carácter público, se pueden desarrollar actividades basadas en recomendaciones internacionales, y enfocarlas en sectores industriales generadores de emisiones y operaciones centralizadas para facilitar la captura y transporte de CO₂.¹⁴

Las industrias con mayor potencial para la implementación de tecnologías de CCUS en Colombia, según su presencia en el país y sus niveles de emisiones (Figura 11) son las siguientes:

- **Hidrocarburos:** Colombia cuenta con una industria de hidrocarburos robusta, liderada por Ecopetrol, que representa aproximadamente el 70% de la producción petrolera del país. La adopción de tecnologías CCUS especialmente en la recuperación mejorada de petróleo (EOR), podría tener un impacto significativo en la reducción de emisiones de CO₂ en este sector.¹⁰
- **Cemento y energía:** La producción de cemento y la generación termoeléctrica son otras dos áreas clave. La calcinación de caliza en la producción de cemento y la generación de electricidad en plantas que utilizan gas y carbón como combustible son fuentes importantes de emisiones de CO₂.

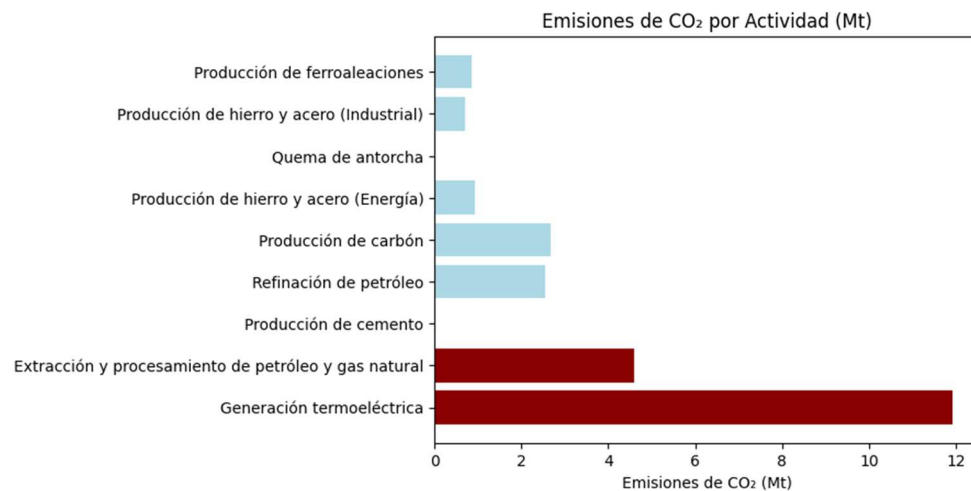


Figura 11. Emisiones de CO₂ en Colombia de los sectores industrial, energético y de transporte, en carmín las actividades de mayores emisiones de CO₂ a la atmósfera. Modificado de Yáñez et al., (2021).

1.5 Hoja de Ruta Tecnológica (HRT)

¹⁴ Wilberforce, T., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (2021). Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment*, 761, 143203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>

Una hoja de ruta tecnológica es una herramienta estratégica que proporciona una guía clara y estructurada para la investigación, el desarrollo y la implementación de tecnologías en un campo específico. Este documento sirve para identificar las metas a largo plazo, las tecnologías principales necesarias para alcanzar dichas metas y los pasos intermedios que deben seguirse. Por esta razón, las hojas de ruta tecnológica son ampliamente utilizadas para alinear las capacidades tecnológicas con las necesidades del mercado y los objetivos estratégicos de una organización o país, facilitando la toma de decisiones informadas y la planificación de inversiones. Kostoff y Schaller¹⁵ señalan que las hojas de ruta tecnológica permiten una planificación más estructurada y coordinada de la investigación y el desarrollo, favoreciendo la colaboración entre diferentes partes interesadas, incluyendo el gobierno, la industria y la academia ya que esta colaboración es fundamental para el éxito de las iniciativas tecnológicas a gran escala. En la Figura 12 se muestra el mapa de ruta tecnológica realizada por México para el desarrollo de los proyectos CCUS.

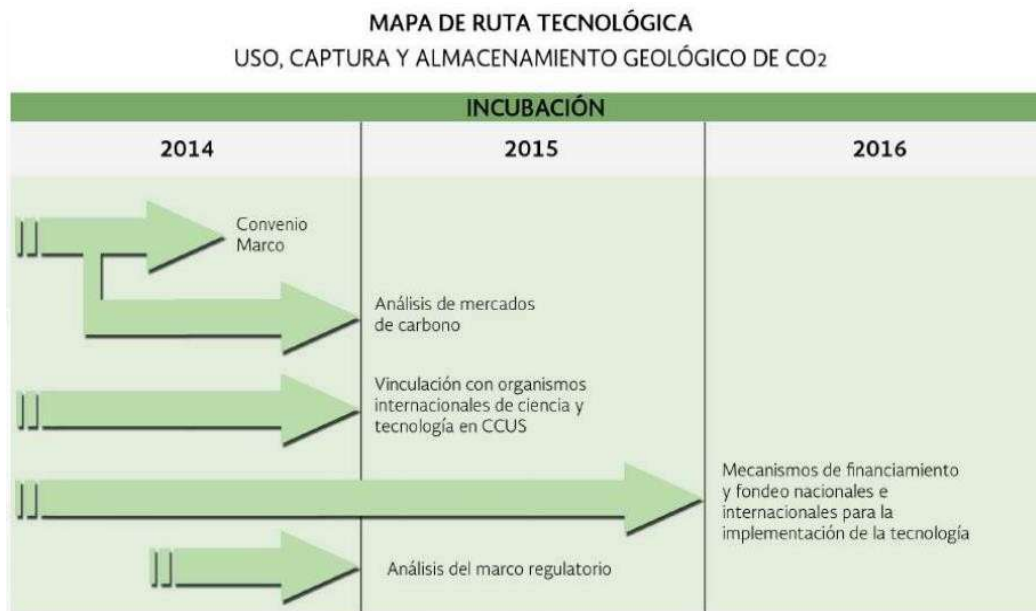


Figura 12. Fase inicial del mapa de ruta tecnológica modificada en México en el año 2018 que muestran los procesos encaminados a la implementación de la tecnología CCUS. Tomado de Secretaría de Energía “Mapa de ruta tecnológica CCUS” (2018).

Para que una hoja de ruta tecnológica funcione de verdad, se necesita que todos los

¹⁵ Kostoff, R. N., & Schaller, R. R. (2001). Science and technology roadmaps. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(2), 132–143. <https://doi.org/10.1109/17.922473>

involucrados se sumen y trabajen en equipo. Un buen ejemplo de esto se dio con la Iniciativa de Futuros de Energía (EFI) que reunió a más de 80 representantes de gobiernos, industrias, sindicatos, academia y organizaciones sin fines de lucro en diciembre de 2022 de manera virtual. Se reunieron para hablar sobre la captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) a nivel mundial y qué se necesita para implementarlo a gran escala en la próxima década. La amplia participación multisectorial demuestra que, aunque el diseño de estas hojas de ruta es inherentemente complejo por la diversidad de intereses, escalas geográficas y desafíos técnicos, es posible generar consenso y voluntad colectiva cuando existe un objetivo común claro y un liderazgo comprometido, como en este caso a nivel nacional e internacional.

1.5.1 Etapas sugeridas de la HRT para la implementación de Tecnología CCUS

En todo el mundo, pero principalmente en países con una industria robusta, las preocupaciones por la reducción de gases de efecto invernadero y el calentamiento global han llevado a diversas agencias científicas y gubernamentales a diseñar hojas de ruta tecnológicas, su creación permite planificar y desglosar cada aspecto tecnológico, político, regulatorio e ingenieril para implementar CCUS con una planificación adecuada asegurando la optimización de recursos, tanto económicos como humanos. Esta herramienta también permite a los países compartir medidas con empresas para avanzar en sus objetivos climáticos, asegurando que las soluciones tecnológicas sean viables y

efectivas en la reducción de emisiones.¹⁶

En Asia, países como China, Japón y Corea del Sur han creado marcos regulatorios y hojas de ruta adaptados a sus realidades y contextos industriales. A continuación, se ofrece un breve resumen de los avances globales en la creación de las HRT, ver Tabla 3.

Tabla 3. Desarrollo de Mapas de ruta en países del continente asiático.

País	Año	Descripción principal
China	2019	El Banco Asiático de Desarrollo (ADB) publicó una hoja de ruta actualizada con políticas, estrategias y proyectos piloto de demostración y despliegue de CCUS en el país. ¹⁷
Japón	2023 (actualización de 2020)	El Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) mantiene una hoja de ruta de largo plazo para CCS/CCUS, con fuerte énfasis en la protección del medio marino y la seguridad del almacenamiento geológico. ¹⁸
Corea del Sur	2018 (en vigor)	El Ministerio de Comercio, Industria y Energía (MOTIE) impulsa desde 2018 políticas, incentivos y programas de I+D para el desarrollo y despliegue de tecnologías CCUS dentro de su estrategia de transición energética.

En Europa, la Agencia Internacional de Energía (IEA) es un referente en el conocimiento y elaboración de proyectos sobre transición energética; por lo tanto, ha desarrollado una hoja de ruta tecnológica en donde el eje principal son las aplicaciones industriales de CCUS. La hoja de ruta tecnológica de la IEA del 2020 destaca el potencial de CCUS para reducir las emisiones de CO₂ en aplicaciones industriales, estableciendo objetivos a cumplir y ampliando una visión hasta 2050¹⁷ (Tabla 4).

Tabla 4. Desarrollo de Mapa de ruta en países de la unión europea.

País	Año	Descripción
Alemania	2023	La Agencia Federal del Medio Ambiente publicó en 2023 un informe que habla sobre los desafíos del almacenamiento de CO ₂ bajo el lecho marino o en sitios extranjeros. Como en todo proyecto de CCS, la normatividad y la falta de consenso general en marcos regulatorios constituyen barreras para

¹⁶ International Energy Agency (IEA). (2020). *CCUS in clean energy transitions*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

¹⁷ Asian Development Bank. (2019). *Road map update for carbon capture, utilization, and storage demonstration and deployment in the People's Republic of China*. Recuperado de <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/814386/road-map-update-carbon-capture-utilization-storage-prc.pdf>

¹⁸ Saeki, T. (2023). *Japan's Long-Term Roadmap for CCS*. Asia CCUS Network - ERIA. Recuperado de [https://www.asiaccusnetwork-eria.org/s/S3-](https://www.asiaccusnetwork-eria.org/s/S3-3_Saeki_230924_%E3%80%90ACNF3%E3%80%91%20Japan%27s%20Long-Term%20Roadmap.pdf)

[3_Saeki_230924_%E3%80%90ACNF3%E3%80%91%20Japan%27s%20Long-Term%20Roadmap.pdf](https://www.asiaccusnetwork-eria.org/s/S3-3_Saeki_230924_%E3%80%90ACNF3%E3%80%91%20Japan%27s%20Long-Term%20Roadmap.pdf)

		la aplicación de dicha tecnología. ¹⁹
Noruega	2016	Noruega es pionero en la implementación de CCUS, con el Proyecto Sleipner operando desde 1996, este proyecto ha servido como referencia para el desarrollo de otros países. ²⁰

En el continente americano, varios países han desarrollado hojas de ruta y marcos regulatorios específicos, siendo Estados Unidos y Canadá los líderes en el desarrollo de proyectos existentes (Tabla 5).

Tabla 5. Desarrollo de Mapa de ruta en países del continente americano.

País	Año	Descripción
Estados Unidos	2022	El Departamento de Energía (DOE) ha desarrollado varios documentos clave, incluyendo el programa de transporte y almacenamiento de carbono, que evalúa la infraestructura necesaria y desarrolla tecnologías avanzadas para la captura y almacenamiento a gran escala. ²¹
Canadá	2021	El gobierno canadiense ha publicado informes y proyectos que destacan al país como líder en el almacenamiento geológico de CO ₂ , apoyándose en estudios propios de las siete grandes cuencas sedimentarias para el secuestro geológico permanente del CO ₂ capturado, así como en el desarrollo de un sistema legal y regulatorio estable, modificado específicamente para evaluar y aprobar proyectos de CCUS. ²²
Brasil	2020	Petrobras está explorando las posibilidades de CCUS en el sector de petróleo y gas mediante proyectos piloto que buscan evaluar la viabilidad técnica y económica de estas tecnologías. Una vez establecido un marco regulatorio, el plan es desarrollar un centro comercial para diversos emisores industriales en el estado de Río de Janeiro, hogar de varios grandes clústeres industriales. ²³
México	2018	La Secretaría de Energía (SENER) ha elaborado una hoja de ruta tecnológica para CCUS enfocada en la industria de hidrocarburos y la generación de electricidad; esta estrategia contó con la participación de las principales

¹⁹ Umweltbundesamt. (2023). *Carbon Capture and Storage in the Global Climate Debate*. Recuperado de https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/ccs_in_the_global_climate_debate_policy_brief.pdf

²⁰ International Energy Agency. (2016). *20 years of carbon capture and storage: Accelerating future deployment*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/20-years-of-carbon-capture-and-storage>

²¹ U.S. Department of Energy. (2022). *Carbon Transport and Storage Multi-Year Program Plan*. Recuperado de <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/Carbon%20Transport%20and%20Storage%20Multi-Year%20Program%20Plan.pdf>

²² Government of Canada. (2021). *Canada's Carbon Management Strategy*. Natural Resources Canada. Recuperado de <https://natural-resources.canada.ca/energy-sources/carbon-management/canadas-carbon-management-strategy>

²³ Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). (2024). *Hubs de CCUS no Brasil: Construindo Cenários, Superando Barreiras*. Recuperado de <https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2024/03/CCUS-Brazil-WP-PT-vf.pdf>

	<p>instituciones en materia de medio ambiente y energía de México, como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en colaboración con PEMEX, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), UNAM, INECC, el Servicio Geológico Mexicano entre otras instituciones académicas.²⁴</p>
--	---

Tras analizar diferentes hojas de ruta tecnológicas, se puede observar que existe una similitud de las fases clave que debería incluir una hoja de ruta tecnológica básica. Entre estos tópicos se abarca: investigación y desarrollo (I+D), creación de tecnologías de captura y almacenamiento, realización de proyectos piloto, colaboración entre academia e industria, evaluación de impactos ambientales y sociales, establecimiento de marcos regulatorios y políticas, oferta de incentivos gubernamentales, aseguramiento del cumplimiento y supervisión, desarrollo de infraestructura de transporte, construcción de instalaciones de almacenamiento, mantenimiento de seguridad y operación, creación de mercados de carbono, monitoreo y verificación de resultados, fortalecimiento de vínculos y colaboración internacional, difusión y sensibilización pública, diseño de estrategias de comunicación, y promoción de la transparencia informativa. Por lo tanto, considerando el contexto de los países latinoamericanos y para nuestro caso Colombia, se propone una serie de pasos para elaborar una hoja de ruta tecnológica preliminar (HRT) que pueda englobar a estos aspectos, reconociendo que algunos de ellos requieren proceso más detallados para su desarrollo.

1. **Fase embrionaria:** Incluye la creación de un convenio de cooperación entre entidades emisoras de los GEI y las entidades (empresas) que se beneficien de estos, el análisis de mercados de carbono y la vinculación con organismos internacionales que se enfoquen en transición energética y temas de CCUS.
2. **Organización pública:** Se enfoca en la planificación pública, la creación y/o adecuación del marco regulatorio, la responsabilidad compartida, la divulgación del plan y políticas de fomento a la participación privada.
3. **Planeación:** Incluye las etapas correspondientes de cálculo y estudios exploratorios de evaluación de campos potenciales y capacidad de

²⁴ Secretaría de Energía. (2018). *Mapa de Ruta Tecnológica CCUS. Gobierno de México.*

almacenamiento, usos de CO₂ en ciclo combinado, estrategias de captura en sitios con emisiones probadas y fijas, así como su uso en otras industrias por ejemplo alimentaria, petrolera o el sector energético.

4. **Etapas de Piloto y Validación:** Promover la creación proyectos piloto donde se generen convenios de cooperación para el intercambio de recursos entre industrias (ej. hidrocarburos, generación de electricidad, plantas industriales, cementeras siderúrgicas, entre otras).
5. **Escala producción comercial:** Transición de proyectos piloto y demostrativos a escala comercial, incluyendo la infraestructura necesaria para el transporte y almacenamiento de CO₂, y los usos que se le puedan dar al gas capturado.

II. Fase embrionaria

La fase embrionaria abarca el conjunto de medidas determinantes que deben desarrollarse antes de que una organización pública entre en operación. Los elementos de la política deben planificarse con antelación, por lo que es necesario establecer, en un período definido, acciones que preparen el entorno nacional para adaptarse a las nuevas tecnologías. Este primer paso sienta las bases para las medidas de acción que posteriormente se integrarán de manera sistemática en los programas rutinarios de diversas organizaciones.

2.1 Marco regulatorio

En el libro de trabajo IEACCUS²⁵ se menciona que el marco regulatorio implica evaluar y estructurar un conjunto de políticas, leyes que permitan la instauración de la tecnología. Este análisis permite conocer las mejores prácticas y adaptarlas a las **necesidades de cada país o región**, facilitando la aceptación de los procesos de manera que se minimicen los riesgos y se maximicen los beneficios ambientales y económicos.

Este tipo de manuales tiene como objetivo proporcionar una guía para que los países conozcan, comprendan e implementen las políticas, reglas y mejores prácticas a sabiendas que en otros países han realizado y cumplido con una serie de requisitos, como los mencionados a continuación en la Tabla 6.

²⁵ International Energy Agency (IEA). (2022). *Legal and regulatory frameworks for CCUS: An IEA CCUS handbook*. Retrieved from <https://cdriaw.org/wp-content/uploads/2022/10/LegalandRegulatoryFrameworksforCCUS- AnIEACCUSHandbook.pdf>

Tabla 6. Requisitos para el establecimiento de un marco regulatorio válido. Modificada de IEACCUS (2024).

Requisito	Descripción
Procedimientos de licencias y permisos	Que los procedimientos de licencias y permisos no presenten demoras innecesarias para la implementación de CCS o CCUS, al tiempo que proporcionen una garantía adecuada al público de que los sitios aprobados son seguros y protegidos.
Aseguramiento de requisitos regulatorios	Que las autoridades puedan asegurar a los desarrolladores de proyectos de CCS o CCUS que todos los requisitos regulatorios para un proyecto han sido acordados por los gobiernos y puedan ser comunicados claramente a los patrocinadores del proyecto.
Responsabilidad y provisiones financieras	Que los asuntos no resueltos relacionados con la responsabilidad a largo plazo, la transferencia y las provisiones financieras no impongan un riesgo desmesurado para la inversión comercial, retrasando la implementación generalizada de proyectos.
Desarrollo de marcos legales	Que el desarrollo de marcos legales en diferentes niveles de gobierno (por ejemplo, a nivel federal y estatal) no dé lugar a una formulación de políticas y regulaciones no alineadas, generando incertidumbre para los inversionistas y operadores de proyectos de CCS y CCUS.

En los últimos años, las jurisdicciones analizadas han experimentado avances notables en la construcción de marcos legales y regulatorios específicos para las tecnologías CCUS. Si bien aún no existe un estándar regulatorio internacional de carácter vinculante ni un cuerpo normativo suficientemente consolidado que pueda considerarse obligatorio a escala global, diversas instituciones y organismos internacionales han logrado desarrollar recomendaciones técnicas y jurídicas detalladas sobre marcos regulatorios modelo. Estos instrumentos han sido publicados y puestos a disposición pública, para usarse como referencia y orientación para los Estados, la industria y los actores interesados en el despliegue responsable de proyectos.²⁶

2.2 Acuerdo de París

Los Estados Parte del Acuerdo de París están obligados a presentar y actualizar periódicamente sus contribuciones determinadas a nivel nacional (*Nationally Determined*

²⁶ *International Energy Agency (IEA). (2023). Legal and regulatory frameworks for CCUS. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/legal-and-regulatory-frameworks-for-ccus>*

Contributions, NDCs), en las que se establecen metas cuantitativas o cualitativas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como las políticas, medidas y estrategias previstas para alcanzarlas. De conformidad con el artículo 4, párrafo 9, dichas contribuciones deben comunicarse cada cinco años y, conforme al párrafo 3 del mismo artículo, cada comunicación sucesiva deberá reflejar una progresión respecto de la anterior y representar el mayor nivel posible de ambición, teniendo en cuenta las responsabilidades (comunes pero diferenciadas) y las capacidades, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales.²⁷

2.3 Directiva Europea de Captura y Almacenamiento de Carbono

Establece un marco para la captura, transporte y almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CO₂) en la Unión Europea.²⁸ Abarca una serie de requisitos (Tabla 7) producto de investigaciones extensas que la UE (Unión Europea) ha implementado para su manejo del almacenamiento geológico de CO₂.

Tabla 7. Áreas investigadas sobre CCUS por parte de la unión europea. Tomado de Directive 2009/31/EC

Requisito	Descripción
Autorización de captura	Los proyectos de captura de CO ₂ requieren autorización específica. Los operadores/responsables deben demostrar que las instalaciones cumplen con los requisitos técnicos y de seguridad necesarios para minimizar el riesgo de fugas y garantizar la eficiencia del proceso.
Transporte de CO₂	El CO ₂ capturado debe ser transportado de manera segura a los sitios de almacenamiento. La directiva establece normas para la construcción y operación de infraestructura para el transporte, incluyendo gasoductos y buques.
Responsabilidad a largo plazo	La directiva establece que los operadores son responsables del sitio de almacenamiento hasta que se pueda demostrar que el CO ₂ está siendo almacenado de manera segura y permanente. Después de este período, la responsabilidad puede ser transferida a las autoridades nacionales, siempre que se cumplan todos los requisitos legales y técnicos.

2.4 Normas ISO en materia de CCS

²⁷ *United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Acuerdo de París. Conferencia de las Partes en su 21.º período de sesiones, París, 30 de noviembre a 11 de diciembre de 2015. FCCC/CP/2015/10/Add.1. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_spanish.pdf*

²⁸ *European Union. (2009). Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council on the geological storage of carbon dioxide. Official Journal of the European Union. Recuperado de <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00114-00135.pdf>*

Las normas ISO (*International Organization of Standardization*) constituyen un conjunto de estándares internacionales diseñados para garantizar la calidad, seguridad y eficiencia de productos, servicios y sistemas a nivel global. Esta organización, de carácter independiente y no gubernamental, integra a 165 organismos nacionales de normalización, promoviendo la armonización de prácticas técnicas y la mejora continua en diversos sectores industriales y de servicios.

Las normas ISO proporcionan especificaciones para asegurar que estas tecnologías se implementen de manera segura y estandarizada a nivel global, en materia de CCUS comprenden un total de 21, de las cuales 8 se encuentran en desarrollo.²⁹

ISO 27914:2017

Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage — Geological storage.

Esta norma establece los requisitos para la inyección y almacenamiento geológico de CO₂. Incluye instrucciones sobre la selección de sitios, caracterización, desarrollo, operación, monitoreo y cierre de sitios de almacenamiento. También aborda temas relacionados con la gestión de riesgos y la protección del medio ambiente.

ISO 27919-1:2018

Carbon dioxide capture — Part 1: Performance evaluation methods for post-combustion CO₂ capture integrated with a power plant.

Esta norma proporciona métodos para la evaluación del desempeño de la captura de CO₂ posterior a la combustión, integrada en una planta de energía. Incluye indicaciones sobre la eficiencia de captura, el consumo de energía y la integración del sistema de captura con la planta de energía.

ISO 27916:2019

Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage — Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO₂-EOR).

Esta norma establece los requisitos para el almacenamiento de CO₂ utilizando la

²⁹ International Organization for Standardization (ISO). (n.d.). *ISO/TC 265 - Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage*. Recuperado de <https://www.iso.org/es/committee/648607/x/catalogue/>

recuperación mejorada de petróleo (EOR). Proporciona indicaciones sobre la inyección de CO₂, monitoreo, verificación y cierre de proyectos de CO₂-EOR.

ISO 27917:2017

Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage — Quantification and verification.

Establece métodos para la cuantificación y verificación de CO₂ capturado, transportado y almacenado. Incluye directrices sobre la medición de flujos de CO₂, cálculos de balances de masa y procedimientos de verificación para asegurar la precisión y transparencia de los datos reportados.

ISO/TC 265:

Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage

Aborda conceptos clave de la captura de CO₂, estandarización del diseño, construcción, operación, planificación y gestión ambiental, gestión de riesgos, cuantificación, monitoreo y verificación, y actividades relacionadas en el campo de la captura, transporte y almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CCS).

La norma ISO/TC 265, establecida en 2011 y centrada en la captura, transporte y almacenamiento geológico de dióxido de carbono, es una herramienta para desarrollar marcos de CCUS que se ajusten a las regulaciones de cada país. El soporte académico es que esta norma se crea por consenso entre los miembros expertos internacionales en donde colaboran en comités técnicos para desarrollar detalles y directrices que reflejan una constante actualización en el entendimiento de ésta.

Los estándares ISO son revisados cada cinco años y aunque son voluntarios pueden ser adoptados o incorporados en la legislación de los países, colaborando para armonizar las regulaciones a nivel internacional. Actualmente, el ISO/TC 265 sigue activo, con múltiples grupos de trabajo que abordan aspectos desde la captura de CO₂, su transporte marítimo y almacenamiento geológico. La adopción de una norma ISO no implica automáticamente su inclusión en el marco legal de un país, pero sí facilita a los reguladores la implementación de prácticas estandarizadas adoptando la norma en su totalidad, o modificada, según las necesidades locales (Figura 13).

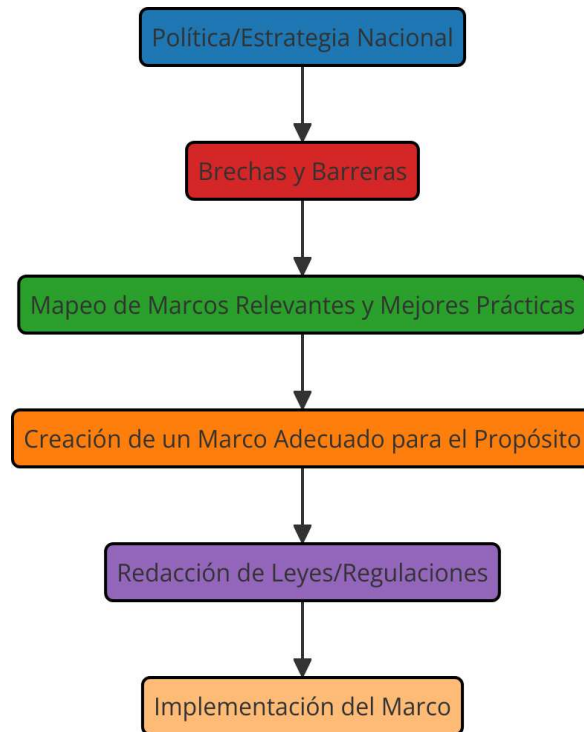


Figura 13. La creación de un marco regulatorio también necesita una hoja de ruta, basándose en las recomendaciones de IEAGHG (*IEA Greenhouse Gas R&D Programme*) para establecer un marco regulatorio acorde a las necesidades de un país. Elaboración propia con datos de *Legal and Regulatory Frameworks for CCUS (2022)*.

2.4.1 Marco regulatorio del Global CCS Institute y Pozos clase VI EPA.

El *Global CCS Institute* es una organización internacional dedicada a promover la implementación y el desarrollo de tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS) que tiene como misión acelerar el proceso de adopción de estas tecnologías para mitigar los efectos del cambio climático y avanzar hacia una neutralidad climática.

Estados Unidos tiene una sólida historia de ser pionero en tecnologías de CCS y alberga el mayor número de instalaciones de CCS operativas, en desarrollo y en construcción en el mundo, el *global CCS Institute* toma de referencia las indicaciones y recomendaciones de la EPA (*Environmental Protection Agency*) en la construcción de pozos clase VI (Tabla 8).³⁰

³⁰ U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Construction Guidance*. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa816r11020.pdf>

Tabla 8. Estándares críticos establecidos por la EPA para la construcción, monitoreo y permisos de pozos de almacenamiento geológico de CO₂. Tomado de Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Construction (2012).

Categoría	Descripción
Construcción del pozo	Los materiales utilizados en la construcción de los pozos Clase VI deben ser compatibles con el CO ₂ inyectado y resistentes a la corrosión. Esto incluye el uso de tuberías y cementos especializados que puedan soportar las condiciones del almacenamiento de CO ₂ .
	Revestimiento y cementación: Los pozos deben contar con múltiples capas de revestimiento y cementación para impedir la migración del CO ₂ hacia formaciones permeables y respaldar la integridad mecánica del pozo. Es importante que los revestimientos estén cementados a lo largo de toda su longitud para prevenir fugas de fluidos laterales.
Integridad del pozo	<p>Pruebas de integridad mecánica: Es obligatorio realizar pruebas iniciales y periódicas para asegurar que no haya fugas en el pozo. Estas pruebas incluyen evaluaciones de presión y monitoreo continuo para detectar cualquier falla potencial en el revestimiento o el cemento.</p> <p>Monitoreo y mantenimiento: Los operadores deben realizar un monitoreo regular de presión y variables operativas para garantizar la integridad continua del pozo. El mantenimiento debe cumplir los estándares establecidos por la EPA.</p>
Ubicación y caracterización del sitio	<p>Evaluación del sitio: Antes de la construcción del pozo, se debe realizar una caracterización detallada del sitio para confirmar que la geología local es adecuada para el almacenamiento de CO₂. Esto incluye estudios geológicos, geofísicos y geomecánicos, etcétera.</p> <p>Modelado de simulación: Se utilizan para predecir el comportamiento del CO₂ inyectado en el subsuelo, permiten asegurar que el gas se mantenga confinado dentro de la formación de almacenamiento.</p> <p>Planes de contingencia: Los operadores deben desarrollar y mantener planes de emergencia para responder a cualquier fuga o liberación de CO₂. Estos planes deben incluir procedimientos de notificación, medidas correctivas y estrategias para mitigar impactos ambientales y salud pública.</p>
Requisitos de permisos	<p>Obtención de permisos: Es obligatorio obtener un permiso de Clase VI de la EPA antes de iniciar la construcción y operación de un pozo de inyección. El proceso de solicitud de permisos incluye la presentación de planes de construcción, operación, monitoreo y cierre del pozo.</p> <p>Revisión y aprobación: La EPA revisa y aprueba los planes presentados, asegurando que cumplen con todas las</p>

	regulaciones y estándares de seguridad antes de otorgar el permiso.
--	---

La construcción de un marco regulatorio seguro requiere la participación de los involucrados, gobierno, empresas y academia. Un marco regulatorio puede crearse a partir de otros a manera de modificación o puede crearse desde la fase inicial, el reto consiste en la cooperación entre las múltiples agencias científicas/académicas, industria y niveles de gobierno, lo cual puede ser complejo y demorado. Y que además los marcos regulatorios deben ser lo suficientemente flexibles para adaptarse a los rápidos avances tecnológicos y cambios en las condiciones del mercado ³¹ .

³¹ *Energy Futures Initiative (EFI). (2022). Optionality, flexibility & innovation: Pathways for deep decarbonization in the United States. Recuperado de https://energyfuturesinitiative.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/OptionalityFlexibilityInnovation_Report_compressed.pdf*

2.5 Análisis de mercados de Carbono

Los mercados de carbono son sistemas de intercambio con derechos de emisión de dióxido de carbono y otros GEI que buscan incentivar la reducción de emisiones a través de la comercialización de CO₂ (Figura 14). Los análisis de mercado de carbono deben de realizarse a manera de proyección sobre un corto, mediano y largo plazo; este análisis debe de contemplar los precios por reducción de emisiones y las penalizaciones por el exceso de emisiones a la atmósfera ya que la adopción de la tecnología CCUS no será rentable si no existe un motor económico que fomente la inversión en este tipo de proyectos. Principalmente, existen dos tipos de mercados de carbono: de cumplimiento y voluntarios.³²

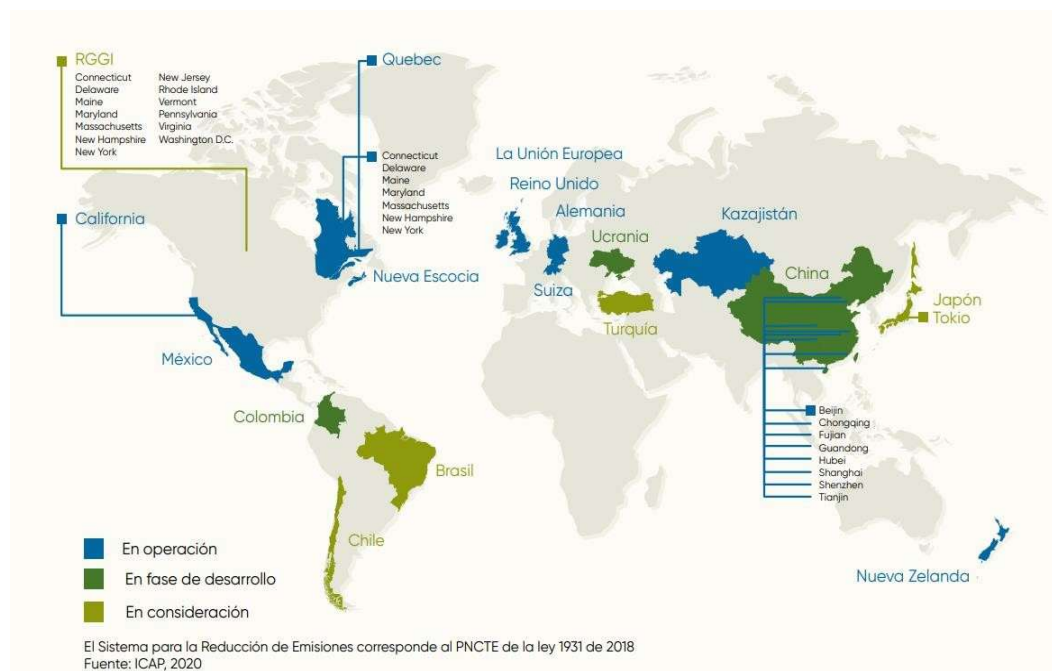


Figura 14. Mercados de carbono en fases de operación, desarrollo y consideración. Tomado de: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2022).

Mercados de cumplimiento

1. Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea

Es el mercado de carbono más grande del mundo, el régimen de comercio de derechos

³² Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Mercados de carbono. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Mercados-de-Carbono-Libro-Minambiente.pdf>

de emisión de la Unión Europea (EU ETS) opera bajo el principio de “límite y comercio” (*cap and trade*). En este sistema, se establece un tope máximo de emisiones para sectores como la energía, la industria, el transporte, y las empresas reciben o adquieren permisos de emisión. Cada permiso permite emitir una tonelada de CO₂ equivalente por año, un estándar que se ha mantenido como base desde el lanzamiento del EU ETS en 2005, aunque el número total de permisos se reduce anualmente (actualmente un 2.2% por año desde 2021) para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de la UE, como el 55% menos para 2030 respecto a 1990. Las empresas que reducen sus emisiones pueden vender sus permisos sobrantes a otras que necesiten cubrir excedentes, lo que ha demostrado ser efectivo para bajar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la UE y fomentar inversiones en tecnologías más limpias.

Cuando una empresa necesita más permisos, los adquiere a través de subastas o mercados secundarios. El precio de estos permisos varía según la oferta y la demanda; en 2025, los costos han fluctuado entre 70 y 90 euros por tonelada, dependiendo de las condiciones del mercado, aunque no hay un valor fijo exacto debido a su naturaleza dinámica.³³ Estos ingresos se destinan a financiar proyectos de tecnologías ecológicas y a modernizar infraestructuras energéticas, especialmente en regiones con menor rentabilidad económica, asegurando una transición ecológica más justa y equilibrada.³⁴

2. Sistema de comercio de emisiones de California

Es uno de los programas más avanzados en los Estados Unidos, que cubre las emisiones de dióxido de carbono de diversos sectores, incluidos el transporte y la industria, con subastas periódicas de permisos de emisión y una fuerte regulación estatal. También, ha logrado reducir las emisiones y estimular la innovación tecnológica en energías más limpias y la eficiencia energética. El ejemplo de California demuestra que es posible limitar, poner precio y reducir la contaminación por gases de efecto invernadero del Estado (Tabla 9), a la vez que se estimula el crecimiento continuo de la economía del estado siempre y cuando se realicen los ajustes requeridos. Este sistema de comercio de mercado resalta que es posible tener un crecimiento económico al poner en marcha

³³ *Clean Air Task Force (2023). Mapeo del costo de la captura y almacenamiento de carbono en Europa. Recuperado de <https://www.catf.us/es/2023/02/mapping-cost-carbon-capture-storage-europe/>*

³⁴ *European Commission. (n.d.). EU emissions trading system (EU ETS). Recuperado de https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en.*

programas dentro del sector “verde” de la economía definido por los empleos e ingresos generados a partir de la adopción acelerada de soluciones de energía más limpia.³⁵

Tabla 9. Comparativa de sistemas de comercio de emisiones (Carbon Pricing). Tomado de Environmental Defense Found.

Sistema de Comercio de Emisiones	Cobertura	Precio del carbono (USD por tonelada)	Reducción de emisiones
Sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea	45% de las emisiones nacionales	58	36%
Programa de <i>cap and trade</i> de California	17% de las emisiones nacionales	19	13%

Mercados Voluntarios

Permiten a las empresas, organizaciones y particulares comprar créditos de carbono para compensar sus emisiones de GEI de manera voluntaria. Estos mercados no están regulados por leyes gubernamentales, sino que operan de manera independiente.

Verified Carbon Standard (VCS) es uno de los estándares más utilizados para proyectos de reducción de emisiones en mercados voluntarios. Proporciona un marco para verificar y certificar proyectos de reducción de emisiones. Este mercado ha permitido la implementación de proyectos de reforestación, energía renovable y eficiencia energética en todo el mundo.³⁶

2.6 Estado actual de los mercados de carbono en Colombia

Los mercados de carbono han evolucionado en los últimos años, con varios sistemas establecidos en todo el mundo para ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 15). Colombia ha tomado medidas para participar en los mercados de carbono a través del Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (PNCTE), establecido en 2018 bajo la Ley de Cambio Climático. Este programa crea un sistema nacional de comercio de emisiones (ETS), donde el

³⁵ *Environmental Defense Fund (EDF). (n.d.). Mercado de carbono de California: Segundo año – Resumen ejecutivo. Recuperado de: <https://www.edf.org/sites/default/files/content/carbonmarketcaliforniayearwoexecutivesummary-spanish.pdf>*

³⁶ *Iniciativa Finanzas Carbono. (n. d.). Estándar Verified Carbon Standard (VCS). <https://finanzascarbono.org/mercado-voluntario/acerca/estandares/vcs/>*

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) es responsable de asignar permisos de emisión, que se distribuyen principalmente mediante subastas. Las empresas deben obtener permisos que correspondan a sus emisiones, y las reducciones voluntarias de emisiones de GEI también pueden certificarse para obtener estos permisos. Este programa complementa el impuesto al carbono de Colombia y se espera que esté completamente operativo para 2030.³⁷

El impuesto de carbono en Colombia comprende un precio de \$ 23,394.60 pesos colombianos? (COP) lo que equivale aproximadamente a \$4.30 dólares por tonelada de CO₂ equivalente; además, MinAmbiente es el responsable de asignar los derechos de emisión conforme a las líneas de emisión-mitigación proyectadas, los recursos de este mercado se asignaran hacia el “Fondo de la vida y biodiversidad”.

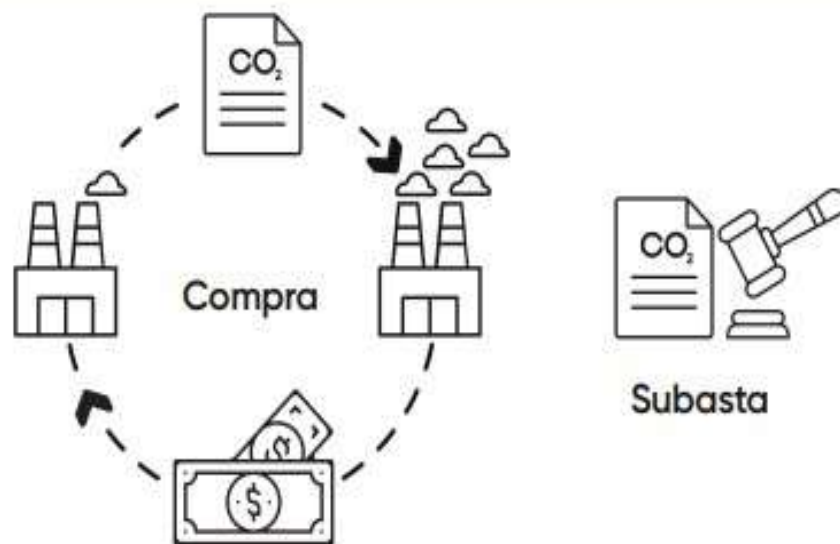


Figura 15. La adquisición de cupos transferibles mediante subastas o en el mercado, permite a las empresas obtener derechos de emisión que pueden ser vendidos a otras que han reducido sus emisiones y cuentan con cupos sobrantes, un mecanismo que se asemeja al Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023.

2.7 Vinculación Internacional

En Colombia, así como en la mayoría de los países de América Latina y el Caribe, el nivel de conocimiento técnico-científico sobre las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) sigue siendo incipiente. Esta brecha de

³⁷International Carbon Action Partnership (ICAP). (s. f.). Acerca de ICAP. <https://icapcarbonaction.com/en/about-icap>

capacidades restringe tanto la difusión tecnológica como la adopción efectiva de CCUS en los sectores industriales emisores de alta intensidad y en la formulación de políticas públicas de descarbonización.^{38 39}

El establecimiento de alianzas estratégicas entre instituciones nacionales como las Universidades, el Servicio Geológico Colombiano, Ecopetrol y el Sistema Nacional Ambiental y centros internacionales de excelencia en CCUS resulta imperativo. Dichas alianzas no solo facilitarían la formación especializada de profesionales colombianos en áreas críticas como ingeniería de captura, caracterización y modelación de reservorios geológicos, protocolos de monitoreo, medición y verificación (MMV), gestión de riesgos a largo plazo y marcos regulatorios, sino que también propiciarían la transferencia estructurada de conocimiento, datos técnicos y mejores prácticas internacionales adaptadas al contexto geológico e institucional del país.⁴⁰

La suscripción de convenios de cooperación técnica con entidades que ya han implementado proyectos piloto y comerciales exitosos permite reducir los riesgos técnicos y económicos asociados a las primeras experiencias nacionales. Este enfoque de “aprendizaje por réplica controlada” ha demostrado ser eficaz en jurisdicciones como Noruega, Australia y Estados Unidos⁴¹. Además, la capacitación inicial de un núcleo crítico de técnicos y especialistas colombianos genera un efecto multiplicador: estos profesionales se convierten en formadores de nuevas generaciones tanto en el ámbito académico como en la industria, constituyendo así una inversión estratégica en capital humano especializado.

Para superar la brecha de capacidades identificada, existen diversas organizaciones internacionales creadas específicamente para asistir a países interesados en el despliegue responsable de CCUS. En la Tabla 10 se presenta un listado de las principales entidades que ofrecen asesoría técnica, regulatoria, jurídica y ambiental de

³⁸ International Energy Agency (IEA). (2024). *CCUS in Clean Energy Transitions: Technology Deep Dive*. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

³⁹ Global CCS Institute (GCCSI). (2023). *Global Status of CCS 2023*. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2023-executive-summary/>

⁴⁰ Banco Mundial. (2023). *Economic Review: Latin America and the Caribbean – October 2023*. Office of the Chief Economist for Latin America and the Caribbean. <https://www.worldbank.org/en/region/lac/publication/perspectivas-economicas-america-latina-caribeean>

⁴¹ International Energy Agency (IEA). (2023). *CCUS Projects Database and Lessons Learned*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>

alto nivel, así como financiamiento y acompañamiento en proyectos demostrativos.

Tabla 10. Organizaciones o Foros Internacionales de Apoyo a Tecnologías CCUS (Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono). Elaboración propia.

Organización	Rol principal y tipo de apoyo	Sitio web oficial
Global CCS Institute (GCCSI)	Referente mundial en CCS/CCUS. Ofrece asesoría técnica, económica, regulatoria y jurídica; base de datos de proyectos y capacitación especializada.	https://www.globalccsinstitute.com
International Energy Agency (IEA)	Análisis técnico-económico global de CCUS, hojas de ruta tecnológicas. recomendaciones de política pública y programas de cooperación.	https://www.iea.org
Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF)	Foro intergubernamental que promueve cooperación técnica y política para el desarrollo y demostración de tecnologías CCS/CCUS.	https://www.cslforum.org
United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)	Marco normativo global; apoyo en integración de CCUS en NDCs, mecanismos del Artículo 6 del Acuerdo de París y registro de proyectos de mitigación.	https://unfccc.int
World Bank Group (WBG)	Financiamiento concesional y de riesgo, asistencia técnica, diseño de marcos regulatorios y programas de fortalecimiento institucional.	https://www.worldbank.org
Inter-American Development Bank (IDB)	Apoyo financiero y técnico regional para América Latina y el Caribe, incluyendo estudios de prefactibilidad y proyectos piloto CCUS.	https://www.iadb.org
Development Bank of Latin America and the Caribbean (CAF)	Financiamiento de infraestructura energética sostenible y programas de descarbonización industrial con componente CCUS.	https://www.caf.com
Latin American Energy Organization (OLADE)	Cooperación energética regional; asesoría técnica y elaboración de hojas de ruta CCUS para países miembros.	https://www.olade.org
International Center for Tropical Agriculture (CIAT – Alianza Bioversity CIAT)	Centro de investigación en captura biológica de carbono, uso sostenible de la tierra y soluciones basadas en la naturaleza complementarias a CCUS tecnológico.	https://alliancebioiversityciat.org

2.8 Redes y proyectos internacionales de investigación, casos de éxito

La Agencia Internacional de Energía ha subrayado en varios informes la importancia de la colaboración internacional para el éxito de los proyectos CCUS. Según la IEA, las redes

internacionales permiten compartir experiencias y conocimientos técnicos para superar los desafíos inherentes a la tecnología CCUS, como la selección de sitios de almacenamiento, la gestión de riesgos y la implementación de modelos de negocio viables⁴². Además, la cooperación internacional facilita la creación de infraestructura compartida para la captura, el transporte y el almacenamiento de CO₂, importante para hacer económicamente viables estos proyectos⁴³.

A continuación, se analizan proyectos de alcance internacional seleccionados con el propósito de obtener una visión más detallada y estructurada del estado actual del despliegue de tecnologías CCUS a nivel global.

2.8.1 Proyecto Sleipner

Es uno de los primeros proyectos comerciales de almacenamiento de CO₂ a gran escala que inició en 1996 y está ubicado en el campo de gas Sleipner West en el Mar del Norte, Noruega. El CO₂ se separa del gas natural producido y se inyecta en la formación salina Utsira a 800-1000 metros debajo del lecho marino (Figura 16). El proyecto es liderado por Equinor (anteriormente Statoil), con la participación de empresas como Total y Shell, y apoyo de la Unión Europea. Sleipner ha almacenado más de 20 millones de toneladas de CO₂ y ha proporcionado datos importantes sobre el comportamiento del CO₂ en formaciones geológicas, sirviendo como un caso de estudio y referencia para futuros proyectos de CCUS.⁴⁴

⁴² International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> SOBRA ESTO?

⁴³ Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). (2023). *CCUS Hub Playbook: Accelerating industrial decarbonization*. Recuperado de <https://www.ogci.com/news/ogci-updates-ccus-hub-playbook-and-expands-access-to-help-accelerate-industrial-decarbonization>

⁴⁴ Gale, J., & Christensen, N. P. (2004). *Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects*. *Energy*, 29(9-10), 1361-1369. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.104>

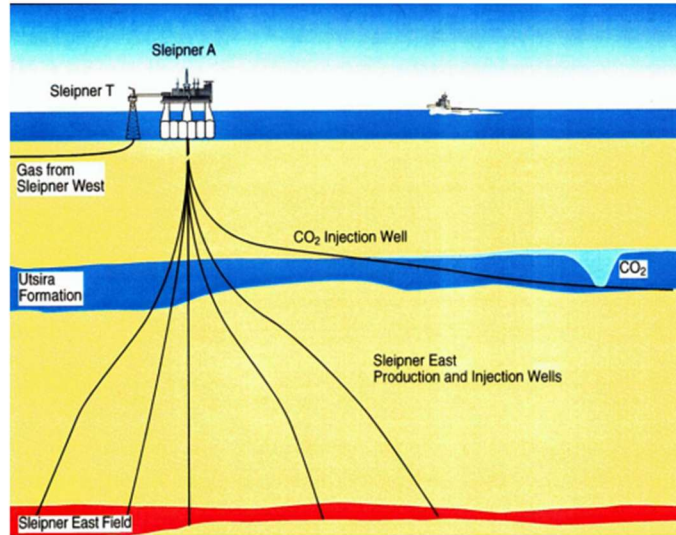


Figura 16. Esquema del proyecto Sleipner de captura y almacenamiento de CO₂ en una formación salina. Tomado de Torp A. Tore. et al., (2004).

2.8.2 Carbon Capture Simulation Initiative (CCSI)

La CCSI es una colaboración entre el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), laboratorios nacionales, universidades y socios industriales. El objetivo es desarrollar herramientas de modelado y simulación avanzadas para mejorar la eficiencia y reducir los costos de la captura de carbono⁴⁵ este tipo de modelado y la simulación multiescalar avanzada tienen el potencial de reducir drásticamente este tiempo de desarrollo. Aunque el proyecto está liderado por EE. UU. se colabora con investigadores y expertos de Europa y Asia. CCSI ha desarrollado software y herramientas de simulación que son utilizados globalmente para diseñar y optimizar sistemas de captura de carbono, acelerando el desarrollo de CCUS.⁴⁶

2.8.3 Proyecto Peterhead CCS

Propuesto para capturar arriba de un millón de toneladas de CO₂ anualmente de la planta de gas Peterhead (Figura 17)⁴⁷ en Escocia y almacenarlo en el campo petrolífero

⁴⁵ U.S. Department of Energy. (2023). *Carbon Capture Simulation Initiative (CCSI)*. Recuperado de <https://www.energy.gov/fecm/carbon-capture-simulation-initiative>

⁴⁶ Miller, D. C., Syamlal, M., Mebane, D. S., Storlie, C., Bhattacharyya, D., Sahinidis, N. V., Agarwal, D., Tong, C., Zitney, S. E., Sarkar, A., Sun, X., Sundaresan, S., Ryan, E., Engel, D., & Dale, C. (2014). Carbon Capture Simulation Initiative: a case study in multiscale modeling and new challenges. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 5, 301–323. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060713-040321>

⁴⁷ SSE Thermal & Equinor. (n.d.). *Peterhead low carbon power station*. Recuperado de <https://peterheadlowcarbon.consultation.ai/>

Goldeneye en el Mar del Norte. El proyecto fue liderado por Shell, su objetivo es demostrar la viabilidad comercial de CCUS.⁴⁸ Respecto a la participación internacional se incluyó la colaboración del gobierno del Reino Unido, la Unión Europea y empresas como SSE (*Scottish and Southern Energy*). Se proyecta una captura de hasta 1.5 millones de toneladas de CO₂ al año, lo que representa alrededor del 5% de la meta del gobierno del Reino Unido para 2030. El CO₂ capturado se almacenará de forma segura en Acorn, ubicado aproximadamente a 100 km de la costa en el Mar del Norte, remarcando la importancia de contar con una infraestructura adecuada para el proyecto y se espera que tenga un impacto económico positivo en la región de Aberdeen durante su desarrollo y operación.⁴⁹

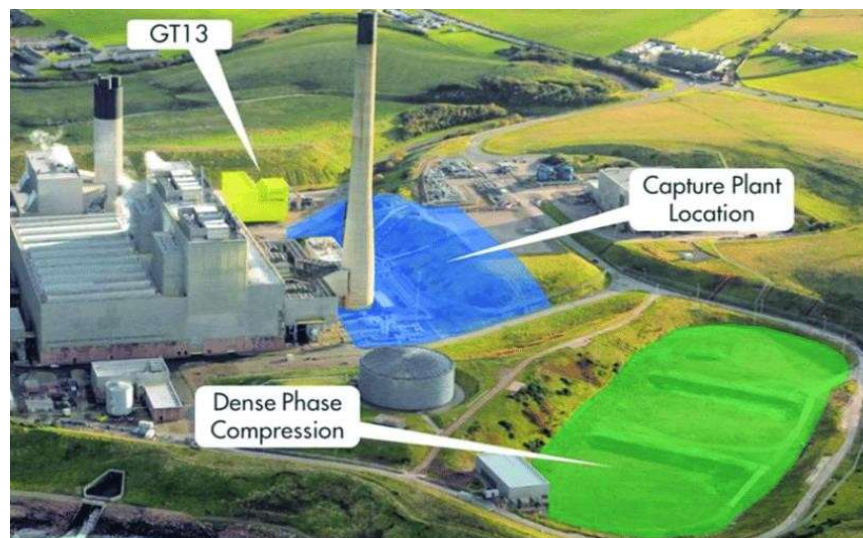


Figura 17. Instalaciones de CCS propuestas en la central eléctrica de Peterhead. Tomado de *Peterheadlowcarbon.ia* (2021).

2.8.4 CO2GeoNet

CO2GeoNet es la red europea de excelencia en almacenamiento geológico de CO₂, financiada por la Comisión Europea. Su foco es la investigación y desarrollo de técnicas seguras y eficientes para el almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas⁵⁰. El

⁴⁸ Shell. (2015). *Peterhead CCS Project*. Recuperado de <https://www.shell.co.uk/sustainability/decommissioning/peterhead-ccs-project.html>

⁴⁹ Cotton, A., Gray, L., & Maas, W. (2016). *Learnings from the Shell Peterhead CCS Project Front End Engineering Design*. *Energy Procedia*, 114, 5661-5670. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1717>

⁵⁰ CO2GeoNet. (2023). *CO2GeoNet: The European Network of Excellence on the Geological Storage of CO₂*. Recuperado de <https://www.co2geonet.com>

proyecto hasta 2016 comprendía más de 26 instituciones de 19 países europeos que colaboran en proyectos de investigación y compartición de datos (Figura 18).⁵¹ CO2GeoNet ha contribuido significativamente al conocimiento global sobre el almacenamiento geológico de CO₂, desarrollando mejores prácticas y proporcionando formación y asesoramiento técnico a nivel internacional.

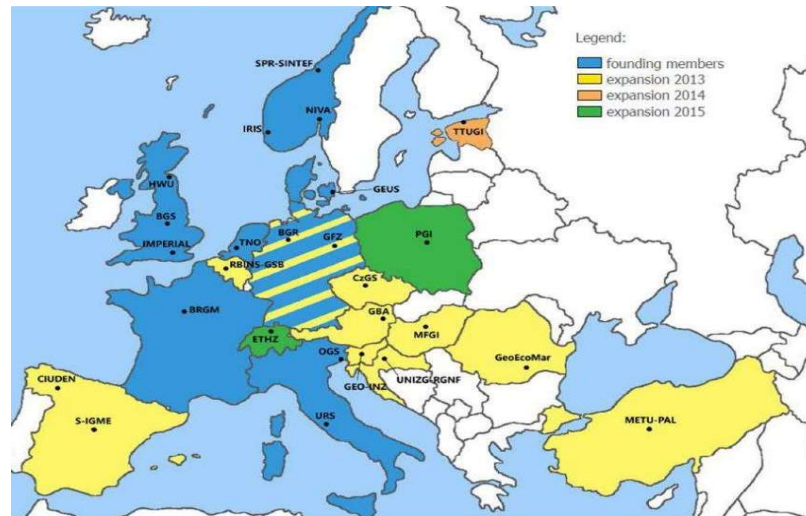


Figura 18 Países de la unión europea pertenecientes al proyecto CO2GeoNet. Tomado de Czernichowski-Lauriol et al., (2017).

2.8.5 North American Carbon Storage Atlas (NACSA)

NACSA es una colaboración entre Canadá, Estados Unidos y México para mapear y evaluar el potencial de almacenamiento de CO₂ en América del Norte. El atlas proporciona una evaluación comprensiva de las formaciones geológicas adecuadas para el almacenamiento de CO₂ en la región (Figura 19)⁵². La participación internacional incluyó la colaboración de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos y México, así como de diversas agencias e instituciones de investigación como el *National Energy Technology Laboratory* (NETL) de EE. UU. De esta manera NACSA facilita la planificación y el desarrollo de proyectos CCUS en América del Norte al proporcionar datos detallados sobre la capacidad de almacenamiento CO₂, promoviendo la

⁵¹Czernichowski-Lauriol, I., Berenblyum, R., Bigi, S., Car, M., Liebscher, A., Persoglia, S., Wildenborg, T. (2017). CO2GeoNet Perspective on CO₂ Capture and Storage: A Vital Technology for Completing the Climate Change Mitigation Portfolio. *Energy Procedia*, 114, 7480–7491. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.188

⁵²Bachu, S., et al., (2012). North American Carbon Storage Atlas: A Foundation for Carbon Capture, Utilization, and Storage Deployment. *Energy Procedia*, 37, 5656-5662. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.497

cooperación transfronteriza.

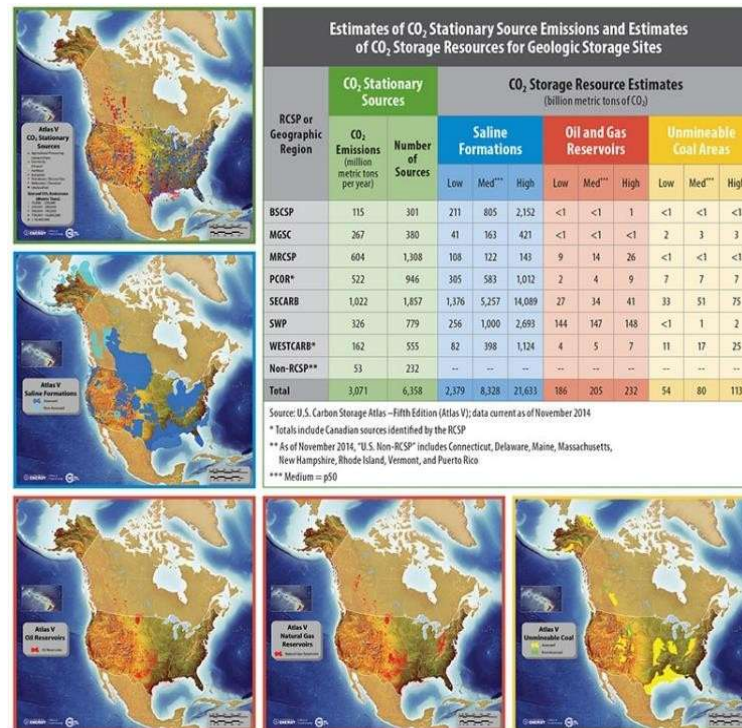


Figura. 19 North American Carbon Storage Atlas (NACSA) estima en la capacidad de almacenamiento geológico de CO₂ en diferentes reservorios. Tomado de NACSA (2012).

2.8.6 Proyecto Petrobras CCS

Petrobras, la empresa petrolera estatal de Brasil, ha desarrollado proyectos de captura y almacenamiento de CO₂ como parte de sus operaciones de producción de petróleo en campos *offshore*, en colaboración con empresas tecnológicas internacionales. Debido a su carácter piloto, este proyecto ha contribuido a reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de petróleo y ha mejorado la eficiencia de la recuperación mejorada de petróleo (EOR) mediante la inyección de CO₂⁵³ (Figura 20).

⁵³ Hatimondi, S. A., Musse, A. P. S., Melo, C. L., Dino, R., & Moreira, A. C. A. (2011). Initiatives in Carbon Capture and Storage at PETROBRAS Research and Development Center. *Energy Procedia*, 4, 6099-6103. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.616x>

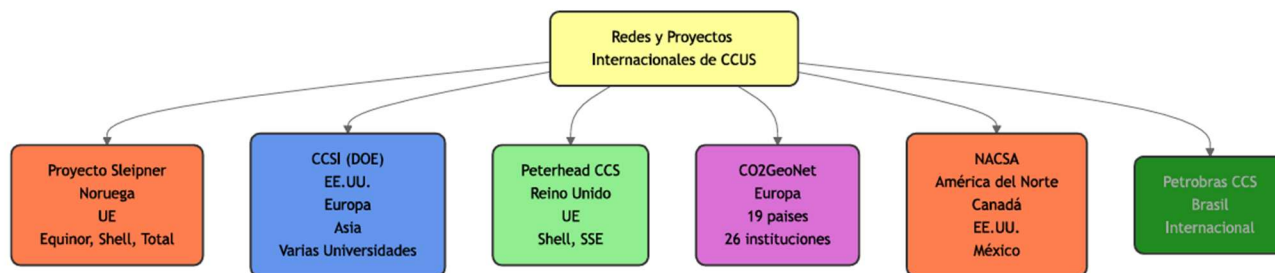


Figura 20. Proyectos y redes que demuestran la importancia de la colaboración internacional en el avance de las tecnologías CCUS, con transferencia de conocimientos, la mitigación de riesgos y el desarrollo de infraestructuras compartidas esenciales para cumplir con los objetivos globales de reducción de emisiones de carbono. Elaboración propia.

III. Política Pública

3.1 Construcción de política pública

Aunque ha habido esfuerzos para estudiar y explicar a detalle las implicaciones que tiene el desarrollo de nuevos métodos, es inevitable que surjan problemáticas con respecto a la cantidad y calidad de procesos que están implícitos. Acelerar este entendimiento a través del despliegue de políticas públicas creará las condiciones óptimas que sean reconocibles, desde el aula, en los centros de educación superior, continuando por la industria y finalmente manifestándose en las oficinas gubernamentales.⁵⁴

Las crisis económico-financieras profundas y recurrentes, así como los problemas ecológicos, el frágil y desigual desarrollo de la democracia en muchos países, merman el avance científico de este tipo de proyectos. Por lo tanto, es preciso crear **una nueva visión sobre el desarrollo y administración del estado que toma las decisiones** e identificar los diversos factores que favorecen o limitan a este. Así pues, la gestión del desarrollo debe basarse en referentes claros sobre aspectos clave que influyen en el progreso y en las políticas públicas que se deben mejorar, crear e implementar.⁵⁵

¿Por qué debemos entonces formular y diseñar políticas públicas desde una perspectiva de diseño de ingeniería?

Pensemos en que la ciencia busca estudiar un fenómeno utilizando métodos científicos

⁵⁴ International agency of energy (2023). CCUS policies and business models: Building a commercial market. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/ccus-policies-and-business-models_6ef05538-en.html

⁵⁵ Whetsell, T. A., Jonkers, K., Dimand, A.-M., Baas, J., & Wagner, C. S. (2019). Democracy, Complexity, and Science: Exploring Structural Sources of National Scientific Performance. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.04468>

para analizar regularidades y relaciones causales, con el fin de explicarlo en una teoría. La ingeniería, por su parte, propone la transformación de un entorno y siempre está en constante desarrollo basada en la premisa de que todo puede ser mejor, piensa en cómo las cosas deberían ser, en lugar de solo explicar cómo son. Para resumir, la ingeniería espera transformar la realidad desde un sistema social.

El enfoque científico en el diseño de políticas públicas puede generar dificultades, ya que la ciencia busca comprender fenómenos de manera universal y objetiva,⁵⁶ mientras que las políticas públicas deben abordar problemas concretos en contextos específicos, dado que la ciencia se enfoca en explicar fenómenos de forma sistemática, diseñar políticas basándose solo en este último puede ser problemático. En lugar de solo explicar un fenómeno, las políticas públicas deben enfocarse en solucionarlo. Si bien la ciencia puede aportar teorías y recomendaciones para la acción esto no siempre tiene un resultado positivo, por lo que la legislación de políticas públicas también entra en un proceso iterativo, entre científicos y administradores públicos.⁵⁷

3.2 Programas educativos en universidades y centros de formación técnica

La implementación, desarrollo, difusión y análisis de CCUS requiere la formación de profesionales capacitados que reconozcan actualizaciones sobre el avance de estas tecnologías y prácticas, ya que, al ser un campo interdisciplinario entran al juego varias materias como: ingeniería, geología, química, políticas públicas y economía. Colombia puede reestructurar y desarrollar programas educativos especializados, con el fin de preparar a los estudiantes para enfrentar los desafíos técnicos y estratégicos de este campo, especialmente en un contexto donde hay recientes responsabilidades globales para la reducción de emisiones y la adopción de tecnologías para emisiones negativas. Cabe señalar que deben realizarse las consultas correspondientes con la dependencia responsable de la educación (ministerio de educación nacional) para validar la pertinencia de lo anterior.

⁵⁶ Nariño. A (2017). *Diseño de políticas públicas e ingeniería de sistemas sociales: políticas públicas como artefactos de diseño de ingeniería*. *Revista de Ingeniería*, (45), 52-61. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/feb73f57-4407-442b-a2f3-a071ff508705>

⁵⁷ Science. (2017). *The science–policy interface: The place of scientific evidence in public policymaking*. *Science*, 355(6320), 145–146. <https://doi.org/10.1126/science.aai8837>

La investigación dentro de los planes de estudio debe entenderse como la actividad dirigida a la búsqueda, producción y generación de conocimiento y al desarrollo de la capacidad crítica y argumentativa que posibilita la actualización y contextualización de los conocimientos impartidos, compartidos, discutidos y actualizados en el proceso enseñanza aprendizaje, capaz de dar respuesta a los retos de la época y los problemas venideros.

La adecuación o creación de nuevos planes de estudio en disciplinas emergentes, junto con el desarrollo de programas académicos coordinados con becas en el extranjero, representa una estrategia clave para fortalecer tanto a la comunidad académica como a la industria nacional. Estos esfuerzos deben orientarse a alinear la formación profesional con las demandas de una sociedad contemporánea enfrentada a desafíos complejos como la gestión sostenible de recursos naturales, el cambio climático, los impactos de la inteligencia artificial y la transformación de los hábitos de consumo. En muchas instituciones de educación superior los contenidos curriculares se mantengan prácticamente sin cambios desde hace décadas, lo que limita la capacidad de los futuros profesionales para responder a los retos actuales y emergentes. En Colombia, aunque no se identifican programas de pregrado o maestrías dedicados exclusivamente a tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), existe una oferta formativa en posgrados y educación continua relacionada con transición energética y descarbonización en la Universidad Industrial de Santander, Universidad de Norte y en la Universidad Nacional de Colombia, que se enfocan en transición energética, desarrollo sostenible y cambio climático.⁵⁸

Como un ejemplo de una iniciativa en educación tecnológica encargada en brindar experiencia inmersiva existen programas como RECS* (*Research Experience in Carbon Sequestration*) que es patrocinado por el Departamento de Energía de los EE. UU. y proporcionan una interacción educativa y de entrenamiento intensivo para jóvenes interesados en CCUS.

* **RECS sigue vigente y activo: el programa se encuentra en su 20.ª edición, denominada RECS 2024, la cual se llevó a cabo del 21 al 30 de julio 2024 en Colorado y Wyoming, patrocinado por el Departamento de Energía de EE. UU. (Office of Fossil Energy & Carbon Management) y el NETL (National Energy Technology Laboratory).**

⁵⁸ Gregersen Hermans, j. (2021). *toward a curriculum for the future: synthesizing education for sustainable development and internationalization of the curriculum. journal of studies in international education.* <https://doi.org/10.1177/10283153211031033>

Las reformas educativas⁵⁹ han seguido trayectorias distintas según las necesidades y contextos sociopolíticos de cada región; sin embargo, comparten un objetivo común, esto es, contribuir al bienestar social y fortalecer la capacidad de las naciones para enfrentar sus desafíos. Aunque las universidades que han desarrollado ofertas académicas en, desarrollo sostenible, energías renovables, transición energética, hidrógeno y tecnologías de descarbonización (incluyendo CCUS) se encuentran en países con condiciones diferentes a las de Colombia, ello no resta valor a la iniciativa de adaptar o crear nuevos planes de estudio en el contexto nacional. Por el contrario, estas experiencias internacionales pueden ofrecer referentes útiles para anticipar las necesidades futuras y orientar la formación profesional hacia una visión más integral y prospectiva como lo resumen las siguientes tablas (Tabla 11-14).

Tabla 11. Ejemplos de programas académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de América del Norte. Elaboración propia con datos de Universidades

Continente	Universidad	País	Programa	Plan de Estudios
América del Norte	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	Estados Unidos	Master of Engineering in Energy Studies (ME)	Su plan de estudios comprende introducción a la energía, economía de la energía, tecnologías de energía sostenible. La especialización en CCUS incluye cursos específicos sobre captura de carbono, almacenamiento geológico de CO ₂ , tecnologías avanzadas de CCUS. Los estudiantes trabajan en proyectos de investigación relacionados con CCUS y pueden colaborar con el MIT Energy Initiative ⁶⁰
América del Norte	University of Calgary	Canadá	Bachelor of Science in Chemical Engineering with a specialization in environment.	El programa aborda termodinámica, cinética química, diseño de reactores, mientras que la especialización considera captura de carbono, gestión de emisiones industriales, tecnologías de almacenamiento de CO ₂ . Experiencia Práctica: Proyectos de diseño y prácticas en la industria.

⁵⁹ Gouédard, Pierre & Pont, Beatriz & Hyttinen, Susan & Huang, Pinhsuan. (2020). Curriculum reform: A literature review to support effective implementation. 10.1787/efe8a48c-en.

⁶⁰ <https://pangea.stanford.edu/departments/ere>

Tabla 12. Ejemplos de programas académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de Europa. Elaboración propia con datos de Universidades

Continente	Universidad	País	Programa	Plan de Estudios
Europa	Imperial College London	Reino Unido	MSc in Sustainable Energy Futures	Los módulos básicos comprenden energía y medio ambiente, tecnologías de energía renovable, economía de la energía. Módulos de Especialización en CCUS: Ingeniería de captura de carbono, almacenamiento de CO ₂ , evaluación de ciclos de vida de tecnologías de CCUS y los proyectos de Investigación
Europa	Norwegian University of Science and Technology (NTNU)	Noruega	MSc in Carbon Capture and Storage	Cursos Fundamentales: Ingeniería de procesos, termodinámica avanzada, modelado y simulación. Especialización en CCUS: Tecnologías de captura de carbono, transporte de CO ₂ , almacenamiento geológico de CO ₂ y la Investigación aplicada en colaboración con la industria y centros de investigación.

Tabla 13. Ejemplos de programas académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de América Latina. Elaboración Propia con datos de Universidades.

Continente	Universidad	País	Programa	Plan de Estudios
América Latina	Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)	México	Ingeniería en Energías Renovables y Programas de posgrado como el de Exploración y explotación en recursos naturales.	Energías renovables, eficiencia energética, análisis de sistemas energéticos. Módulos en CCUS: Tecnologías de captura de carbono, almacenamiento de CO ₂ , gestión de emisiones industriales. Prácticas Profesionales: Colaboraciones con la industria y proyectos de investigación en energías renovables y CCUS.

Continente	Universidad	País	Programa	Plan de Estudios
América Latina	Universidade de São Paulo (USP)	Brasil	Programa de Pós-Graduaos em Engenharia de Petróleo	Ingeniería de petróleo, geología del petróleo, técnicas de perforación. Módulos en CCUS: Recuperación mejorada de petróleo mediante inyección de CO ₂ , tecnologías de captura de carbono. Proyectos de Investigación: Trabajo de tesis y proyectos en colaboración con la industria petrolera y los centros de investigación.

Tabla 14. Ejemplos de programas s académicos relacionados con tecnologías de energía y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en dos universidades de Oceanía. Elaboración Propia con datos de Universidades.

Continente	Universidad	País	Programa	Plan de Estudios
Oceanía	University of Melbourne	Australia	Master of Energy Systems	Análisis de sistemas energéticos, políticas energéticas, economía de la energía. Módulos en CCUS: Tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, modelado de sistemas de energía sostenible. Proyecto de investigación aplicado en colaboración con la industria energética.
Oceanía	University of Adelaide	Australia	Master of Petroleum Engineering.	Fundamentos: Ingeniería de yacimientos, producción de petróleo y gas, geomecánica. Módulos en CCUS: Captura y almacenamiento de carbono, técnicas avanzadas de producción de petróleo. Investigación y Prácticas: Proyectos de investigación en CCUS y prácticas en la industria petrolera.

3.3 Divulgación y Participación Pública

La participación pública, la difusión sobre el cambio climático y las estrategias implementadas en Colombia enfrentan problemas de visibilidad, debido a que los planes presentados por el Ministerio de Medio Ambiente parecen no avanzar más allá de la fase escrita. Esto genera incertidumbre, especialmente porque el plan E2050 no contempla la implementación de CCUS para reducir gases de efecto invernadero. Aunque la

tecnología CCUS existe desde hace varias décadas, su difusión ha sido limitada y es conocida principalmente en círculos especializados.

A nivel global, la creación del IPCC y la UNFCCC en la década de los 1990 impulsó a la comunidad científica a desarrollar proyectos de CCUS. Sin embargo, como mencionan Mota et al.,⁶¹ la mayor parte de la información está en idioma inglés lo que dificulta el acceso en América Latina. Solo España y Brasil han realizado acciones a escalas piloto y demostrativas; Brasil dentro de América Latina y con España como hablante del idioma español.

Para que los planes de reducción de gases de efecto invernadero sean aceptados e integrados a estrategias locales o nacionales, es necesario que las entidades participantes estén bien informadas y haya condiciones adecuadas para la **colaboración y el acceso a la información**. En países de habla hispana como México, la Plataforma Mexicana de Captura y Almacenamiento de Carbono⁶² (MeCCS) se creó para abordar la falta de información en español y mejorar la comunicación entre las entidades correspondientes; otro ejemplo similar es la plataforma española PTECO2⁶³, que cuenta con la información necesaria para difusión en el país europeo, sin embargo, ha señalado que existe la falta de una estrategia de captura de CO₂ en España siendo este el único país de la UE que no cuenta con un plan de acción referente.

Otro tipo de campañas exitosas ha sido el *Global CCS Institute*⁶⁴ y el Proyecto Tomakomai⁶⁵ en Japón que han desarrollado materiales educativos bilingües para involucrar a las comunidades locales y tener una población activa (Figura 21).

⁶¹ Mota, N., Sánchez, J., & López, M. (2023). *The Mexican Carbon Capture and Storage Platform: Construction of a boundary object for bridging the gaps between contexts, actors, and disciplines* ("The Mexican Carbon Capture and Storage Platform - ScienceDirect")

⁶² MECCS México. (s.f.). Inicio. MECCS México. <https://meccs.org.mx/es/>

⁶³ Plataforma Tecnológica Española de CO₂. (s.f.). Inicio. PTECO2. <https://www.pteco2.es/es>

⁶⁴ CO2Degrees. (s.f.) Home. CO2Degrees. <https://co2degrees.com/>

⁶⁵ Japan CCS Co., Ltd. (s.f.). Kids. Japan CCS. <https://www.japanccs.com/en/kids/>

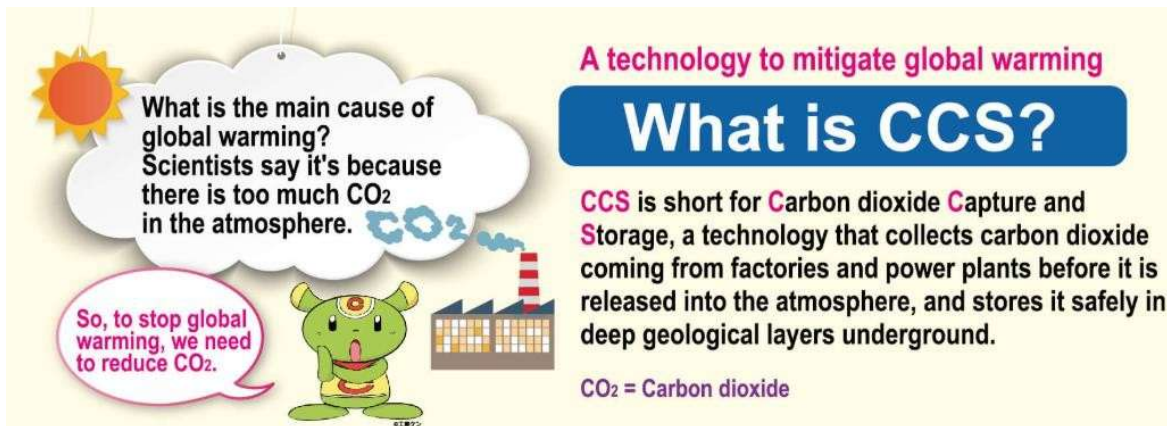


Figura. 21 Japón aprovecha sus recursos audiovisuales para generar conciencia en sobre el cambio climático y las estrategias de mitigación y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Imagen tomada de: <https://www.japanccs.com/en/kids/> (2024).

La experiencia de México en la implementación de CCUS ha evidenciado desafíos tanto en la asimilación tecnológica como en el diseño e implementación de políticas públicas adecuada. Los obstáculos identificados es la falta de articulación entre el conocimiento técnico desarrollado por el sector académico e industrial y la comprensión oportuna por parte de los tomadores de decisiones. Esta desconexión entre ingeniería y gobernanza genera vacíos institucionales que limitan la adopción efectiva de estas tecnologías y su integración en estrategias nacionales de mitigación del cambio climático.

Mota et al., (2023) abordan esta problemática a través de un concepto llamado "objetos límite", esta metodología sugiere a estos "objetos" como medios para reconciliar puntos de vista divergentes entre comunidades contrastantes (por ejemplo, científicos y no científicos, gobiernos, industrias y sociedad).

3.4 Campañas de sensibilización y educación

Para asegurar que una comunidad esté informada sobre la implementación de un proyecto CCUS y comprenda su relevancia, hay que evaluar su nivel de conocimiento, percepción y aceptación de estas tecnologías. Según Sitinjak⁶⁶ et al., (2023), esto se logra mediante estudios estadísticos basados en preguntas clave que exploren cuánto sabe el público sobre CCUS, cómo percibe estas tecnologías, y qué factores determinan su disposición a adoptarlas. La participación pública es importante pues está participación

⁶⁶ Sitinjak, C., Ebennezer, S., & Ober, J. (2023). Exploring Public Attitudes and Acceptance of CCUS Technologies in JABODETABEK: A Cross-Sectional Study. *Energies*, 16(10), 4026. <https://doi.org/10.3390/en16104026>

debe tener repercusiones en decisiones de inversión y ubicación, especialmente en países en proceso de adopción, investigación y desarrollo reciente, desarrollo de políticas y desarrollo económico.

3.5 Transparencia y acceso a la información

Una percepción pública positiva facilita la implementación y financiación de proyectos CCUS al aumentar la aceptación, confianza y apoyo de la población. Se agrega una cadena de valor pues a su vez se impulsa la inversión y la demanda del mercado para productos derivados del CO₂ mejorando su aprobación económica y ayuda a superar la oposición y las barreras regulatorias que traen consigo las aplicaciones de ingeniería especializada.

Para mantener una percepción pública favorable hacia el CCUS, se necesita una comunicación clara, equilibrada y continua. Esto implica explicar tanto los beneficios como los riesgos adquiridos, de forma transparente, para generar confianza y combatir la desinformación. Además, involucrar a todas las partes interesadas mediante la educación y la participación mediante el diálogo constante y considerar diversas perspectivas para fortalecer el respaldo social a largo plazo. Así, este enfoque general en la percepción pública es concluyente para influir en las decisiones políticas y promover el desarrollo de marcos regulatorios favorables para CCUS.

La participación comunitaria no es un concepto nuevo para la industria de cualquier tipo y definitivamente no debería serlo para la industria de transición energética, la percepción de la participación pública ha cambiado significativamente en la última década para ser más inclusiva, receptiva y sólida. Los grandes proyectos en donde existe una infraestructura robusta han aportado experiencia sobre la importancia de lograr una participación pública adecuada en las primeras etapas de un proyecto. El riesgo de no comprometerse con la comunidad local y el público en general puede derivar en retrasos en los proyectos, o incluso cancelaciones. A continuación, se muestran los factores esenciales de la participación que establecen la estrategia/orientación, la supervisión, la toma de decisiones y el intercambio de información. La intersección de la política y las leyes/regulaciones para impulsar el impacto con las comunicaciones al público sobre un proyecto puede constituir los elementos del compromiso.

IV. Planeación y Ejecución

Para el CIAT, la implementación de las tecnologías CCUS en Colombia debe analizar desde diversos criterios (Figura 22). Algunos de estos ejemplos son: la necesidad de aplicar la tecnología, el potencial máximo de mitigación, la cantidad de información disponible a nivel local, costos de la tecnología comparado con otras tecnologías, estado de la regulación sobre el tema y trayectoria de la tecnología a nivel mundial, a cada uno de estos rubros se le agrega un valor según su grado de importancia.

Criterios	Valor
Necesidad de aplicar la tecnología	3
Potencial máximo de mitigación	3
Disponibilidad de información a nivel nacional	2
Costos relativos de las tecnologías CCUS	1
Desarrollo de regulación en la temática	1
Trayectoria de la tecnología a nivel mundial	2

Figura 22. Importancia cualitativa de los criterios a seleccionar para la encaminación del desarrollo CCUS en Colombia. Tomado de CIAT (2021).

La planeación requiere en primera instancia reconocer la ubicación y el tamaño de las fuentes estacionarias de emisiones de GEI y las formaciones geológicas y pozos petroleros en desusó con mayor potencial de almacenamiento.⁵³

Bachu et al., citan al informe internacional del G8-AIE-CSLF que declara, “Los gobiernos deberían establecer urgentemente una evaluación primaria de las cuencas sedimentarias prospectivas utilizando una metodología adecuada de estimación de la capacidad de almacenamiento de CO₂, incluida la correspondencia entre fuentes y sumideros” (Figura 23). Los yacimientos de petróleo y gas se consideran lugares ideales para el almacenamiento de CO₂ porque han mantenido hidrocarburos atrapados de forma segura durante miles o millones de años, a esto sumemos que las propiedades y la estructura de estos yacimientos son bien conocidas gracias a las actividades de exploración y producción previas. Para tener el concepto en mente, la estimación de la capacidad de almacenamiento de CO₂ en estos sitios se basa en las características propias del yacimiento, como la presión, temperatura y volumen efectivo, así como en los recursos originales (petróleo o gas) y el factor de recuperación.

Para su almacenamiento también se tienen en cuenta las propiedades del CO₂ una vez

almacenado. A continuación, se presenta una visión sobre pautas a considerar para el apartado de estimación de capacidad de almacenamiento de CO₂.

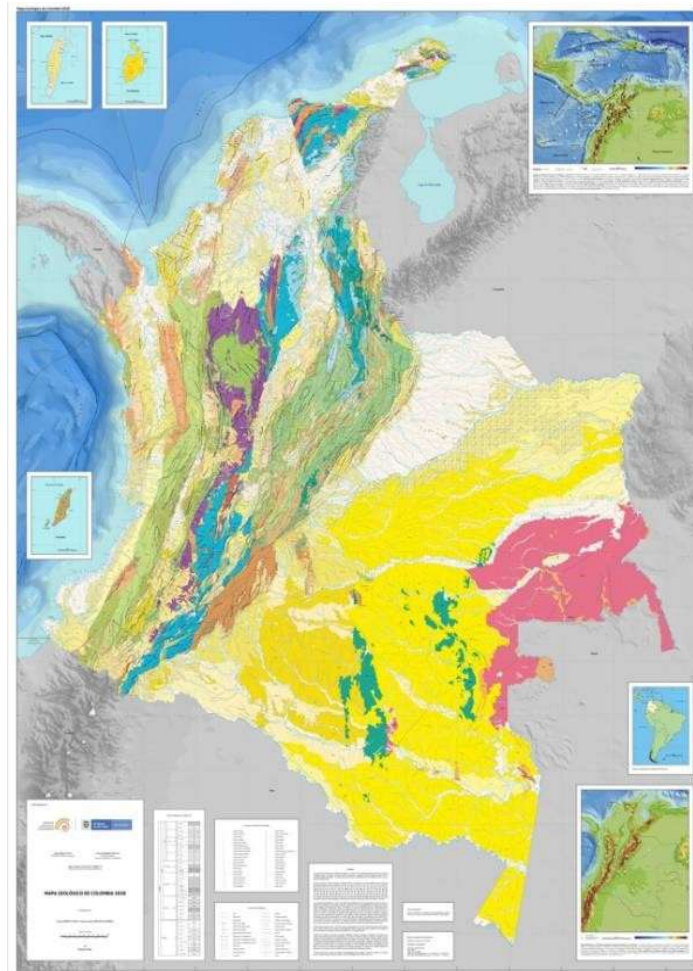


Figura 23. Provincias fisiográficas de Colombia. La geología colombiana se caracteriza por su diversidad estructural, tectónica y de recursos naturales. Su compleja historia geológica ha dado lugar a una riqueza en hidrocarburos, minerales y suelos fértiles. El conocimiento geológico sigue siendo clave para la exploración sostenible de sus recursos y la gestión de desastres naturales. Tomado de Servicio Geológico Colombiano (2023).

4.1 Estudio de sumideros y estimación de capacidad de almacenamiento

Una vez seleccionados los sitios se lleva a cabo la inyección del CO₂ y este es almacenado en un sumidero. Este GEI puede ser retenido en profundidad a través de varios procesos (Tabla 15).⁶⁷

Tabla 15. Tipos de Almacenamiento Geológico de CO₂: Mecanismos y Características. Modificado de Cavanagh et al., (2015).

⁶⁷ Cavanagh, A., & van der Meer, L. (2015). Algorithms for CO₂ Storage Capacity Estimation: Review and Case Study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 180-188.

Tipo de Almacenamiento	Descripción
Atrapamiento estructural/estratigráfico	Confinado por trampas estructurales o estratigráficas como un fluido supercrítico libre y flotante.
Atrapamiento residual	Retenidos en el espacio de poros por fuerzas capilares a una saturación de gas irreducible.
Captura de solubilidad	Disueltos en agua de formación y/o petróleo crudo.
Mineralización	Incorporados a los minerales recién formados como resultado de la interconexión entre el agua, el CO ₂ y la roca.

Los procesos mencionados anteriormente pueden ocurrir en distintos periodos de tiempo, desde de manera instantánea hasta miles de años. La evaluación de la capacidad de almacenamiento es necesaria para cuantificar los recursos necesarios y cómo se mencionó anteriormente, la ausencia de una metodología estándar para esta evaluación y cuantificación dificulta el estudio preciso de los sitios de almacenamiento, ya que algunas metodologías operan a escalas diferentes (Tabla 16).

Tabla 16. Métodos de cálculo de almacenamiento de CO₂ según el sitio de almacenamiento. Tomado de Cavanagh et al., (2015).

Reservoir	Method	Trap	Equation	Storage efficiency
Oil	CSLF	Structural/stratigraphic	$G_i = \rho_{CO_2} \left[\frac{R_f \cdot OGIP}{B_i} - V_{iw} + V_{pw} \right]$	$C = C_m C_b C_w C_a$
Gas	CSLF	Structural/stratigraphic	$G_i = \rho_{CO_2} R_f (1 - F_{IG}) OGIP \left[\frac{P_i Z_i T_i}{P_s Z_s T_s} \right]$	
Oil and gas	CSLF	Structural/stratigraphic	$G_i = \rho_{CO_2} [R_i A h \phi (1 - S_w) - V_{wi} + V_{pw}]$	
Oil and gas	USDOE	Structural/stratigraphic	$G_e = A h \phi (1 - S_w) B_f \rho_{CO_2, sd} E$	Based on CO ₂ -EOR or EGR experience
Gas	IEA	Structural/stratigraphic	$G_e = URR_{gas, std} B_f \rho_{CO_2} E$	EGR derived values
Coal	CSLF	Structural/stratigraphic	$G_e = \rho_{CO_2, std} I G I P R_f C'$	Not defined
Coal	USDOE	Structural/stratigraphic	$G_e = A h C \rho_{CO_2, sd} E$	$E = \left(\frac{E_{w1}}{I_{w1}} \times \frac{E_{w2}}{I_{w2}} \right) \left(\frac{E_A E_V E_G E_D}{I_{he}} \right)$
Saline aquifer	CSLF	Structural/stratigraphic	$G_e = A h \phi \rho_{CO_2} (1 - S_{wir}) C_c$	Not defined
	CSLF	Solubility	$G_e = A h \phi (\rho_{w, a} X_a^{CO_2} - \rho_{w, o} X_o^{CO_2}) C$	
	USDOE	Residual/stratigraphic	$G_i = \Delta V_{trap} \rho_{CO_2} \phi S_{CO_2, trap}$	
	USDOE	Structural/stratigraphic	$G_e = A h \phi \rho_{CO_2} E$	$E = \left(\frac{E_{w1}}{I_{w1}} \times \frac{E_{w2}}{I_{w2}} \right) \left(\frac{E_A E_V E_G E_D}{I_{he}} \right)$
	USGS	Buoyant and residual	$G_{tech} = \rho_{CO_2} V_{th} E_b + \sum_{i=1}^3 [\rho_g (A H \phi - V_b) R_i R_w E_r]$	$E_r = \frac{(S_{CO_2, res} (1 - S_{wir}))^2}{0.94 + 0.49}$

	Zhou et al.	Compressibility	$G_i(t_i) = Ah\phi\rho_{CO_2}E$	$E = (\beta_p + \beta_w)\Delta P_{max}$
Zhao et al. Saline acuífer	Adsorption, solubility and displacement		$G_t = \left(\frac{0.13 \times Ah\phi_{in}G_iR_iER\rho_{CO_2,sd}}{10^6} \right) + [Ah\phi(1 - S_w)(1 - R_w)m_{CO_2,water}] + (Ah\phi S_w R_w \rho_{CO_2})$	Derived by a numerical simulation method

A continuación, se describen los algoritmos antes mencionados⁶⁷.

CSLF: Metodología internacional (Carbon Sequestration Leadership Forum) que estima capacidad teórica y efectiva considerando solo trampas estructurales/estratigráficas en acuíferos salinos, reservorios deplecionados (depleted reservoir) y carbón muestra un enfoque volumétrico conservador y estandarizado para comparaciones globales.

USDOE: Método del Departamento de Energía de EE. UU. (NETL) volumétrico a escala regional/nacional, considera todo el volumen del acuífero (no solo trampas), aplica eficiencia baja (P50 ~2–4% en salinos), usa Monte Carlo para incertidumbre; base de los Carbon Storage Atlase y herramienta CO₂-SCREEN.

IEA: Enfoque del International Energy Agency que integra lecciones de proyectos reales (EOR/EGR); define fases progresivas (teórica, efectiva, práctica, matched); promueve armonización global y capacidad accesible basada en experiencia operativa.

USGS: Metodología probabilística (Monte Carlo) del U.S. Geological Survey; separa atrapamiento buoyant (estructural/estratigráfico) y residual (capilar en todo el volumen); muy rigurosa para cuantificar incertidumbre geológica en acuíferos salinos a escala nacional o regional.

Zhou et al: Método analítico rápido (Zhou et al., 2008) para acuíferos salinos cerrados o semi-cerrados; basado en balance de masa y compresibilidad del sistema (agua + roca + CO₂); estima capacidad limitada por presión máxima permisible, ideal para screening rápido donde hay límites hidráulicos.

Los métodos para evaluar la capacidad de almacenamiento de CO₂ en distintos tipos de yacimientos se dividen en métodos estáticos y dinámicos. Los métodos estáticos utilizan aproximaciones volumétricas con algoritmos para estimar la capacidad de almacenamiento, mientras que los métodos dinámicos implican simulaciones analíticas y numéricas que predicen cómo se comportará el CO₂ inyectado en el tiempo.

Para realizar estas evaluaciones, es importante definir las condiciones de contorno del yacimiento. En sistemas abiertos, el fluido de formación puede moverse lateral o verticalmente, dejando espacio en los poros para el CO₂. En cambio, en sistemas cerrados o semicerrados, el movimiento de los fluidos está restringido por los límites impermeables de la formación, y la capacidad de almacenamiento depende más de la compresibilidad de la salmuera y las rocas, lo que provoca un aumento de la presión, Sánchez de la Vega y Dávila, presentan la revisión de una metodología para estimar la capacidad de almacenamiento de CO₂ en campos maduros, el objetivo es integrar esta tecnología en la evaluación del sitio y también optimizar su uso en operaciones de recuperación mejorada de petróleo (EOR).⁶⁸

La metodología de cálculo volumétrico revisada se basa en los datos de producción petrolera y en las características del yacimiento, los volúmenes de hidrocarburos extraídos se convierten a volúmenes equivalentes de almacenamiento de CO₂ bajo las condiciones de presión y temperatura del yacimiento. En esencia, se plantea la hipótesis de que el espacio poroso previamente ocupado por los hidrocarburos producidos puede ser reutilizado para la inyección y almacenamiento seguro de CO₂ (Figura 24).

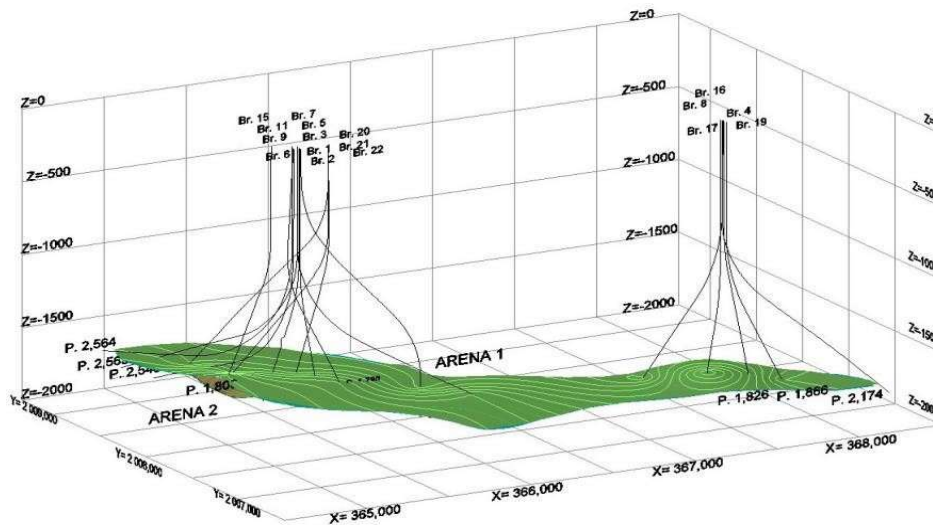


Figura 24. Comportamiento de la inyección de CO₂ para la aplicación de la tecnología EOR. Tomado de Sánchez de la Vega et al., (2024).

Como se indicó en el capítulo 1, los yacimientos petroleros agotados constituyen una opción

⁶⁸ Sánchez de la Vega, A., & Dávila, M. (2024). Methodology to estimate the geological storage capacity of CO₂ in mature hydrocarbon fields. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 76 (1) / A201223 / 2024 /.

prioritaria para el almacenamiento de CO₂ gracias a la disponibilidad de datos previos, infraestructura existente y beneficios económicos potenciales asociados a la recuperación mejorada de hidrocarburos. Sin embargo, su uso requiere en todo caso una caracterización integral del sitio y la adaptación específica de los protocolos de inyección, contención y monitoreo a las condiciones geológicas locales (Tabla 17)⁶⁷.

Tabla 17. Comparativa de métodos de almacenamiento de CO₂: ventajas, desafíos, proyectos de referencia y disponibilidad de datos. Tomado de Cavanagh et al., (2015).

Tipo de Almacenamiento	Ventajas	Desafíos	Ejemplo de Proyecto	Disponibilidad de Datos
Yacimientos de petróleo y gas agotados	Capacidad de almacenamiento global de 140 Gt y 40 Gt para campos de gas y petróleo, respectivamente. Las características de los yacimientos son bien conocidas. Se puede utilizar la infraestructura existente de pozos y tuberías. Contención comprobada a lo largo del tiempo geológico.	Preocupación por pozos con fugas o mal abandonados, lo que representa una amenaza de seguridad. Hoy en día, hay muy pocos yacimientos agotados disponibles.	Proyecto CO2CRC Otway	Buena
Acuíferos salinos	Mayor capacidad potencial de almacenamiento de CO ₂ (1,000 – 100,000 Gt). El CO ₂ almacenado se espera que permanezca aislado de la superficie durante miles de años. Presencia generalizada en gran parte del mundo. Los acuíferos en alta mar eliminan la mayoría de las preocupaciones de seguridad.	Falta de experiencia en caracterización. Ausencia de incentivos financieros.	In Salah Gas Project, Argelia Sleipner Project, Noruega Gorgon Project, Australia US DOE <i>Programa de asociaciones regionales de secuestro de carbono, Ketzin, Alemania</i>	Buena - en progreso
Recuperación mejorada de petróleo (EOR)	Producción de Petróleo incremental, económicamente atractivo. Inyección de CO ₂ en escala comercial en la actualidad. No hay riesgos indebidos para los humanos o el medio ambiente.	Podría ser más barato obtener CO ₂ de fuentes naturales. La capacidad de almacenamiento global puede ser limitada.	Weyburn, Wasson (Denver) Wasson (ODC) SACROC Salt Creek	Excelente

Almacenamiento en lechos de carbón	El metano (CH ₄), subproducto de la inyección de CO ₂ en mantos de carbón (ECBM, <i>Enhanced Coal Bed Methane</i>), hace que esta opción sea económicamente atractiva, ya que el gas natural recuperado puede comercializarse, compensando costos operativos. Además, los depósitos de carbón están presentes en todo el mundo, lo que ofrece oportunidades geográficamente diversificadas para proyectos de almacenamiento con valorización energética.	Los mantos de carbón no explotables pueden encontrarse a cientos de metros de profundidad, lo que los hace menos permeables y limita la capacidad de almacenamiento de CO ₂ .	Qinshui Basin Recopal Alberta ECBM	Limitada
------------------------------------	--	--	---	----------

Para realizar la estimación de la capacidad de sitios de almacenamiento, Colombia creó un “plan estratégico de conocimiento geocientífico y nuclear 2023-2032” y ha proyectado realizar un estudio titulado “Caracterización y análisis integral de factibilidad de futuros desarrollos de almacenamientos subterráneos para CO₂ en estructuras geológicas”. Es una estrategia orientada a evaluar la accesibilidad técnica, económica, ambiental y social de utilizar formaciones geológicas profundas como sitios seguros para el almacenamiento de GEI. ⁶⁹

Su propósito es generar información confiable y detallada que permita identificar, caracterizar y priorizar áreas del subsuelo con potencial para albergar CO₂ de forma permanente y segura. Para ello, contempla la integración de datos geológicos, hidrogeológicos, geoquímicos y geomecánicos, el análisis de riesgos y la modelación del comportamiento del CO₂ inyectado a largo plazo.

Esta labor técnica-científica se complementa con la definición de un marco normativo y regulatorio liderado por el Ministerio de Minas y Energía y comunicará los criterios que deberán seguir las entidades competentes para definir los requisitos y condiciones técnicas asociadas al almacenamiento subterráneo de CO₂.

Dicho marco incluirá disposiciones para todos los sectores de la economía, promoviendo un desarrollo responsable, regulado y alineado con las metas nacionales de

⁶⁹ Servicio Geológico Colombiano. (2023). *Plan estratégico de conocimiento geocientífico y nuclear 2023–2032*. Bogotá, Colombia. <https://www.sgc.gov.co>

descarbonización y transición energética.

4.2 Estrategia de caracterización del subsuelo para CCUS Ecopetrol

El **Centro de Innovación y Tecnología (ICP)** lidera estudios, investigaciones y desarrollos tecnológicos dirigidos a apoyar las metas de descarbonización de Ecopetrol, dado su rol estratégico en la industria energética colombiana, Ecopetrol cuenta con la capacidad técnica, financiera e institucional para posicionar el CCUS como una estrategia nacional de mitigación climática, la cual podría ser replicada o adaptada por otros sectores industriales de alto impacto ambiental, como el cemento, el acero, y la generación térmica. El ICP ha definido un portafolio tecnológico (Figura 25) que incluye iniciativas para la optimización de procesos, eficiencia energética, valorización de nuevos vectores energéticos, captura de carbono y desarrollo de productos con bajas emisiones de carbono, con el objetivo de facilitar una transición energética asequible⁷⁰.



Figura 25. Alternativas de mitigación y descarbonización, portafolio de investigación y desarrollo para la transición energética de Ecopetrol.

Para la puesta en funcionamiento de la tecnología CCUS, Ecopetrol considera:

Desarrollar un modelo que facilite la toma de decisiones en inversión y desarrollo de CCUS, optimizando la red de suministro de CO₂, incluyendo captura, compresión y transporte. Este modelo tiene como propósito facilitar su uso en procesos como recuperación mejorada de

⁷⁰ Ecopetrol. (2022). *Estrategia de descarbonización de Ecopetrol: Hoja de ruta hacia cero emisiones netas al 2050*. <https://www.ecopetrol.com.co>

petróleo (EOR), fabricación de nuevos productos y combustibles a partir del procesado del gas, o su almacenamiento en formaciones geológicas.

Ecopetrol también ha desarrollado **ECO2SIGHT**⁷¹ (Figura 26), una herramienta geoespacial diseñada para la consulta, análisis y visualización de los resultados de evaluaciones en procesos de recuperación mejorada con CO₂ (EOR-CO₂), almacenamiento geológico, cadena de suministro y sumideros naturales, así como en todas las tecnologías aplicables al aprovechamiento y uso de CO₂ e H₂.

Eco2sight Ecopetrol

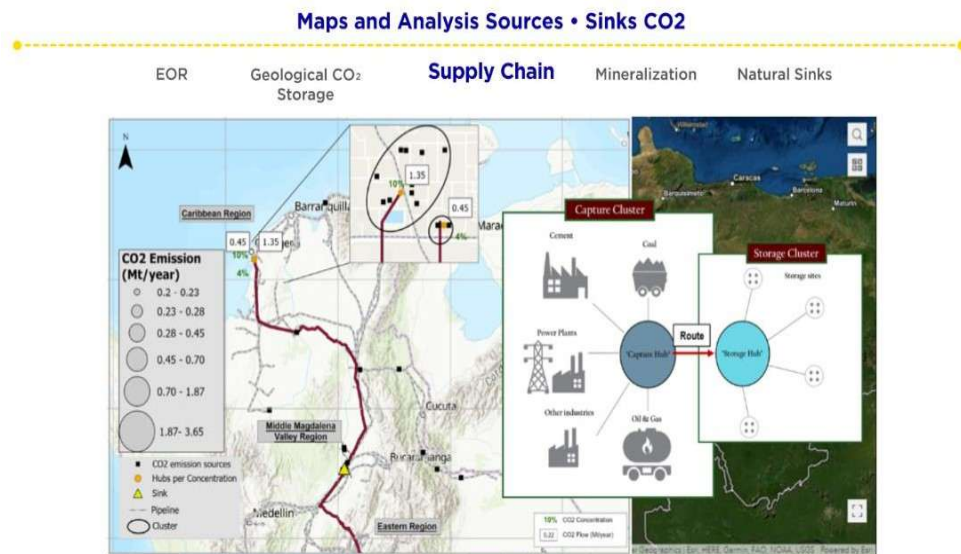


Figura 26. Representación del flujo de trabajo del proyecto Eco2Sight de Ecopetrol, combina la cuantificación puntual de emisiones de CO₂ en fuentes estacionarias con la evaluación técnica de yacimientos candidatos para su utilización (EOR/EGR) o almacenamiento permanente, facilitando la planificación integrada de proyectos CCUS. Ecopetrol (2024).

4.3 Fuentes estacionarias de gases de efecto invernadero

El manejo y la visualización de la información sobre emisiones de CO₂ son importantes para optimizar los planes del beneficio del uso de gases de efecto invernadero (GEI), Ecopetrol también emplea ECO2SIGHT (Figura 27) para gestionar el análisis de datos,

⁷¹ Ecopetrol. (2022). ECO2SIGHT análisis espacial para optimización de evaluación de tecnologías de descarbonización en Ecopetrol. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/357753612_ECO2SIGHT_ANALISIS_ESPACIAL_PARA_OPTIMIZACION_DE_EVALUACION_DE_TECNOLOGIAS_DE_DESCARBONIZACION_EN_ECOPEPETROL

variables y resultados relacionados con la recuperación mejorada de petróleo mediante CO₂ (EOR- CO₂) y el almacenamiento geológico.

Esta herramienta está disponible dentro de **Mapas Online Ecopetrol** y para su funcionamiento utiliza información espacial y temporal. A partir del **Sistema de Manejo de Emisiones Atmosféricas (SIGEA)**, se geolocalizaron 680 puntos de emisión de GEI en Ecopetrol, ubicando puntos de combustión y venteos, además incluye fuentes de CO₂ en cementeras, termoeléctricas y plantas de bioetanol del país.

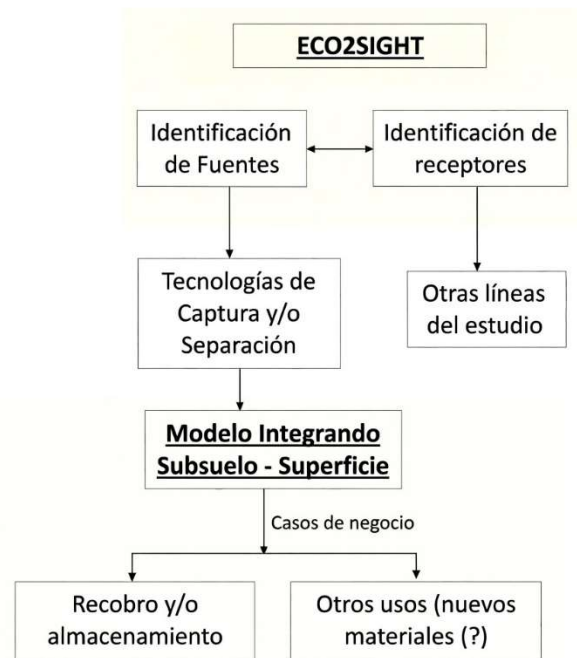


Figura 27. Esquema de decisión multicriterio empleado en el proyecto Eco2Sight de Ecopetrol para determinar la ruta preferente del CO₂ capturado (utilización en recuperación mejorada de hidrocarburos –EOR/EGR–, conversión química, almacenamiento dedicado o combinación híbrida), integrando variables de capacidad de inyección, costo nivelado de almacenamiento, potencial de monetización y cumplimiento normativo. Ecopetrol (2024).

Para distinguir los posibles sumideros en Colombia, se realizó una revisión de las cuencas sedimentarias con potencial de almacenamiento geológico, considerando campos de hidrocarburos maduros, pozos no exitosos, formaciones carboníferas profundas y, de manera exploratoria, secuencias basálticas. Estos tipos de reservorios fueron seleccionados por su capacidad para ofrecer confinamiento a largo plazo y condiciones estructurales favorables para la inyección segura de CO₂. A continuación, se presenta información geológica-geofísica de las principales cuencas de Colombia con potencial de

almacenamiento, reportadas en el atlas de almacenamiento de CO₂ para Colombia.⁷²

1. Valle Medio del Magdalena (VMM)

La **Formación Colorado** (Oligoceno tardío – Mioceno temprano) constituye el reservorio principal identificado en el Valle Medio del Magdalena (VMM) para almacenamiento geológico dedicado de CO₂. Se trata de una sucesión ascendente de areniscas conglomeráticas y conglomerados gruesos depositados en ambientes fluviales canaliformes y abanicos de piedemonte, con espesores netos superiores a 1000 m y porosidad promedio del 23 %. La relación net/gros* de 60/1000 y la amplia distribución lateral de la unidad garantizan una capacidad de inyección y almacenamiento de clase mundial.

Los cálculos realizados sobre la base del volumen de roca y la geometría de trampas estructurales arrojan un potencial de almacenamiento dinámico de 21.2 Gt de CO₂ para la Formación Colorado en el VMM, y una capacidad conservadora de 5.0 Gt de CO₂ (Figura 28), considerando únicamente los cierres anticlinales ya identificados. El sello regional lo proveen las formaciones lutíticas Mugrosa y Esmeralda (probado por más de 40 años de producción petrolera), mientras que la infraestructura preexistente (pozos, facilidades de superficie y tuberías) reduce los costos y tiempos de habilitación.

En consecuencia, la Formación Colorado se posiciona como uno de los sumideros de mayor potencial técnico-económico de Colombia, comparable con los reservorios terciarios del Golfo de México y el Mar del Norte.⁷²

⁷² Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2023). Atlas del estado actual del almacenamiento geológico de CO₂ en Colombia. Eco2Sight Project. https://www.anh.gov.co/documents/29509/Atlas_CO2_Espanol_Interactivo.pdf

* Se refiere a la proporción de roca útil (reservorio) respecto al espesor total de una formación geológica.

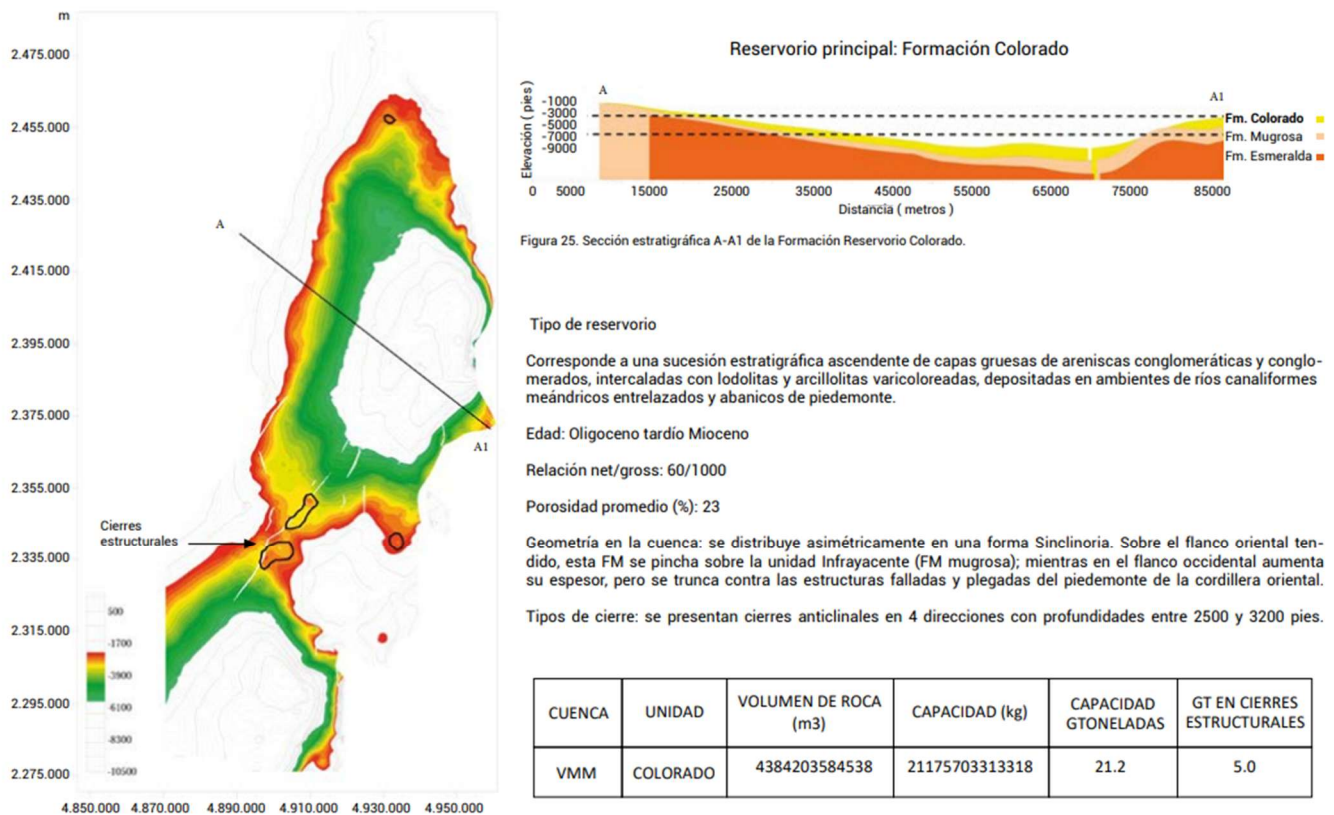


Figura 28. Sección estratigráfica A–A’ y mapa de espesor de la Formación Colorado (VMM). La unidad exhibe excelente calidad reservorio ($\phi = 23\%$, net/gross = 0.67) y un potencial de almacenamiento estimado de 21.2 Gt de CO₂ (dinámico) y 5.0 Gt en trampas estructurales. Tomado de Agencia Nacional de Hidrocarburos (2024)

2.Valle Inferior del Magdalena (VIM) - Cuenca Sinú- San Jacinto (SSJ)

La **Formación Porquero** (Figura 29) (Mioceno inferior – Mioceno medio) representa el reservorio principal identificado en el Valle Inferior del Magdalena – Cuenca Sinú–San Jacinto (VIM–SSJ). Constituye un espeso paquete (>1,200 m) de areniscas arcósicas friables de color oliva claro a grisáceo, interestratificadas con capas delgadas de lutitas y lodolitas de tonalidad verde oliva claro, depositadas en un ambiente de abanicos deltaicos proximales dominados por alta energía.⁷²

Sus propiedades petrofísicas son moderadamente favorables para el almacenamiento de CO₂:

- Porosidad promedio: 12 %
- Relación net/gross: 100/300

- Permeabilidad: típicamente decenas a cientos de mD en las facies de canal

El volumen de roca calculado y la geometría de la cuenca permiten estimar una capacidad dinámica de almacenamiento de 11.75 Gt de CO₂ para la Formación Porquero en el VIM–SSJ, con una capacidad conservadora en trampas estructurales de 42.3 Gt de CO₂ cuando se consideran los grandes cierres anticlinales de cuatro direcciones con profundidades entre 2,500 y 4,000 pies, asociados al sistema de fallas de la provincia de San Jacinto.

El sello regional está garantizado por la superposición de lutitas masivas de la Formación Chengue y el basamento cretácico, mientras que la proximidad a grandes emisores puntuales (refinería de Cartagena, plantas termoeléctricas de la Costa Caribe y complejos petroquímicos) posiciona a esta unidad como una opción estratégica para el desarrollo de *hubs* regionales de captura y almacenamiento de CO₂ en el Caribe colombiano⁷².

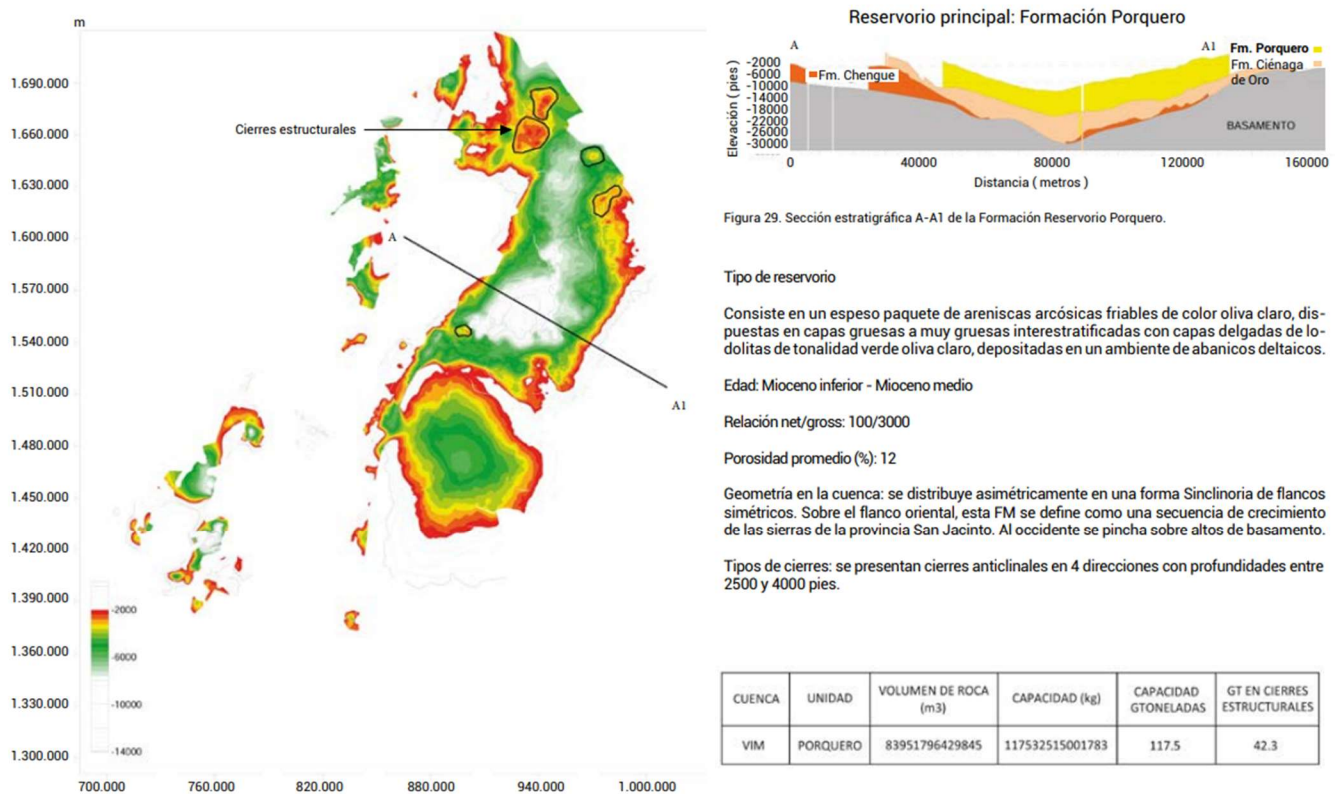


Figura 29. Sección estratigráfica A–A’ y mapa de espesor de la Formación Porquero (VIM–SSJ). La unidad exhibe un potencial de almacenamiento dinámico de 1.75 Gt de CO₂. Tomado de Agencia Nacional de Hidrocarburos (2024).

2. Guajira

La Formación Siamana (Figura 30) (Oligoceno tardío – Mioceno inferior) constituye el reservorio principal identificado en la cuenca Guajira para almacenamiento geológico

dedicado de CO₂. Se trata de un paquete monotónico de areniscas de grano fino a medio, interestratificadas con areniscas calcáreas fosilíferas y lodolitas arcillosas, depositadas en un ambiente marino de plataforma somera a transición. Presenta una porosidad promedio del 10 % y una relación net/gross de 100/300, con permeabilidad típicamente superior a 50 mD.

El volumen de roca estimado y la geometría de la cuenca permiten calcular una capacidad dinámica de almacenamiento de 223.3 Gt de CO₂, una de las mayores identificadas a nivel nacional. La capacidad conservadora en trampas estructurales alcanza los 50 Gt de CO₂, asociada principalmente a grandes crecimientos calcáreos y trampas estratigráficas controladas por el basamento paleozoico–cretácico y fallas normales antitética.

El sello regional está garantizado por la superposición de lutitas y carbonatos de las formaciones suprayacentes (overlying formations), mientras que la ubicación mar adentro facilita la integración con futuros hubs de captura en la costa Caribe (refinería Cartagena, complejos petroquímicos, plantas de GNL) y abre la posibilidad de proyectos transfronterizos con Venezuela y el Caribe oriental.

En consecuencia, la Formación Siamana posiciona a la cuenca Guajira como el sumidero de mayor capacidad técnica de Colombia, comparable con los reservorios terciarios del Golfo de México y el Mar del Norte, y la convierte en candidata prioritaria para el desarrollo de proyectos de almacenamiento dedicado a gran escala y hubs regionales de CO₂⁷².

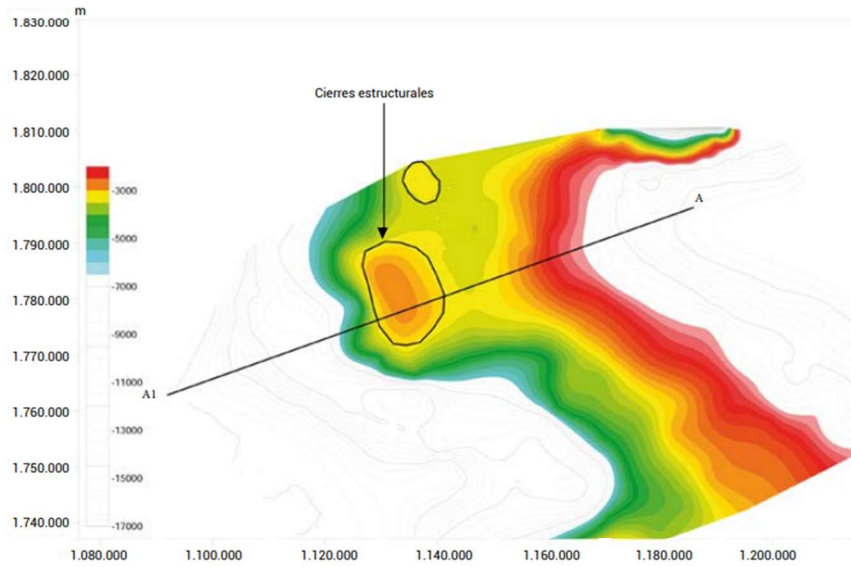


Figura 40. Superficie estructural para la Fm Siamana, indicando la situación de la porción de reservorio disponible para la inyección de CO₂.

Reservorio principal: Formación Siamana

Tipo de reservorio

Conformado por secuencias de areniscas de grano fino, intercaladas con areniscas calcáreas fosilíferas y localmente arcillosas. Localmente alternada con bancos de calizas arenosas o arcillosas fosilíferas. Esta unidad se depositó en un ambiente marino de plataforma somera.

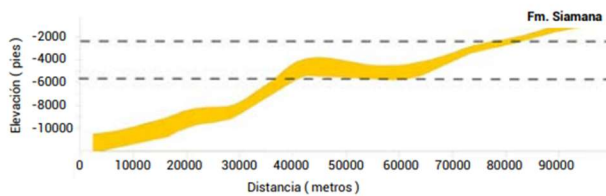
Edad: Oligoceno Tardío – Mioceno Inferior

Relación net/gross: 100/300

Porosidad promedio (%): 10

Geometría en la cuenca: se distribuye a lo largo de un monoclinal hacia el occidente, al oriente pinchada y truncada contra el basamento, adicionalmente forma bancos de calcáreos en los bloques bajos basamentales de fallas normales antitéticas.

Tipos de cierre: en crecimientos calcáreos.



CUENCA	UNIDAD	VOLUMEN DE ROCA (m3)	CAPACIDAD (kg)	CAPACIDAD GTONELADAS	GT EN CIERRES ESTRUCTURALES
GUAJIRA	SIAMANA	19142970647424	223334657553280	223.3	50

Figura 30. Mapa de espesor y sección estratigráfica de la Formación Siamana (Guajira). La unidad presenta una capacidad dinámica estimada de 223.3 Gt de CO₂ Tomado de Agencia Nacional de Hidrocarburos (2024).

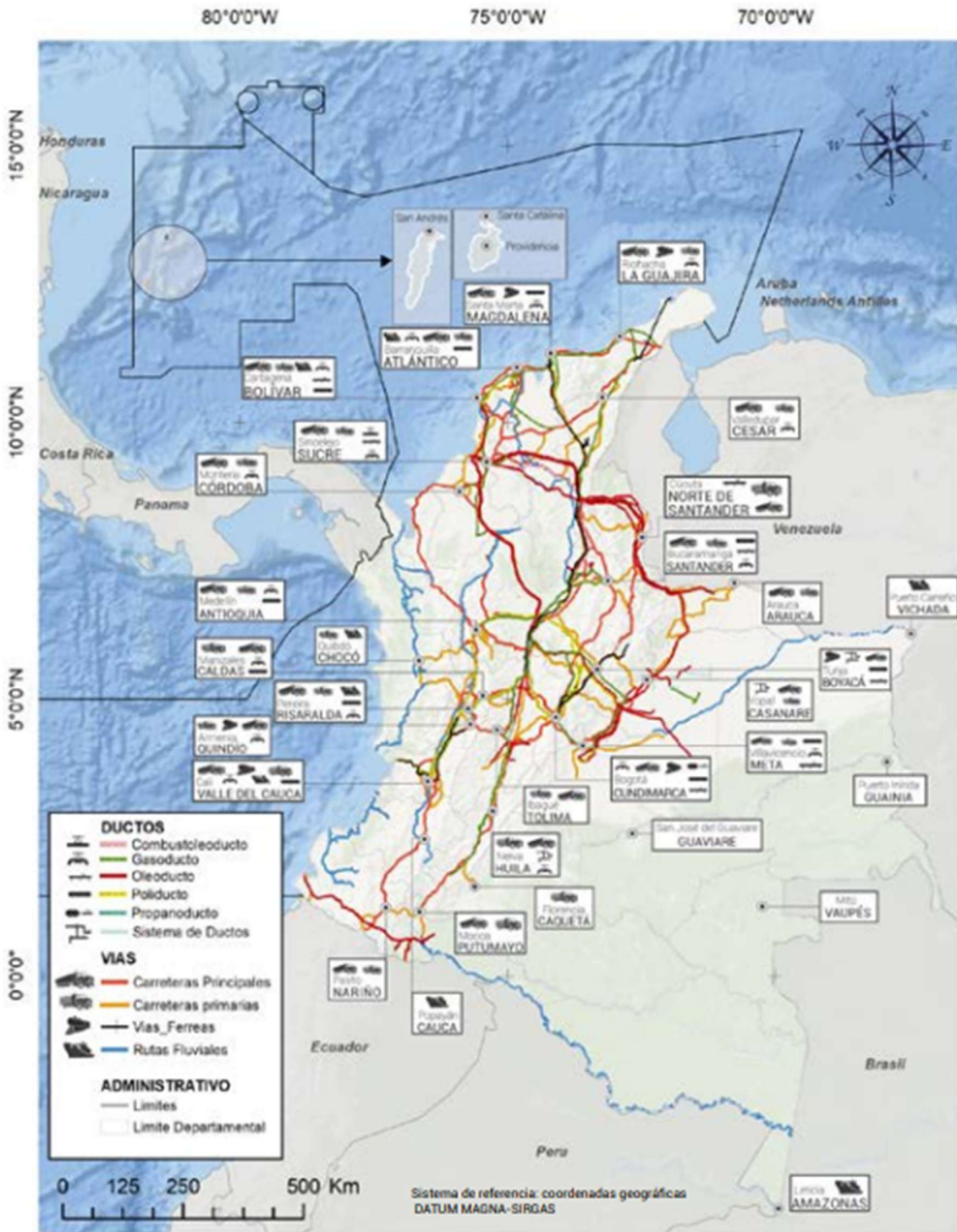


Figura 31. Posible ruta que modela Eco2sight para el almacenamiento de CO₂ a través de clústeres industriales considerando la infraestructura y vías principales. Ecopetrol (2024).

4.4 Planificación de una red de transporte de CO₂

El transporte de CO₂ es la etapa donde se lleva el gas a través de un carbuoducto o vehículo, desde la fuente emisora hasta la boca del pozo/sitio de almacenamiento. Es

común y bien sabido que el transporte de CO₂ requiere un tratamiento para ser comprimido por encima de su punto crítico, es decir, una presión (P) superior a 7.4 MPa y una temperatura (T) SUPERIOR a 31.1 °C.¹⁰

Yáñez et al., (2021) revisaron la fórmula propuesta por Knoope⁷³ et al., para el diseño de un modelo de transporte de CO₂. Este modelo sigue la estructura de costos presentada en la tabla 18 y se basa en las propiedades físicas del transporte de CO₂, así como en los materiales utilizados para la construcción de gasoductos. A diferencia de modelos anteriores, que toman como referencia el transporte de gas natural y utilizan un diámetro o costo específico, esta revisión considera las particularidades del CO₂ para una estimación más precisa

Tabla 18. Los costos asociados al diseño del modelo de distribución varían según los materiales y propiedades a utilizar, considerando 3 fases importantes (bombeo, compresión y el carbo ducto). Yañez et al., (2021).

Categoría	Bombeo	Compresión	Gasoducto
Costo de equipos	✓	✓	
Costo de energía	✓	✓	
O&M (Operación y Mantenimiento)	✓	✓	✓
Costo de materiales			✓
Costo de mano de obra			✓
Costo de derecho de vía (ROW)			✓

Yañez¹⁰ et al., realizaron un análisis detallado sobre los costos, rutas y agrupamientos industriales en Colombia, enfocados en la utilización de CO₂ para recuperación mejorada de petróleo. El estudio propone posibles rutas de transporte y escenarios de flujo desde los puntos de emisión hasta los sitios de almacenamiento geológico o uso, considerando la distribución espacial de las industrias emisoras a lo largo del país.

Como resultado, se reconocieron sectores como el; de petróleo y gas, cemento, la

⁷³ Knoope, M. M. J., Guijt, W., Ramírez, A., & Faaij, A. P. C. (2014). Improved cost models for optimizing CO₂ pipeline configuration for point-to-point pipelines and simple networks. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 20, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.10.009>

generación de energía y la producción de etanol como fuentes principales de emisiones (Figura 32) estas industrias pueden integrarse en una red iterativa entre emisores y sitios de utilización, optimizando el aprovechamiento del CO₂ en la industria seleccionada.

La planificación de una red de transporte eficiente implica un análisis económico riguroso, así como la evaluación individual de agrupamientos industriales o *clústeres*, entendidos como zonas geográficas donde se concentra un alto número de emisores o usuarios de CO₂. Además, la inversión en infraestructura y el acompañamiento de expertos son factores para mejorar la productividad de estos sistemas de transporte de carbono que son complejos y requieren inversión para un diseño inteligente y eficiente.

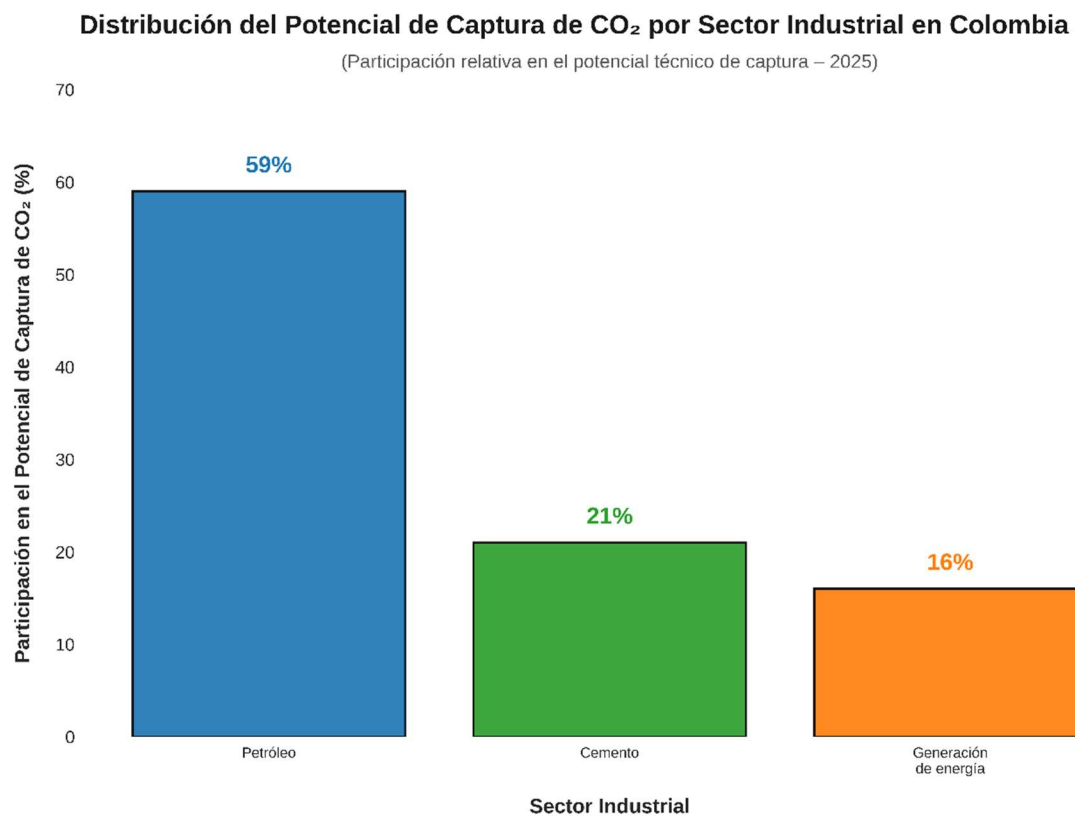


Figura 32. Principales fuentes estacionarias de emisiones de GEI, representan el 65% de las emisiones totales de GEI del sector industrial En Colombia. Se estimó que aproximadamente 18 Mt CO₂ por año podrían destinarse a los procesos de captura. Sin embargo, solo 5.9 Mt CO₂ fueron viables para su uso en proyectos de recuperación mejorada de petróleo (EOR). Yañez et al., (2021).

El transporte de CO₂ hacia regiones con alto potencial EOR como la Cuenca de los Llanos Orientales, desafía problemas geotécnicos por la topografía andina montañosa, como consecuencia demanda obras con capacidad para superar gradientes elevados, estaciones de compresión eficientes y mantenimiento en terrenos inestables, y se agrava aún más por la infraestructura limitada en tuberías de alta presión.

La Figura 33 presenta el trazado de los carbonoductos de CO₂ propuestos por Yáñez et al., los cuales se diseñaron siguiendo, en su mayoría, los corredores de los gasoductos ya existentes en el territorio nacional. Esta estrategia de alineamiento ofrece ventajas técnicas y jurídicas significativas: permite aprovechar los derechos de vía previamente adquiridos, reduce los conflictos socioambientales asociados a la apertura de nuevas servidumbres, minimiza los costos de gestión predial y facilita la ejecución técnica de la obra al utilizar trazados ya estudiados y parcialmente acondicionados.

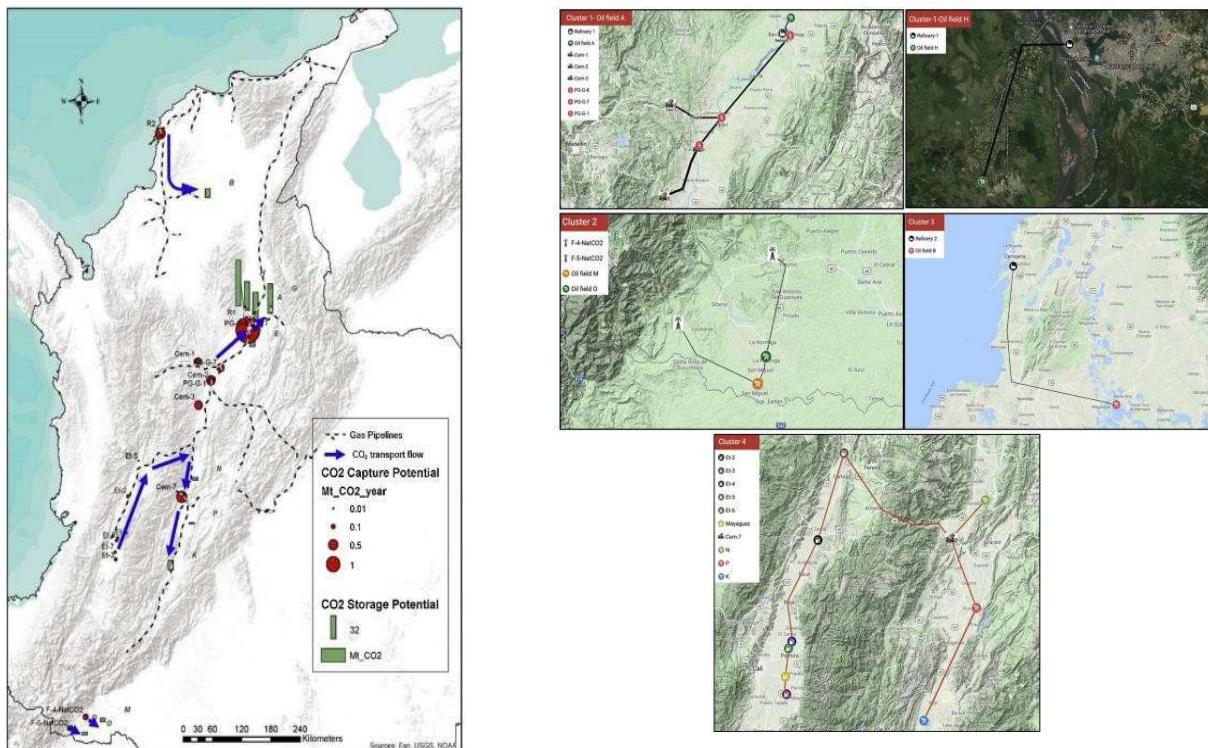


Figura 33. Líneas de ductos para cada clúster. Yáñez et al., (2021).

4.5 Monitoreo y evaluación de resultados

El monitoreo es un requisito básico en el proceso de permisos para la inyección subterránea, este paso permite rastrear la ubicación del CO₂ inyectado, detectar posibles fugas en pozos y verificar el volumen almacenado.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) define varias técnicas de monitoreo, clasificadas en: atmosféricas, superficiales y subterráneas, según el informe "Monitoreo, Verificación y Contabilidad del CO₂ Almacenado en Formaciones Geológicas Profundas". A continuación, se presenta un breve resumen de estas técnicas, elaborado por Umer Zahid et al, (2010) (Tabla 19-21).

Tabla 19. Técnicas de monitoreo atmosférico. Tomado de Umer Zahid et al., (2010).

Técnica de monitoreo	Función
Detectores de CO₂	Sensores para monitorear CO ₂ en el aire.
Covarianza de Eddy	Técnica de medición del flujo atmosférico para cuantificar las concentraciones de CO ₂ en la atmósfera a cierta altura sobre la superficie terrestre.
Sistema avanzado de detección de fugas	Transporte en aeronaves o vehículos terrestres para cuantificar los flujos de CO ₂ desde el suelo.
Sistemas Láser y LIDAR	Dispositivo de trayectoria abierta que utiliza un láser para emitir un haz con una longitud de onda que absorbe CO ₂ .
Trazadores (Isótopos)	Composición isotópica natural y/o compuestos inyectados en la formación objetivo junto con el CO ₂ para determinar la dirección del flujo y la detección temprana de fugas.

Tabla 20. Técnicas de monitoreo cercanas a la superficie. Tomado de Umer Zahid et al., (2010).

Técnica de monitoreo	Función
Monitoreo del estrés del ecosistema	Método óptico basado en satélites o aviones para detectar emisiones después de que han ocurrido.
Trazadores	Compuestos solubles en CO ₂ inyectados junto con este gas en la formación objetivo para determinar propiedades hidrológicas, dirección del flujo y detección de fugas de baja masa. Propiedades.
Monitoreo de aguas subterráneas	Muestreo de agua o suelo en la zona vadosa (cercana a la superficie) para análisis químico básico y detección temprana de grandes emisiones.
Imágenes hiperespectrales térmicas	Técnica de teledetección aérea utilizada principalmente para la recuperación y almacenamiento de metano en lechos de carbón.
Radar de apertura sintética (SAR & InSAR)	Tecnología basada en satélites en la que ondas de radar son enviadas al suelo para detectar deformaciones superficiales.

Tabla 21. Técnicas de monitoreo superficial. Tomado de Umer Zahid et al., (2010).

Técnica de monitoreo	Función
Estudio sísmico 3D de superficie con series de tiempo	Proporciona información de alta calidad sobre la distribución y migración del CO ₂ .
Perfil Sísmico Vertical (VSP)	Tecnología que ofrece información detallada sobre la concentración y migración del CO ₂ .
Sondeo Magnetotelúrico	Calcula los cambios en el campo electromagnético causados por variaciones en las propiedades eléctricas del CO ₂ y los fluidos de formación.
Resistividad Electromagnética	Mide la conductividad eléctrica del subsuelo, incluyendo suelo, agua subterránea y roca.
Tomografía de Inducción Electromagnética (EMIT)	Permite la medición en pozos usando parámetros como resistividad o temperatura, útil para monitorear la composición de fluidos y detectar fugas en los pozos.
Monitoreo de Presión Anular	Prueba de integridad mecánica para detectar fugas en el revestimiento, empacador o tubería de un pozo.
Captura de Neutrones Pulsados	Permite identificar la saturación de petróleo, litología, porosidad, petróleo, gas y agua mediante técnicas de neutrones pulsados.
Tomografía de Resistencia Eléctrica (ERT)	Técnica de alta resolución para monitorear el movimiento del CO ₂ entre pozos.
Registro Sónico (Acústico)	Tecnología utilizada en campos petroleros para caracterizar la litología, determinar la porosidad y medir el tiempo de viaje de las ondas en la roca del yacimiento.
Estudio Sísmico 2D	Se utiliza para monitorear 'puntos brillantes' de CO ₂ en el subsuelo.
Gravedad de Tiempo Transcurrido	Monitorear cambios en la densidad del fluido debido a la inyección de CO ₂ .
Registro de Densidad (RHOB Log)	Permite estimar la densidad de formación y la porosidad a diferentes profundidades.
Registro Óptico	Herramienta que permite obtener imágenes digitales detalladas del revestimiento del pozo.
Registro de Cementación (<i>Ultrasonic Well Logging</i>)	Emplea atenuación sónica y medición del tiempo de viaje para determinar si el revestimiento está cementado o libre, permitiendo una remediación temprana ante fugas.

El análisis de la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCUS) en Colombia destaca como beneficio principal la reducción de emisiones de CO₂ en diversas ramas de la industria. Esto se reflejaría en los reportes oficiales del país, donde el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), presentado bienalmente ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), reportaría este progreso.¹⁰

La evaluación es un proceso sistemático que permite analizar, medir y valorar determinada situación, proceso, objeto o desempeño con base en criterios predefinidos. Su propósito es obtener información objetiva y fundamentada para tomar decisiones, mejorar procesos o

validar el cumplimiento de objetivos.

Dentro de la evaluación de los resultados lo más obvio sería reducir las emisiones de CO₂ e inclusive lograr una emisión cero, en el inventario nacional de gases de efecto invernadero reportaría la disminución de emisiones en su informe bienal.

V. Escala Comercial

La escala comercial en tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) se alcanza cuando convergen tres factores fundamentales: la madurez tecnológica, el respaldo regulatorio y la existencia de modelos de negocio viables. Casos emblemáticos como Boundary Dam⁷⁴ (Figura 34) en Canadá o la Línea de Transporte de Carbono de Alberta evidencian que el CCUS es una tecnología funcional a escala comercial, capaz de capturar y almacenar millones de toneladas de CO₂ al año, siempre que exista una infraestructura robusta y un compromiso sostenido por parte del gobierno.



Figura 34. El proyecto Boundary Dam, trajo retos en su desarrollo pues sería el primer proyecto de su tipo. Tomado de Canadian consulting resources (2016).

No obstante, es importante señalar que la disponibilidad comercial de una tecnología como el CCUS no depende únicamente del nivel de ingresos de un país. Si bien los países con mayores ganancias pueden tener más recursos para invertir en investigación, desarrollo e

⁷⁴ Canadian consulting Engineering awards. (2016) Boudary Dam Integrated Carbon Capture Storage project. Natural Resources, Mining, industry, Energy.

infraestructura, la aplicación efectiva del CCUS requiere además voluntad política, capacidad institucional, marcos regulatorios adecuados y condiciones geológicas favorables para el almacenamiento. Por tanto, no se puede asumir que todos los países con ingresos similares o superiores a los de por ejemplo Canadá o Estados Unidos dispongan automáticamente de la tecnología o las condiciones necesarias para su implementación comercial.

*“No existe una política única para el CCUS. La elección o combinación adecuada de instrumentos para cada país depende de las condiciones locales del mercado y de factores institucionales... Estos factores varían considerablemente entre regiones”.*⁷⁵

Estos ejemplos dejan como enseñanza que los gobiernos que aspiran a un futuro sostenible deben planificar e invertir activamente en habilitar una economía de emisiones netas cero, lo cual incluye, entre otras medidas, el desarrollo de mercados de carbono funcionales y redes interconectadas de captura y almacenamiento geológico de CO₂. En el caso de Colombia, avanzar en este sentido requerirá no solo recursos, sino también una hoja de ruta clara y multisectorial que permita adaptar el CCUS a la realidad nacional.

5.1 Política de CCUS

Para una consideración industrial Escobar et al., (2021) proponen que se realice una serie de actividades (Tabla 22) para un posible escenario piloto. Además de las fases desarrolladas en este trabajo, las siguientes consideraciones darán un soporte aún más estructurado de la hoja de ruta tecnológica.

Tabla 22. Actividades para la Implementación de CCUS (Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono) en Colombia. Tomado de CIAT (2021).

Actividad	Descripción
Análisis de línea base y adopción tecnológica	Evaluación de la línea base y conversión tecnológica en sectores clave como energía, petróleo y gas, bioenergía, minería e hidrógeno.
Definición de clústeres estratégicos de CCUS	Identificación de clústeres estratégicos de CCUS considerando emisiones actuales, planeación estatal e infraestructura disponible.
Diseño de modelos de negocio para inversión privada	Desarrollo de modelos de negocio que fomenten inversión privada en captura, transporte y almacenamiento de CO ₂ .
Análisis de ciclo de vida de tecnologías CCUS	Evaluación del ciclo de vida de tecnologías de captura, transporte y almacenamiento en sectores clave de Colombia.

⁷⁵ Agencia Internacional de Energía. (2024). *CCUS en las transiciones hacia la energía limpia: Acelerando el despliegue*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/accelerating-deployment>

<p>Análisis de almacenamiento geológico</p>	<p>Caracterización del subsuelo para almacenamiento geológico de CO₂, incluyendo formaciones previamente evaluadas para recuperación mejorada de petróleo (CO₂-EOR), en colaboración con el Servicio Geológico Colombiano. Este tipo de almacenamiento, ya caracterizado en varios casos, representa una opción autosustentable y con alto potencial para desarrollar un escenario piloto de implementación de la tecnología CCUS en el país. (Rodríguez de la Garza, 2025 comunicación personal).</p>
<p>Análisis económicos de activos en transición energética</p>	<p>Evaluación económica de CCUS en termoeléctricas, comparación con energías renovables y análisis de instrumentos financieros.</p>

5.2 Diseño de nuevas instalaciones industriales

El diseño y adecuación de las instalaciones industriales, ya sea dentro de **clústeres industriales** o bajo un régimen interno de reducción de emisiones a la atmósfera, deben considerar información detallada sobre los sitios de almacenamiento destinados para la disposición de sus GEI. Esto para realizar una planificación eficiente y el aseguramiento ambiental del proceso de captura y almacenamiento de carbono.⁷⁶

La adecuación de nuevas instalaciones industriales considera a los siguientes puntos:

- Evaluar la escala y concentración de las emisiones de CO₂ capturables en cada instalación industrial específica para estimar los costos de las adaptaciones técnicas necesarias para su captura (Sección 4.1)
- Implementar un método de selección para identificar posibles sitios de almacenamiento de CO₂, estimando su capacidad, inyectividad y costos generados. (Capítulo 4).
- Desarrollar un enfoque de diseño optimizado para minimizar los costos de la infraestructura de tuberías que conecten las plantas de captura con los sitios de almacenamiento, considerando geomorfología, derechos de paso existentes, demografía y diversos factores de justicia social y ambiental. (sección 4.2)

⁷⁶ Gunawan, T. A., Gittoes, L., Isaac, C., Greig, C., & Larson, E. (2024). *Design Insights for Industrial CO₂ Capture, Transport, and Storage Systems*. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c05484>

La fase piloto demostrativa en una instalación industrial debe llevarse a cabo en un sitio geológico bien caracterizado y conocido con anterioridad, de modo que la mayor parte de la inversión se destine efectivamente al desarrollo y optimización de los sistemas de captura y separación de gases, en lugar de consumirse en estudios exploratorios o caracterización inicial del sitio de almacenamiento.

Los clústeres industriales, concepto en el que hemos presentado anteriormente, ofrecen un beneficio importante en la reducción de costos asociados a la implementación de líneas de transporte de CO₂. Si bien los costos de captura suelen representar la mayor parte de los costos totales nivelados de un sistema CCUS, la optimización del trazado y la extensión de la infraestructura de transporte y almacenamiento (T&S) mediante el uso compartido entre múltiples instalaciones industriales ubicadas en proximidad geográfica puede generar ahorros significativos (Gunawan et al., 2024) (Figura 35). Además, esta estrategia facilita el despliegue de los sistemas T&S, al reducir los desafíos relacionados con la ubicación de la infraestructura, la obtención de permisos y los tiempos de construcción.

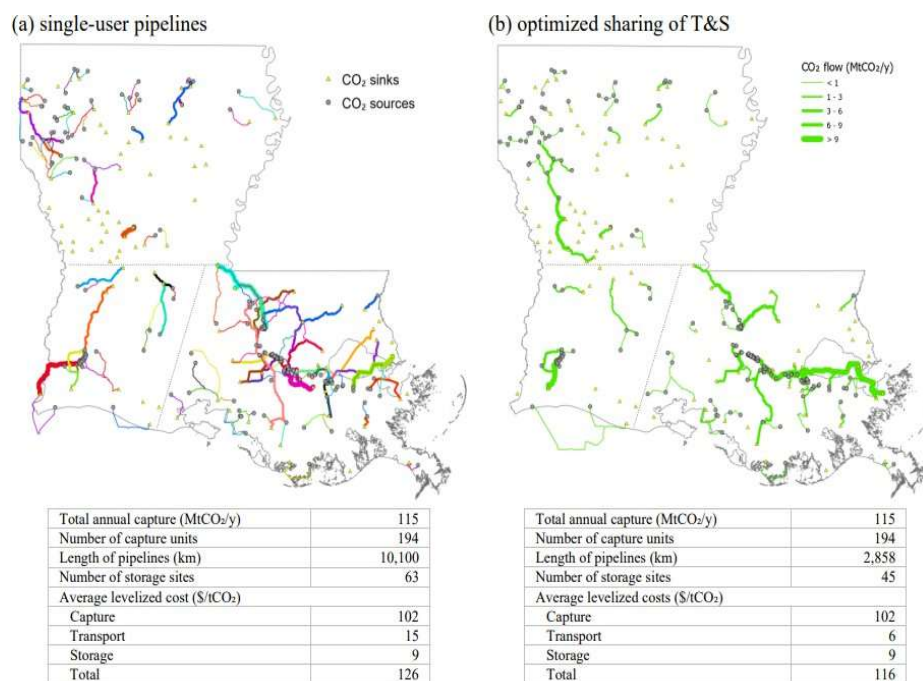


Figura. 35 Optimización y almacenamiento en cadena, adecuando los diferentes sectores industriales con beneficios económicos de los proyectos CCUS. Gunawan et al., (2024)

Un ejemplo de estos beneficios se observa al comparar dos diseños de sistemas T&S en todo el estado, ambos con la misma cantidad total de CO₂ capturado y almacenado. En

el primer diseño, cada fuente de emisión está limitada a utilizar una tubería exclusiva para transportar el CO₂ a los sitios de almacenamiento. En contraste, en el segundo diseño, las fuentes pueden compartir tuberías siempre que esto reduzca los costos totales de T&S.

En capítulos anteriores se abordaron temas de planeación piloto para un despliegue seguro del sistema CCUS, buscando minimizar complicaciones técnicas, logísticas y regulatorias. Se presentó información sobre fuentes estacionarias de emisión, sitios potenciales de almacenamiento geológico, rutas viables para la construcción de carbonoductos, así como la identificación de clústeres industriales con potencial de integración.

El siguiente punto crítico es promover la articulación y coordinación entre los diversos agentes económicos en la industria involucrados. No basta con que las partes estén informadas: es necesario establecer canales de comunicación, acuerdos de cooperación y esquemas de gobernanza que permitan un diseño conjunto y eficiente de la red CCUS. En el siguiente capítulo se abordan estos aspectos, con el objetivo de cerrar la brecha de desconocimiento y fragmentación entre los actores clave del sistema.

VI. Colaboración y Coordinación

Aunque la colaboración y coordinación entre centros de investigación, industria y sector público es esencial, su ubicación al final del documento responde a una estrategia lógica fundamentada. Primero se construye un marco técnico sólido (fuentes emisoras, almacenamiento, transporte, clústeres), y solo con ese conocimiento previo resulta posible plantear propuestas realistas para la integración entre actores.

Esta estructura refleja las recomendaciones de la literatura sobre CCUS, que enfatiza la importancia de abordar primero los desafíos tecnico-económicos y luego las dimensiones institucionales, políticas y sociales, que solo pueden abordarse con una comprensión clara de los aspectos técnicos (Figura 36).

Modelo de Gobernanza Tripartita para CCUS en Colombia
Áreas de colaboración entre Industria, Academia y Gobierno - 2025

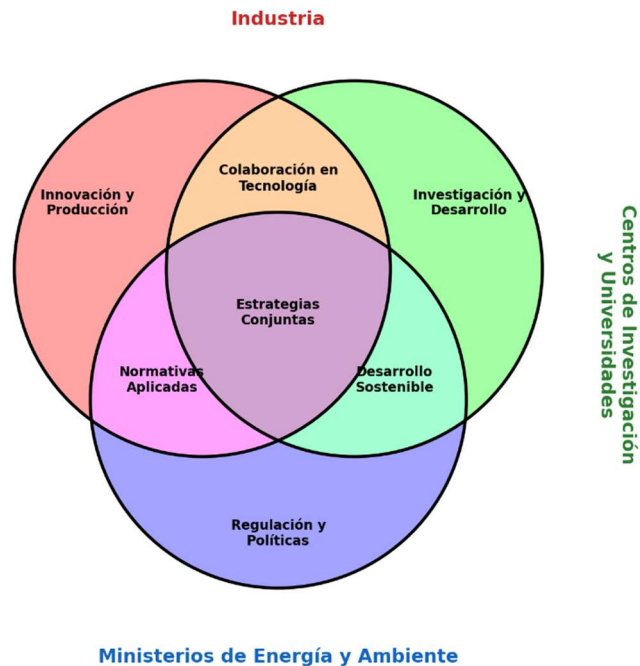


Figura 36. Intersección de diferentes disciplinas, beneficios y avances del trabajo conjunto. Elaboración propia

6.1 Centro Nacional de CCUS/ Laboratorio de gases asociado al carbón

Bajo la jurisdicción del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), y con el Servicio Geológico Colombiano como organismo técnico científico fundamental, se han coordinado estudios y acciones regulatorias para avanzar en la implementación de tecnologías emergentes como la captura y almacenamiento de carbono (CCUS). Estos organismos, junto con la autoridad regulatoria del sector energético, son responsables de monitorear y dar seguimiento a los planes y acciones propuestos.

Tomando como referencia la estructura planteada por CIAT para la formulación de un marco regulatorio, se identifica la necesidad de fortalecer la articulación interinstitucional, de modo que se logre una coordinación efectiva entre actores públicos. Esta coordinación es vital para el desarrollo y ejecución de los planes de acción contenidos en la propuesta de regulación, la hoja de ruta nacional y/o los proyectos piloto relacionados con CCUS.

La gobernanza propuesta para tal fin estaría conformada por representantes de las siguientes entidades: Ministerio de Minas y Energía (MinEnergía), Ministerio de Ambiente

y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), Ministerio de Hacienda (MinHacienda), Departamento Nacional de Planeación (DNP), los subsectores de energía, hidrocarburos y minería, así como el Servicio Geológico Colombiano (Figura 37).

Gobernanza Institucional del CCUS en Colombia
Relaciones entre ministerios, entidades públicas, sector privado y academia - 2025

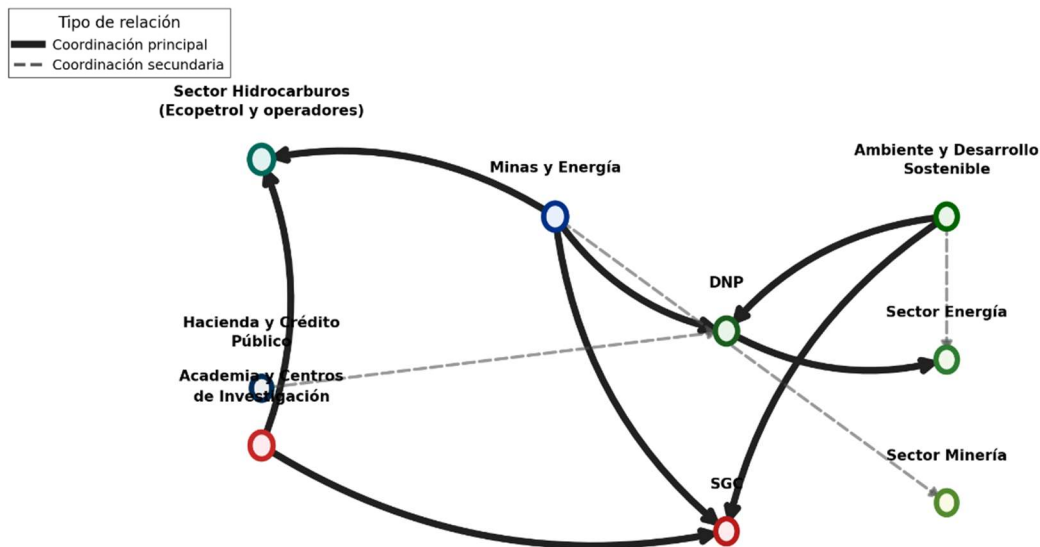


Figura 37. Relación entre dependencias reguladoras y generadoras de ciencia, política y decisiones. Elaboración propia.

Ahora bien, la designación de un espacio en donde pueda llevarse a cabo el desarrollo de estos planes de trabajo estaría regulado por un carácter público, y de libre acceso a los interesados.

Se propone al Laboratorio de Gases Asociado al Carbón de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) como una institución para establecer un sitio de experimentación orientado al desarrollo de tecnologías CCUS. Esta propuesta podría ser presentada al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación como una iniciativa para consolidar un laboratorio especializado en captura, utilización y almacenamiento de carbono.

Este centro podría operar bajo la supervisión técnica de entidades expertas como el Servicio Geológico Colombiano, así como contar con el acompañamiento de organismos internacionales con experiencia en el tema. Asimismo, es importante considerar la participación de otras universidades públicas y privadas del país que desarrollen investigación en CCUS, con el fin de fortalecer la colaboración académica, diversificar el enfoque científico y garantizar una base de conocimiento más amplia y robusta.

Esta visión colaborativa permitirá que el laboratorio sirva como un nodo experimental y como un espacio de articulación entre academia, gobierno e industria para acelerar la adopción de estas tecnologías en Colombia.

6.2 Participación en redes internacionales de I+D en CCUS

Los proyectos de investigación colaborativa generan un valioso intercambio de conocimientos, fortalecen el trabajo interdisciplinario y permiten una mejor distribución de responsabilidades entre los equipos participantes. Esta dinámica no solo reduce la carga individual de tareas, sino que además favorece la construcción de estudios más sólidos, capaces de abordar los problemas desde múltiples perspectivas técnicas y científicas.

En capítulos anteriores se presentaron ejemplos de equipos de trabajo a nivel internacional que han unido esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En el continente americano, por ejemplo, México, Estados Unidos y Canadá han desarrollado iniciativas conjuntas que han generado información sumamente valiosa sobre las posibilidades de captura de carbono y estrategias de mitigación. Estos ejemplos demuestran que, si bien las emisiones de Colombia no se comparan con las de los grandes países industrializados, ello no exime al país de su responsabilidad frente a la crisis climática. Por el contrario, debe reconocerse que el compromiso climático implica una acción proporcional, informada y coordinada, tanto a nivel nacional como regional.

6.3 Proyectos conjuntos de investigación y desarrollo

Las universidades de Colombia cuentan con iniciativas didácticas dentro de sus sistemas educativos de nivel superior, brindan un acercamiento a la investigación de una manera académica/pedagógica, abordan el conocimiento y la enseñanza dejando de lado la escuela tradicional y abriendo paso a un aprendizaje activo y constructivo.⁶⁹

También han incorporado diversas iniciativas pedagógicas en sus sistemas de educación superior, orientadas a fortalecer la formación investigativa desde etapas tempranas. Estas estrategias brindan un acercamiento activo y constructivo a la investigación, dejando atrás modelos de enseñanza tradicionales y promoviendo un aprendizaje

basado en la experiencia y la indagación crítica.⁷⁷

Un ejemplo representativo de estas iniciativas es la conformación de “semilleros de investigación”, los cuales reúnen a investigadores experimentales vinculados a grupos de investigación institucionalizados, docentes tutores de planta o tiempo completo, y al menos tres estudiantes activos de pregrado o posgrado. Estos espacios facilitan la colaboración de jóvenes universitarios en la resolución de problemas específicos dentro de sus disciplinas, permitiendo el abordaje de problemáticas locales mediante el desarrollo de proyectos científicos con un enfoque territorial basado en datos geoespaciales y análisis contextual.

Este trabajo fue realizado bajo la revisión de dos investigadores de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). En las instalaciones de esta universidad se encuentra el Instituto de Recursos Minero-Energéticos (IRME), dentro del cual opera el Laboratorio de Gas Asociado al Carbón. Este laboratorio cuenta con la infraestructura técnica adecuada y experiencia en investigación sobre recursos energéticos, incluyendo el almacenamiento geológico de CO₂.

La propuesta cobra mayor sentido si se considera el contexto geológico e industrial de la región. Existe una sede seccional de la UPTC que está ubicada en el departamento de Boyacá, es una zona del altiplano cundiboyacense con una amplia historia minera, donde se encuentran importantes formaciones sedimentarias de ambiente marino, propicias para el almacenamiento de CO₂, así como yacimientos de carbón térmico y coquizable, que han sido tradicionalmente explotados. Además, Boyacá alberga una industria cementera activa, sector que genera grandes volúmenes de emisiones de CO₂ y que podría beneficiarse directamente del desarrollo de tecnologías de captura y almacenamiento.

Por lo tanto, el laboratorio está geográficamente situado en un entorno con condiciones geológicas favorables y fuentes emisoras cercanas, lo que lo convierte en un espacio estratégico para la investigación aplicada en CCUS, con potencial de impacto académico como industrial y ambiental para la región (Figura 38).

⁷⁷ Villalba Cuéllar, J. C., & González Serrano, A. (2017). *La importancia de los semilleros de investigación. Prolegómenos*, 20(39), 1-5.

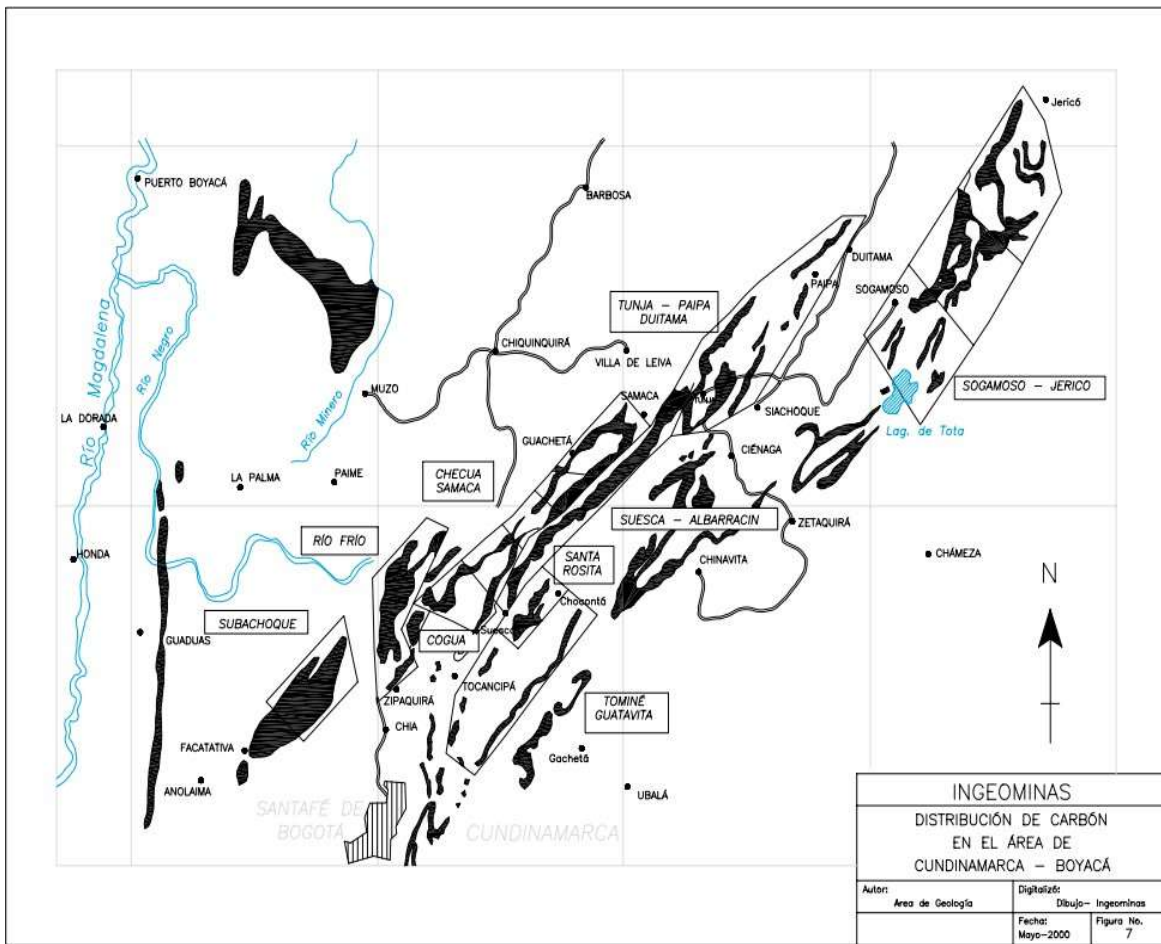


Figura 38. La distribución de carbón en el departamento de Boyacá evidencia que Colombia aún posee un importante potencial energético para su explotación en los próximos años. (Tomado de Ingeominas, 2000)

Con una inversión adecuada en investigación, el departamento de Boyacá tiene la posibilidad de convertirse en un referente nacional en materia de almacenamiento geológico de CO₂, particularmente en lechos de carbón y formaciones sedimentarias marinas presentes en la región. No obstante, se requiere profundizar en estudios que permitan mejorar los procesos involucrados, desde la caracterización del subsuelo hasta la modelación del comportamiento del CO₂ inyectado.

Aunque aún no se cuenta con una estimación oficial del potencial de almacenamiento específico en Boyacá, estudios realizados a nivel nacional y en otras regiones geológicamente comparables indican un panorama prometedor. Por ejemplo, investigaciones preliminares estiman que la cuenca del Valle Medio del Magdalena (Figura 39), en Colombia, podría tener una capacidad teórica de almacenamiento que va desde importantes, con una capacidad estimada de hasta 98 Gt (Domínguez et al., 2022).

Regiones con condiciones geológicas similares como las que presenta Boyacá podrían

albergar volúmenes significativos de CO₂, lo que respalda la necesidad de desarrollar investigación aplicada en el territorio. La combinación de una base geológica favorable, infraestructura académica y presencia industrial (como la minería del carbón y la industria cementera) hacen de Boyacá un lugar estratégico para el desarrollo de tecnologías CCUS en Colombia.⁷⁸

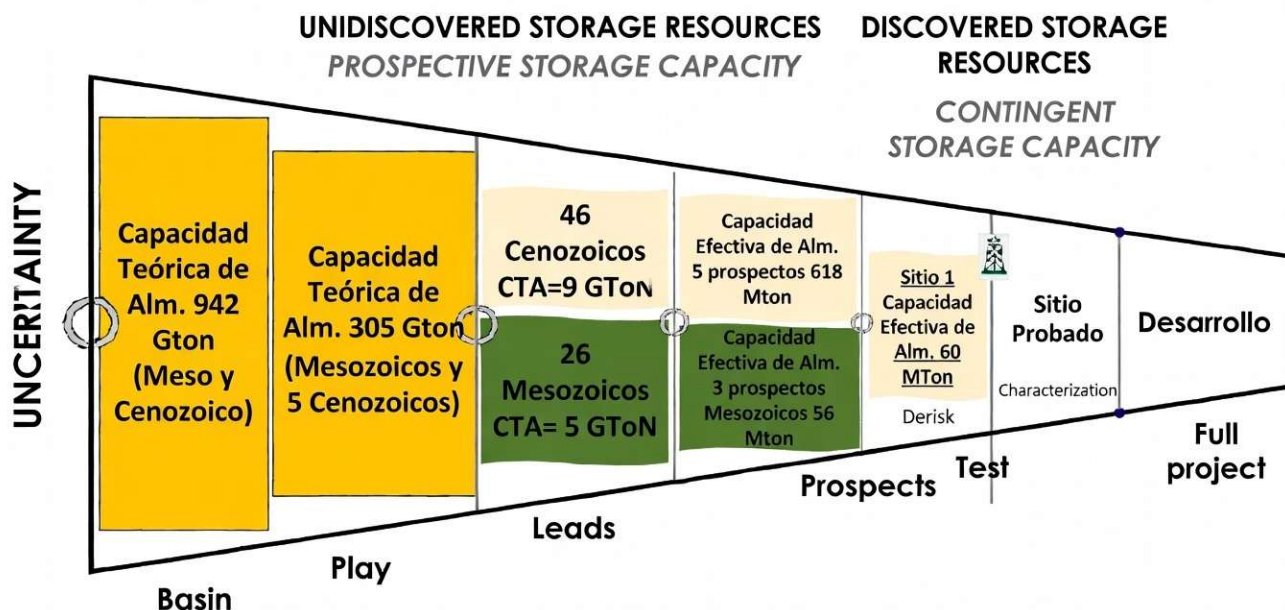


Figura 39. Estudio regional de cuenca VMM. Tomado de Domínguez et al., (2022).

6.4 Mapa de almacenamiento geológico de Colombia

El proceso de selección de sitios para el almacenamiento de CO₂ comparte similitudes con los métodos utilizados en la industria petrolera, pero con un enfoque adaptado a la secuenciación progresiva de evaluación y desarrollo de sumideros geológicos, en lugar de la producción de hidrocarburos. El marco propuesto por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. Department of Energy, DOE) establece tres fases distintas de evaluación: la fase de exploración, la fase de caracterización del sitio y la fase de implementación, las cuales corresponden a diferentes clases de recursos geológicos y se subdividen en subclases de proyectos (Figura 40). Un atlas de sitios de almacenamiento geológico, que incluya pozos petroleros agotados y otras formaciones como acuíferos salinos o lechos de carbón, proporciona información básica sobre sitios

⁷⁸ Domínguez, C. A., Gómez, D., & Villegas, S. (2022). *Pre-feasibility studies of CO₂ storage: A summary of two years of studies in Colombia and their challenges in light of worldwide projects and pilots*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/386044575>.

potenciales antes de la fase de exploración, sirviendo como una primera aproximación para identificar y priorizar áreas viables para el secuestro de CO₂.

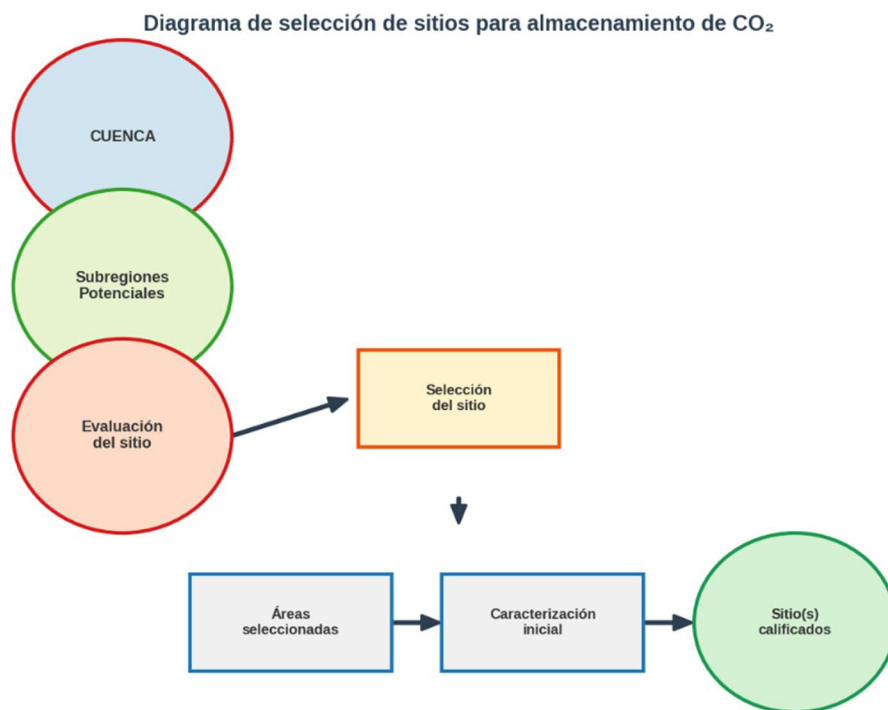


Figura 40. Diagrama simplificado de la evaluación de sitios calificados según el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE). Modificado de Paredes Ángeles Jorge (2020).

Mariño et al., resumen a varios autores y presentan un resumen en su estudio, en concreto, sobre los llanos colombianos y por medio de criterios físicos y geológicos propone una visión general de lugares para el almacenamiento geológico de CO₂.^{79 13}

Tabla 23. Criterios técnicos para la selección de sitios de almacenamiento geológico de CO₂. Tomado de Mariño et al., (2018)

Criterio	Supuesto
Criterios geológicos	Las cordilleras y plataformas cratónicas no son adecuadas debido a la falta de rocas almacenadoras y sellos efectivos. Las cuencas de antepaís son las más adecuadas debido a los criterios de formación.
Criterios geotérmicos	La presión y temperatura varían por cuenca. Se considera 800 m como umbral mínimo para la inyección de CO ₂ en estado supercrítico, pero puede variar según la geología local.

⁷⁹ Bachu, S. (2000). Sequestration of CO₂ in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41(9), 953–970.

Criterios hidrodinámicos	En cuencas cercanas a cinturones orogénicos, el agua se expulsa lateralmente. En cuencas profundas, el agua se mueve lentamente, favoreciendo el almacenamiento estable de CO ₂ .
Potencial de hidrocarburos	Es necesario evaluar la madurez de la cuenca para evitar contaminación de hidrocarburos y asegurar que existan reservorios agotados adecuados para el almacenamiento.
Madurez de cuenca	El almacenamiento de CO ₂ se basa en tecnologías de la industria del petróleo. Se requiere una roca sello para evitar fugas y asegurar la retención a largo plazo.

En Colombia no se dispone de un atlas integral que compile información detallada sobre sitios aptos para almacenamiento. Sin embargo, es posible consultar atlas desarrollados por entidades nacionales o internacionales (Figura 41) así como guías metodológicas con criterios técnicos establecidos por organismos especializados. Aunque el país cuenta con un nivel avanzado de investigación geológica, gran parte de los estudios más específicos son de acceso restringido, ya que suelen ser gestionados por el sector privado o actores especializados.

Esta limitación afecta principalmente al contexto colombiano, donde no existe una base de datos unificada y pública. No obstante, en otros países especialmente aquellos con experiencia en almacenamiento geológico existen atlas consolidados y de libre acceso que podrían servir como referencia.

Así pues, se deja clara la necesidad de analizar el potencial geológico de almacenamiento de CO₂ dentro del territorio nacional, y un semillero para producir datos y mapas preliminares de cuencas prioritarias y promover la vinculación con actores industriales y gubernamentales para acelerar el desarrollo tecnológico y la toma de decisiones informadas.^{80 81 82 83}

⁸⁰ Machado, C. X., Rockett, G. C., Iglesias, R. S., & Ketzer, J. M. (2016). *Atlas brasileiro de captura e armazenamento*

geológico de CO₂. EDIPUCRS. <https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/12801>

⁸¹ Riis, F., & Halland, E. (2014). CO₂ storage atlas of the Norwegian Continental Shelf: Methods used to evaluate capacity and maturity of the CO₂ storage potential. *Energy Procedia*, 63, 5258–5265.

⁸² National Energy Technology Laboratory. (2015). *Carbon Storage Atlas (Fifth Edition)*. U.S. Department of Energy. <https://doi.org/10.2172/1814017>

⁸³ Secretaría de Energía y Comisión Federal de Electricidad. (2012). *Atlas de almacenamiento geológico de CO₂*:

México. <https://co2.energia.gob.mx/res/ATLAS%20FINAL.pdf>

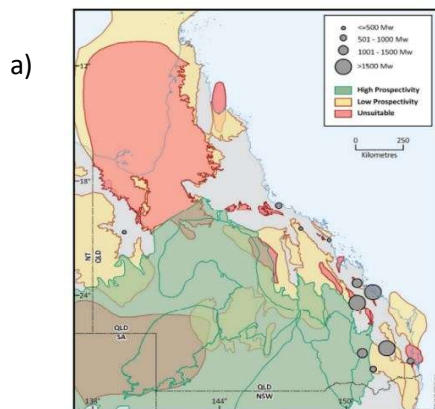
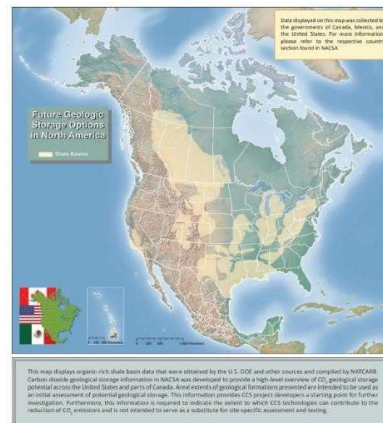


Figure 1: Geological storage prospectivity of onshore Queensland basins. Also shown are locations of major stationary CO₂ emission nodes scaled by total installed power station capacity (Mw).

b)



c)



Figura 36: Mapeamento de prospectividade para captura e armazenamento de CO₂.
Figura 36: Mapeamento de prospectividade para captura e armazenamento de CO₂.

d)

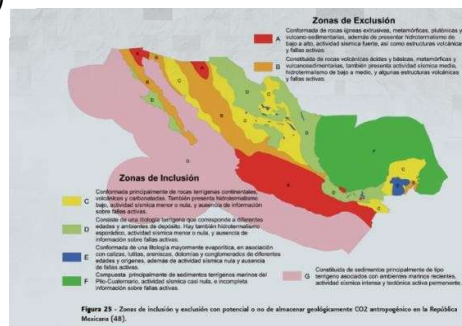


Figura 25 - Zonas de inclusión y exclusión con potencial o no de almacenar geológicamente CO₂ antropogénico en la República Mexicana (48).

Figura 41. Ejemplos de potencial almacenamiento geológico de CO₂. a) Atlas de almacenamiento del Mar del norte (Riis, F., & Halland, E. (2014).), b) Nacsa, Atlas de almacenamiento de CO₂ de América del norte (National Energy Technology Laboratory. (2015) c). Atlas de almacenamiento de CO₂ de Brasil (Machado, C. 2016) d) Atlas de almacenamiento geológico de CO₂ de México (SENER 2012).

6.5 Plataforma de tecnología (CCUSCo)

Difundir información actualizada sobre cambio climático, resiliencia comunitaria y transición energética es importante, ya que hay algunos problemas que surgen del desconocimiento de estos temas. Involucrar a todos los sectores de la sociedad en estos temas críticos es crucial para la protección de nuestra propia existencia.

La difusión del conocimiento científico y tecnológico debe cerrar las brechas de información, debe de asegurarse el acceso equitativo a todos los sectores. Promover la divulgación del saber cómo un derecho universal fortalece la toma de decisiones informadas, y también es un indicador del desarrollo y progreso de un país.

Con esto en mente, los objetivos de este sitio de libre acceso son proporcionar herramientas, metodologías e información para mejorar el conocimiento sobre la

tecnología de CCUS y sostenibilidad. Además, busca reducir brechas sectoriales y fomentar el diálogo entre diversos actores, facilitando la transición hacia un futuro más justo y sostenible.

Tabla 24. Objetivos y descripciones para la implementación de tecnologías CCUS y sostenibilidad. Tomado de Mota et al., (2023).

La comunicación efectiva de la ciencia es esencial para el desarrollo de las sociedades,

Objetivo	Descripción
Proveer herramientas y metodologías	Facilitar el acceso a recursos para el aprendizaje sobre CCS, CCUS y sostenibilidad.
Mejorar el conocimiento	Aumentar la comprensión de las tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCS).
Cerrar brechas sectoriales	Reducir las diferencias de conocimiento y acceso a la tecnología entre sectores, con énfasis en las políticas públicas de Colombia.
Promover el diálogo	Fomentar la colaboración entre distintos actores en la transición energética.
Facilitar la transición sostenible	Contribuir a la construcción de un futuro más justo y sustentable.

particularmente en países en vías de desarrollo, donde los avances científicos y tecnológicos son determinantes para el progreso. A pesar de la existencia de numerosas bases de datos y plataformas que recopilan el estado actual de tecnologías CCUS a nivel global, su accesibilidad sigue siendo limitada para el público general y sectores no especializados. (Figura 42) Los investigadores en estos países no enfrentan desafíos para identificar sitios donde publicar y compartir sus ideas, sino que los retos principales radican en diseminar conocimientos especializados a audiencias diversas, como tomadores de decisiones, industrias y comunidades, aunque no son los únicos responsables en su totalidad. Esto subraya la necesidad imperiosa de desarrollar plataformas y estrategias que centralicen la información científica, presentándola de forma accesible, y fomenten su comprensión y aplicación en contextos locales, como las políticas públicas de Colombia, para impulsar una transición energética inclusiva y sostenible.

Al priorizar la difusión de conocimientos hacia tomadores de decisiones, industrias y comunidades, se puede fomentar una aplicación práctica de estas tecnologías, fortaleciendo políticas públicas que promuevan un desarrollo sostenible e inclusivo, alineado con los desafíos climáticos actuales y las metas de reducción de emisiones.

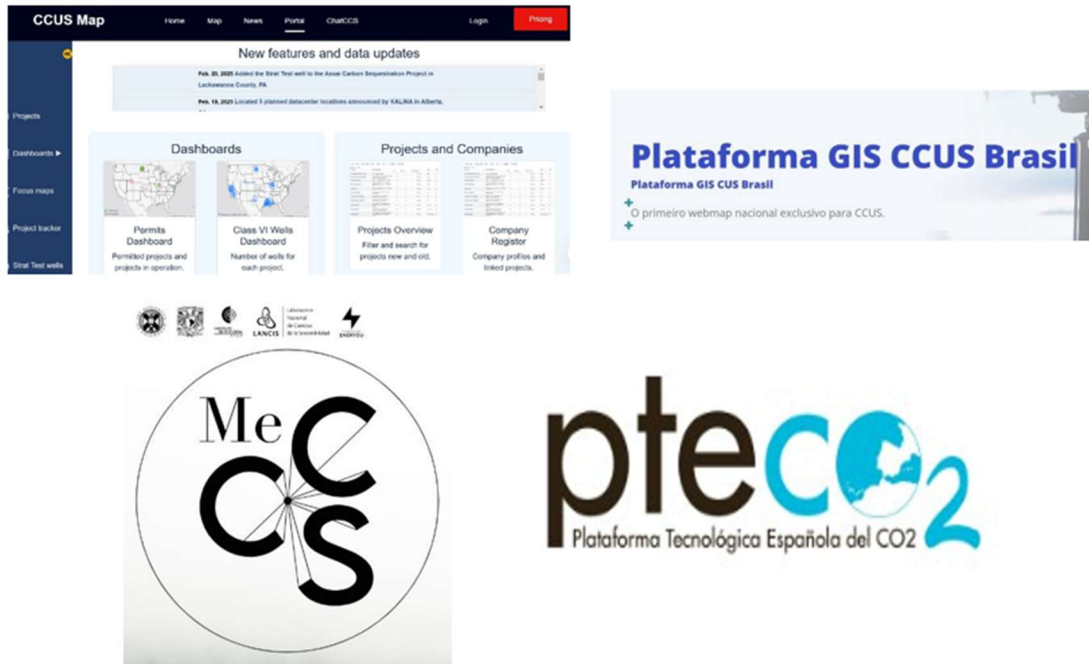


Figura 42. Ejemplos de plataformas para acceder a datos y otros datos relevantes sobre el estado actual del avance de la implementación de técnicas de reducción de GEI en España, Brasil, México y Estados Unidos.

7. Propuesta Preliminar de hoja de ruta tecnológica

La Figura 41 sintetiza la hoja de ruta nacional propuesta para el desarrollo de tecnologías CCUS en Colombia, con un horizonte no superior a 2030 como año de inicio de operaciones demostrativas a escala relevante. Se observa un desarrollo paralelo y deliberadamente superpuesto de las cuatro fases identificadas:

- (i) fase embrionaria – políticas públicas,
- (ii) planeación y ejecución técnica,
- (iii) escala comercial, y
- (iv) colaboración y coordinación.

La superposición entre la fase embrionaria y los estadios iniciales de planeación técnica responde a la necesidad de acelerar el despliegue en un contexto de madurez avanzada de los yacimientos petroleros colombianos y urgencia climática. La fase de políticas públicas presenta la mayor duración teórica debido al elevado número de instrumentos normativos, regulatorios e incentivos fiscales requeridos. Por su parte, el monitoreo, medición y verificación (MMV) se inicia únicamente tras la consolidación de proyectos piloto y plantas comerciales demostrables, extendiéndose de manera permanente más allá de 2030 como

requisito indispensable de seguridad operacional y cumplimiento internacional.

Conclusiones puntuales sobre esta propuesta

1. Estrategia de desarrollo paralelo (no secuencial)

A diferencia de países pioneros que siguieron una lógica estrictamente secuencial (regulación → caracterización → piloto → escalamiento), Colombia adopta un enfoque de desarrollo paralelo con superposición deliberada de las cuatro fases. Esta estrategia responde a dos factores críticos: el tiempo limitado hasta la meta de carbono neutralidad en 2050 y la ventana de oportunidad única que ofrecen los campos maduros y deplecionados de la industria petrolera nacional para implementar CO₂-EOR (recuperación mejorada de hidrocarburos), cuya rentabilidad parcial no puede esperar la perfección regulatoria o la caracterización exhaustiva de nuevos sitios.

2. Ventana crítica 2027-2028

El diagrama evidencia una concentración de riesgo y decisiones clave en el bienio 2027-2028, que representa el principal punto de inflexión de la hoja de ruta. Durante este período convergen:

Finalización y entrada en vigor del marco regulatorio integral (incluyendo normas de MMV, responsabilidad por almacenamiento y mecanismos de incentivos).

Lanzamiento de los primeros proyectos piloto comerciales o demostrativos a escala relevante.

Conformación operativa del Centro Nacional de CCUS y lanzamiento de la plataforma tecnológica CCUSCo.

Definición y avance inicial de la red de transporte de CO₂ (carbonoductos regionales para clústeres prioritarios).

Cualquier retraso significativo en la fase embrionaria (especialmente en regulación e incentivos) generaría un efecto dominó que comprometería la viabilidad de alcanzar capacidades de captura y almacenamiento demostrables hacia 2030, afectando la contribución de CCUS al cumplimiento de las metas sectoriales de la NDC y la Estrategia E2050.

3. La fase de “Colaboración y Coordinación” como eje transversal

El color morado que aparece desde 2025 y se mantiene hasta 2030 refleja una visión estratégica: la colaboración interinstitucional y público-privada no es una fase posterior, sino un requisito habilitante permanente y transversal. El éxito de CCUS en Colombia dependerá,

en mayor medida, de la capacidad de articulación efectiva entre MinEnergía, MinAmbiente, DNP, ANH, Ecopetrol, universidades, centros de investigación y sector privado, que de la disponibilidad técnica aislada.

4. Políticas públicas y aceptación social como habilitadores críticos

Las políticas públicas constituyen el fundamento de toda la hoja de ruta. El marco regulatorio (2025-2027), los incentivos fiscales y financieros, las normas de MMV y los mecanismos de responsabilidad por largo plazo son condiciones sine qua non para atraer inversión y reducir riesgos. Su ausencia o retraso bloquearía el avance técnico.

De igual forma, la aceptación y la licencia sociales para operar son indispensables. Sin una estrategia robusta de comunicación efectiva, participación pública genuina y generación de beneficios locales visibles (empleo, desarrollo regional, transparencia en monitoreo), los proyectos especialmente aquellos cercanos a comunidades enfrentarán oposición y retrasos. La divulgación continua y el acceso abierto a información (a través de plataformas como CCUSCo) deben ser prioridades desde la fase embrionaria para construir confianza y legitimidad social.

5. Viabilidad económica y complementariedad con otras medidas de mitigación

Aunque los costos de CCUS son comparables a los de energías renovables o nuclear en algunos contextos, su relevancia radica en que ofrece una solución para sectores de difícil abatimiento (refinerías, cemento, industria química, generación con gas).

Otras medidas de mitigación (expansión de renovables, eficiencia energética, electrificación, reforestación y manejo sostenible de suelos) tienen impactos importantes a bajo costo, pero son insuficientes por sí solas para descarbonizar completamente la industria pesada y el sector energético fósil residual.

La masificación del CCS/CCUS requiere concentrar y procesar a gran escala el CO₂ capturado de múltiples fuentes industriales en clústeres (refinerías, cemento, centrales eléctricas), generando volúmenes que justifiquen inversiones compartidas en recolección, compresión y transporte (carbonoductos). El CO₂ puede destinarse a:

CO₂-EOR, donde incrementa la producción de hidrocarburos en campos maduros, generando ingresos adicionales por venta de petróleo/gas recuperado que compensan parcialmente los costos del proyecto;

almacenamiento geológico permanente en sumideros adecuados (acuíferos salinos profundos, reservorios deplecionados o formaciones de carbón no explotables).

Estudios preliminares indican que el potencial de almacenamiento geológico en Colombia supera ampliamente las necesidades a 2030 (cientos de Mt a Gt en formaciones clave como el Valle Inferior del Magdalena, Cuenca de Sinú-San Jacinto y Llanos Orientales), por lo que la limitante no es la capacidad geológica, sino la velocidad de caracterización, regulación e inversión en infraestructura.

6. Rol del capital humano y colaboración multisectorial

La implementación efectiva de CCUS exige inversión sostenida en formación de capital humano especializado (geólogos, ingenieros de yacimientos, expertos en MMV, modeladores numéricos). Un semillero de investigación y la conformación del Centro Nacional CCUS pueden acelerar esta capacidad.

De lograrse una sinergia real entre academia, gobierno, industria y sociedad civil, Colombia podría sentar las bases técnicas, regulatorias y sociales para que CCUS contribuya de manera progresiva y significativa a la reducción de emisiones de GEI hacia 2030 y al avance hacia carbono neutralidad en 2050, siempre como parte de un portafolio amplio de medidas de mitigación.

La hoja de ruta tecnológica aquí propuesta proporciona una guía estructurada, basada en el análisis de experiencias internacionales y alineada con los objetivos nacionales de transición energética justa y sostenible.

Propuesta preliminar de hoja de ruta tecnológica CCUS en Colombia

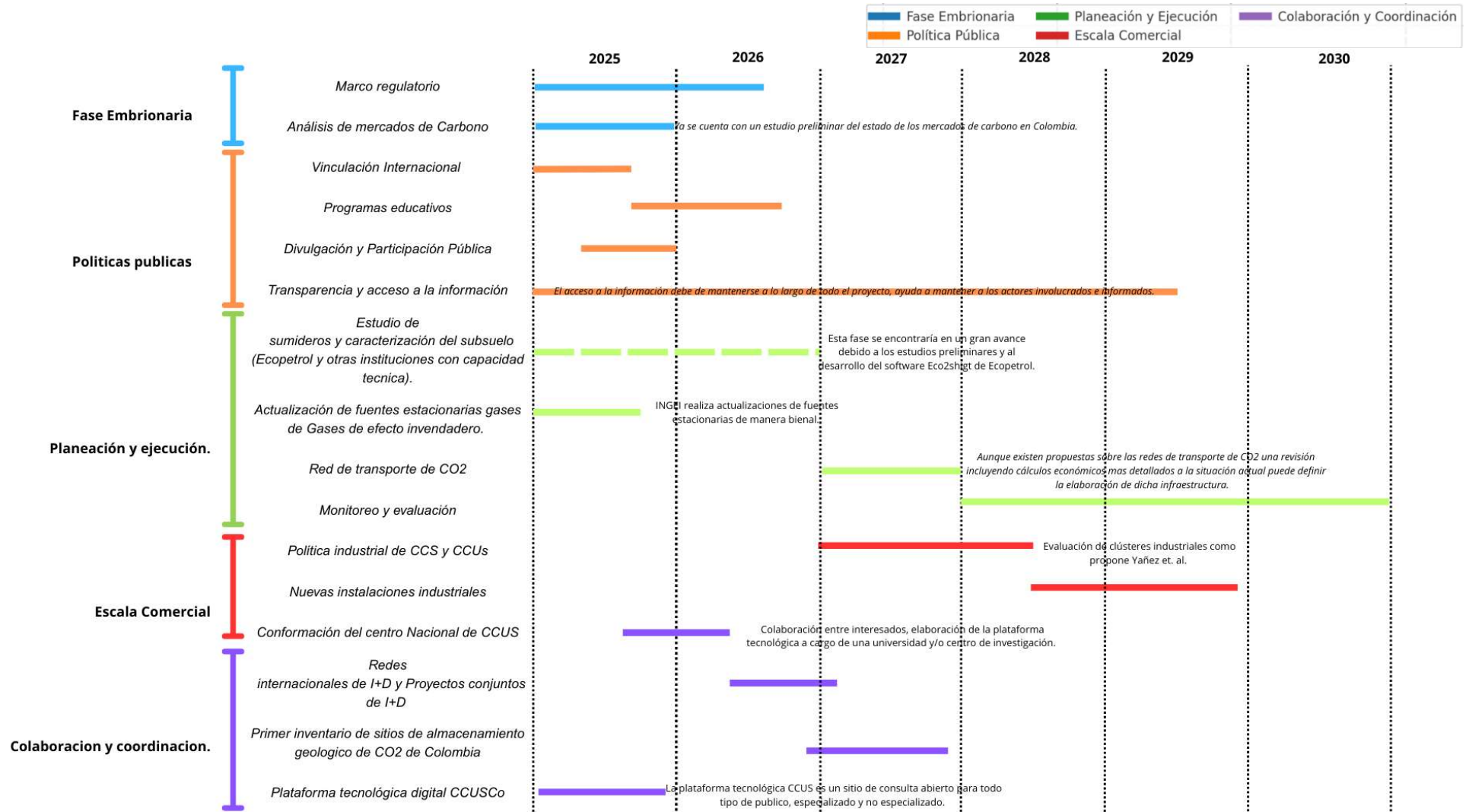


Figura 43. Diagrama esquemático de la hoja de ruta preliminar para la adopción de tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en Colombia (¿2025? -2030).

Conclusiones

Para muchos académicos y expertos, la implementación de CCUS en países en vías de desarrollo industrial como Colombia se considera poco viable debido a limitaciones económicas, ya que los costos de inversión son comparables a los de la generación de energía renovable y nuclear. Sin embargo, otras opciones de mitigación como las propuestas en la iniciativa E2050 (Tabla 2), incluyendo sumideros naturales (reforestación y restauración ecosistémica), soluciones basadas en la naturaleza (agroforestería y prácticas agrícolas regenerativas), y remociones tecnológicas emergentes (BECCS y DACCS) ofrecen impactos limitados a bajo costo, especialmente en sectores de difícil abatimiento como la industria pesada. Esto resalta la relevancia del CCUS y CCS como medios principales para la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente en horizontes a mediano y largo plazo. Desde una perspectiva geológica, el secuestro en medios subterráneos no depende de las condiciones climáticas locales ni compite con actividades como la agricultura, la pesca, otras industrias o el uso del suelo, enmarcándolo como una solución tecnológica con mayor potencial para su despliegue futuro.

El crecimiento económico de un país puede vincularse con las emisiones de GEI liberadas a la atmósfera. Un desarrollo económico sin industrialización es inviable, pero la creación de clústeres industriales especializados (como los propuestos en Figura 10 y Yáñez et al., 2021) puede permitir la captura y transporte de CO₂ en masa, integrándose con otras medidas de mitigación. La masificación del CCUS implica la concentración y procesamiento a gran escala del CO₂ capturado a partir de múltiples fuentes industriales dentro de un clúster como refinerías, plantas de cemento o centrales eléctricas para alcanzar volúmenes suficientes que justifiquen la inversión en infraestructura de transporte y almacenamiento. Esto incluye la consolidación de flujos de CO₂ en un único sistema de recolección, su compresión a alta presión para facilitar el traslado mediante carbonoductos (con capacidad estimada para ~5.9 MtCO₂/años viables en EOR, según Yáñez et al.), y su posterior distribución hacia aplicaciones de recuperación mejorada de petróleo (EOR) —que genera ingresos adicionales por hidrocarburos recuperados, compensando costos— o sumideros geológicos permanentes.

Para contextualizar su impacto, las emisiones actuales en sectores prioritarios para CCUS en Colombia representan ~30-40 Mt CO₂e/año (generación termoeléctrica: 11.9 Mt, refinación: 2.56 Mt, según Tabla 1 e INGEI 2018; ~65% del total industrial en Figura 11). Los sumideros geológicos evaluados ofrecen capacidades amplias (Formación Colorado en 101

VMM: 21.2 Gt dinámico; Porquero en VIM-SSJ: 1.75 Gt; Siamana en Guajira: 223 Gt, Figuras 28-30), superando con creces las necesidades a 2030. Los carbonoductos propuestos (Figura 33) podrían manejar estos volúmenes en clústeres, permitiendo que CCUS capture ~20-25% de emisiones sectoriales y contribuya significativamente al escenario de cero emisiones netas.

Los marcos regulatorios, el diseño de instalaciones industriales, los métodos de almacenamiento y transporte, así como el desarrollo de metodologías para la caracterización de sitios de almacenamiento, han sido ampliamente estudiados a nivel mundial. Sin embargo, el éxito y adopción de estos proyectos depende del trabajo colaborativo y de una comunicación efectiva entre academia, industria, sociedad y gobierno. En particular, las políticas públicas como las campañas de sensibilización, programas educativos (Sección 3.2-3.4) y mecanismos de transparencia (Sección 3.5) son esenciales para fomentar la aceptación social, construyendo confianza a través de divulgación (plataformas como CCUSCo) y participación pública, evitando oposición y asegurando legitimidad social.

La colaboración interinstitucional entre la academia, el gobierno y la industria es necesaria para transformar conceptos en soluciones prácticas. La inversión en capital intelectual a través de semilleros de investigación y centros como el Laboratorio de Gases Asociado al Carbón (UPTC)—generará beneficios directos para los profesionales responsables de la supervisión técnica del desarrollo de nuevas aplicaciones industriales. De lograrse esta sinergia, Colombia podría sentar las bases para definir estrategias viables que permitan reducir sus emisiones de GEI en una fase inicial hacia 2030 (~10 Mt CO₂ año potencial en clústeres piloto), avanzando progresivamente hacia la meta de cero emisiones netas en 2050. Aunque la HRT propuesta inicia en 2025 y es incipiente en 2026 (con avances como el decreto de 2021 sobre Ley 2099), prioriza la formación de personal capacitado para superar barreras y acelerar la implementación.

El establecimiento de un orden lógico y un flujo de trabajo estructurado garantiza que las tareas asignadas estén debidamente justificadas dentro del marco normativo de cada país y región. La hoja de ruta tecnológica proporciona una guía basada en el análisis de otras hojas de ruta y en los objetivos para los cuales fueron diseñadas, facilitando la planificación y ejecución de estrategias efectivas.

Referencias.

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
2. International Energy Agency (IEA). (2020). *CCUS in clean energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transition>
3. Yao, J., Han, H., Yang, Y., Song, Y. y Li, G. (2023). A Review of Recent Progress of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in China. *Applied Sciences*, 13 (2), 1169. <https://doi.org/10.3390/app13021169>
4. International Energy Agency (IEA). (2023). *CO₂ Capture and Utilisation: A Vital Part of the Net Zero Pathway*. París: IEA. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/co2-capture-and-utilisation>
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Industry*. En *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 739–810). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
6. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (n.d.). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia (BUR3)*. Recuperado de <https://www.andi.com.co/Uploads/BUR3%20-%20COLOMBIA.pdf>
7. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.ideam.gov.co>
8. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2022). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia*. Gobierno de Colombia. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co>
9. Yáñez, E., Olaya, Y., López, J., & Rodríguez, D. (2021). Exploring the potential of carbon capture and storage-enhanced oil recovery as a mitigation strategy in the Colombian oil industry. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104028. Recuperado de <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2654>
10. Ministerio de Minas y Energía de Colombia & Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2021). *Convenio de Cooperación Internacional GGC No. 632 de 2021*. Colombia
11. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f). *Estrategia 2050: Estrategia de Largo Plazo para la Resiliencia Climática y la Carbono Neutralidad de Colombia*. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climático-y-gestión-del-riesgo/estrategia-2050/>
12. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022). *Proyecto de Decreto sobre Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS)*. Recuperado de https://www.minenergia.gov.co/documents/8470/220804_-_vF_Proyecto_Decreto_CCUS_V6_Para_publicar.pdf
13. Mariño-Martínez, J. E., & Moreno-Reyes, L. E. (2018). Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) en Colombia – caso Tauramena (Casanare). *Boletín de Geología*, 40(1), 109–122. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018007>
14. Wilberforce, T., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (2021). Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment*, 761, 143203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>
15. Kostoff, R. N., & Schaller, R. R. (2001). Science and technology roadmaps. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(2), 132–143. <https://doi.org/10.1109/17.922473>
16. EFI Foundation. (2022). *CO₂-Secure: A national program to deploy carbon removal at gigaton scale*. Energy Futures Initiative. Recuperado de <https://efifoundation.org/reports/co2-secure-a-national-program-to-deploy-carbon-removal-at-gigaton-scale/>
17. International Energy Agency (IEA). (2020). *CCUS in clean energy transitions*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>
18. Asian Development Bank. (2019). *Road map update for carbon capture, utilization, and storage demonstration and deployment in the People's Republic of China*. Recuperado de <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/814386/road-map-update-carbon-capture-utilization-storage-prc.pdf>
19. Saeki, T. (2023). *Japan's Long-Term Roadmap for CCS*. Asia CCUS Network - ERIA. Recuperado de

- https://www.asiaccusnetwork-eria.org/s/S3-3_Saeki_230924_%E3%80%90ACNF3%E3%80%91%20Japan%27s%20Long-Term%20Roadmap.pdf
20. Umweltbundesamt. (2023). Carbon Capture and Storage in the Global Climate Debate. Recuperado de https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/ccs_in_the_global_climate_debate_policy_brief.pdf
21. International Energy Agency. (2016). 20 years of carbon capture and storage: Accelerating future deployment. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/20-years-of-carbon-capture-and-storage>
22. U.S. Department of Energy. (2022). Carbon Transport and Storage Multi-Year Program Plan. Recuperado de <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/Carbon%20Transport%20and%20Storage%20Multi-Year%20Program%20Plan.pdf>
23. Government of Canada. (2021). Canada's Carbon Management Strategy. Natural Resources Canada. Recuperado de <https://natural-resources.canada.ca/energy-sources/carbon-management/canadas-carbon-management-strategy>
24. Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). (2024). Hubs de CCUS no Brasil: Construindo Cenários, Superando Barreiras. Recuperado de <https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2024/03/CCUS-Brazil-WP-PT-vf.pdf>
25. Secretaría de Energía. (2018). Mapa de Ruta Tecnológica CCUS. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener/documentos/mapa-de-ruta-tecnologica-ccus>
26. International Energy Agency (IEA). (2022). Legal and regulatory frameworks for CCUS: An IEA CCUS handbook. Retrieved from <https://cdrlaw.org/wp-content/uploads/2022/10/LegalandRegulatoryFrameworksforCCUS-AnIEACCUSHandbook.pdf>
27. International Energy Agency (IEA). (2023). Legal and regulatory frameworks for CCUS. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/legal-and-regulatory-frameworks-for-ccus>
28. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Acuerdo de París. Conferencia de las Partes en su 21.º período de sesiones, París, 30 de noviembre a 11 de diciembre de 2015. FCCC/CP/2015/10/Add.1. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_spanish.pdf
29. European Union. (2009). Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council on the geological storage of carbon dioxide. Official Journal of the European Union. Recuperado de <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00114-00135.pdf>
30. International Organization for Standardization (ISO). (n.d.). ISO/TC 265 - Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage. Recuperado de <https://www.iso.org/es/committee/648607/x/catalogue/>
31. U.S. Environmental Protection Agency. (2012). Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Construction Guidance. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa816r11020.pdf>
32. Energy Futures Initiative (EFI). (2022). Optionality, flexibility & innovation: Pathways for deep decarbonization in the United States. Recuperado de https://energyfuturesinitiative.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/OptionalityFlexibilityInnovation_Report_compressed.pdf
33. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Los mercados de carbono. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/05/12_2020_FICHA_INFORMATIVA_4_Los-mercados-de-carbono_compressed-1.pdf
34. Clean Air Task Force (2023). Mapeo del costo de la captura y almacenamiento de carbono en Europa. Recuperado de <https://www.catf.us/es/2023/02/mapping-cost-carbon-capture-storage-europe/>
35. European Commission. (n.d.). EU emissions trading system (EU ETS). Recuperado de https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en.
36. Environmental Defense Fund (EDF). (n.d.). Mercado de carbono de California: Segundo año – Resumen ejecutivo. Recuperado de <https://www.edf.org/sites/default/files/content/carbonmarketcaliforniayeartwoexecutivesummary-spanish.pdf>
37. Iniciativa Finanzas Carbono. (n. d.). Estándar Verified Carbon Standard (VCS). <https://finanzascarbono.org/mercado-voluntario/acerca/estandares/vcs/>

38. International Carbon Action Partnership (ICAP). (s. f.). Acerca de ICAP. <https://icapcarbonaction.com/en/about-icap>
39. International Energy Agency (IEA). (2024). CCUS in Clean Energy Transitions: Technology Deep Dive. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>
40. Global CCS Institute (GCCSI). (2023). Global Status of CCS 2023. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2023-executive-summary/>
41. Banco Mundial. (2023). Economic Review: Latin America and the Caribbean – October 2023. Office of the Chief Economist for Latin America and the Caribbean. <https://www.worldbank.org/en/region/lac/publication/perspectivas-economicas-america-latina-caribe>
42. International Energy Agency (IEA). (2023). CCUS Projects Database and Lessons Learned. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>
43. International Energy Agency. (2021). Net Zero by 2050. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
44. Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). (2023). CCUS Hub Playbook: Accelerating industrial decarbonization. Recuperado de <https://www.ogci.com/news/ogci-updates-ccus-hub-playbook-and-expands-access-to-help-accelerate-industrial-decarbonization>
45. Gale, J., & Christensen, N. P. (2004). Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects. *Energy*, 29(9-10), 1361-1369. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.104>
46. U.S. Department of Energy. (2023). Carbon Capture Simulation Initiative (CCSI). Recuperado de <https://www.energy.gov/fecm/carbon-capture-simulation-initiative>
47. Miller, D. C., Syamlal, M., Mebane, D. S., Storlie, C., Bhattacharyya, D., Sahinidis, N. V., Agarwal, D., Tong, C., Zitney, S. E., Sarkar, A., Sun, X., Sundaresan, S., Ryan, E., Engel, D., & Dale, C. (2014). Carbon Capture Simulation Initiative: a case study in multiscale modeling and new challenges. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 5, 301–323. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060713-040321>
48. SSE Thermal & Equinor. (n.d.). Peterhead low carbon power station. Recuperado de <https://peterheadlowcarbon.consultation.ai/>
49. Shell. (2015). Peterhead CCS Project. Recuperado de <https://www.shell.co.uk/sustainability/decommissioning/peterhead-ccs-project.html>
50. Cotton, A., Gray, L., & Maas, W. (2016). Learnings from the Shell Peterhead CCS Project Front End Engineering Design. *Energy Procedia*, 114, 5661-5670. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1717>
51. CO2GeoNet. (2023). CO2GeoNet: The European Network of Excellence on the Geological Storage of CO₂. Recuperado de <https://www.co2geonet.com>
52. Czernichowski-Lauriol, I., Berenblyum, R., Bigi, S., Car, M., Liebscher, A., Persoglia, S., Wildenborg, T. (2017). CO2GeoNet Perspective on CO₂ Capture and Storage: A Vital Technology for Completing the Climate Change Mitigation Portfolio. *Energy Procedia*, 114, 7480–7491. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.188 comprendía región.
53. Bachu, S., et al., (2012). North American Carbon Storage Atlas: A Foundation for Carbon Capture, Utilization, and Storage Deployment. *Energy Procedia*, 37, 5656-5662. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.497
54. Hatimondi, S. A., Musse, A. P. S., Melo, C. L., Dino, R., & Moreira, A. C. A. (2011). Initiatives in Carbon Capture and Storage at PETROBRAS Research and Development Center. *Energy Procedia*, 4, 6099-6103. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.616x>
55. International agency of energy (2023). CCUS policies and business models: Building a commercial market. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/ccus-policies-and-business-models_6ef05538-en.html
56. Whetsell, T. A., Jonkers, K., Dimand, A.-M., Baas, J., & Wagner, C. S. (2019). Democracy, Complexity, and Science: Exploring Structural Sources of National Scientific Performance. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.04468>
57. Nariño. A (2017). Diseño de políticas públicas e ingeniería de sistemas sociales: políticas públicas como artefactos de diseño de ingeniería. *Revista de Ingeniería*, (45), 52-61. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/feb73f57-4407-442b-a2f3-a071ff508705>

58. Science. (2017). *The science–policy interface: The place of scientific evidence in public policymaking*. *Science*, 355(6320), 145–146. <https://doi.org/10.1126/science.aai8837>
59. Gregersen Hermans, J. (2021). *toward a curriculum for the future: synthesizing education for sustainable development and internationalization of the curriculum*. *Journal of Studies in International Education*. <https://doi.org/10.1177/10283153211031033>
60. <https://pangea.stanford.edu/departments/ere>
61. Gouëdard, Pierre & Pont, Beatriz & Hyttinen, Susan & Huang, Pinhsuan. (2020). *Curriculum reform: A literature review to support effective implementation*. 10.1787/efe8a48c-en.
62. Mota, N., Sánchez, J., & López, M. (2023). "The Mexican Carbon Capture and Storage Platform: Construction of a boundary object for bridging the gaps between contexts, actors, and disciplines" ("The Mexican Carbon Capture and Storage Platform - ScienceDirect")
63. MECCS México. (s.f.). *Inicio. MECCS México*. <https://meccs.org.mx/es/>
64. Plataforma Tecnológica Española de CO₂. (s.f.). *Inicio. PTECO₂*. <https://www.pteco2.es/es>
65. CO₂Degrees. (s.f.) *Home. CO₂Degrees*. <https://co2degrees.com/>
66. Japan CCS Co., Ltd. (s.f.). *Kids. Japan CCS*. <https://www.japanccs.com/en/kids/>
67. Sitinjak, C., Ebennezer, S., & Ober, J. (2023). *Exploring Public Attitudes and Acceptance of CCUS Technologies in JABODETABEK: A Cross-Sectional Study*. *Energies*, 16(10), 4026. <https://doi.org/10.3390/en16104026>
68. Cavanagh, A., & van der Meer, L. (2015). *Algorithms for CO₂ Storage Capacity Estimation: Review and Case Study*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 180-188.
69. Sánchez de la Vega, A., & Dávila, M. (2024). *Methodology to estimate the geological storage capacity of CO₂ in mature hydrocarbon fields*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 76 (1) / A201223 / 2024 /.
70. Servicio Geológico Colombiano. (2023). *Plan estratégico de conocimiento geocientífico y nuclear 2023–2032*. Bogotá, Colombia. <https://www.sgc.gov.co>
71. Ecopetrol. (2022). *Estrategia de descarbonización de Ecopetrol: Hoja de ruta hacia cero emisiones netas al 2050*. <https://www.ecopetrol.com.co>
72. Ecopetrol. (2022). *ECO2SIGHT análisis espacial para optimización de evaluación de tecnologías de descarbonización en Ecopetrol*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/357753612_ECO2SIGHT_ANALISIS_ESPACIAL_PARA_OPTIMIZACION_DE_EVALUACION_DE_TECNOLOGIAS_DE_DESCARBONIZACION_EN_ECOPETROL
73. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2023). *Atlas del estado actual del almacenamiento geológico de CO₂ en Colombia. Eco2Sight Project*. https://www.anh.gov.co/documents/29509/Atlas_CO2_Espanol_Interactivo.pdf
74. Knoope, M. M. J., Guijt, W., Ramírez, A., & Faaij, A. P. C. (2014). *Improved cost models for optimizing CO₂ pipeline configuration for point-to-point pipelines and simple networks*. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 20, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.10.009>
75. Canadian consulting Engineering awards. (2016) *Boudary Dam Integrated Carbon Capture Storage project*. *Natural Resources, Mining, industry, Energy*.
76. Agencia Internacional de Energía. (2024). *CCUS en las transiciones hacia la energía limpia: Acelerando el despliegue*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/accelerating-deployment>
77. Gunawan, T. A., Gittoes, L., Isaac, C., Greig, C., & Larson, E. (2024). *Design Insights for Industrial CO₂ Capture, Transport, and Storage Systems*. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c05484>
78. Villalba Cuéllar, J. C., & González Serrano, A. (2017). *La importancia de los semilleros de investigación*. *Prolegómenos*, 20(39), 1-5.
79. Domínguez, C. A., Gómez, D., & Villegas, S. (2022). *Pre-feasibility studies of CO₂ storage: A summary of two years of studies in Colombia and their challenges in light of worldwide projects and pilots*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/386044575>.
80. Bachu, S. (2000). *Sequestration of CO₂ in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change*. *Energy Conversion and Management*, 41(9), 953–970.
81. Machado, C. X., Rockett, G. C., Iglesias, R. S., & Ketzer, J. M. (2016). *Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO₂*. EDIPUCRS. <https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/12801>

82. Riis, F., & Halland, E. (2014). *CO₂ storage atlas of the Norwegian Continental Shelf: Methods used to evaluate capacity and maturity of the CO₂ storage potential*. *Energy Procedia*, 63, 5258–5265.
83. National Energy Technology Laboratory. (2015). *Carbon Storage Atlas (Fifth Edition)*. U.S. Department of Energy. <https://doi.org/10.2172/1814017>
84. Secretaría de Energía y Comisión Federal de Electricidad. (2012). *Atlas de almacenamiento geológico de CO₂: México*. <https://co2.energia.gob.mx/res/ATLAS%20FINAL.pdf>