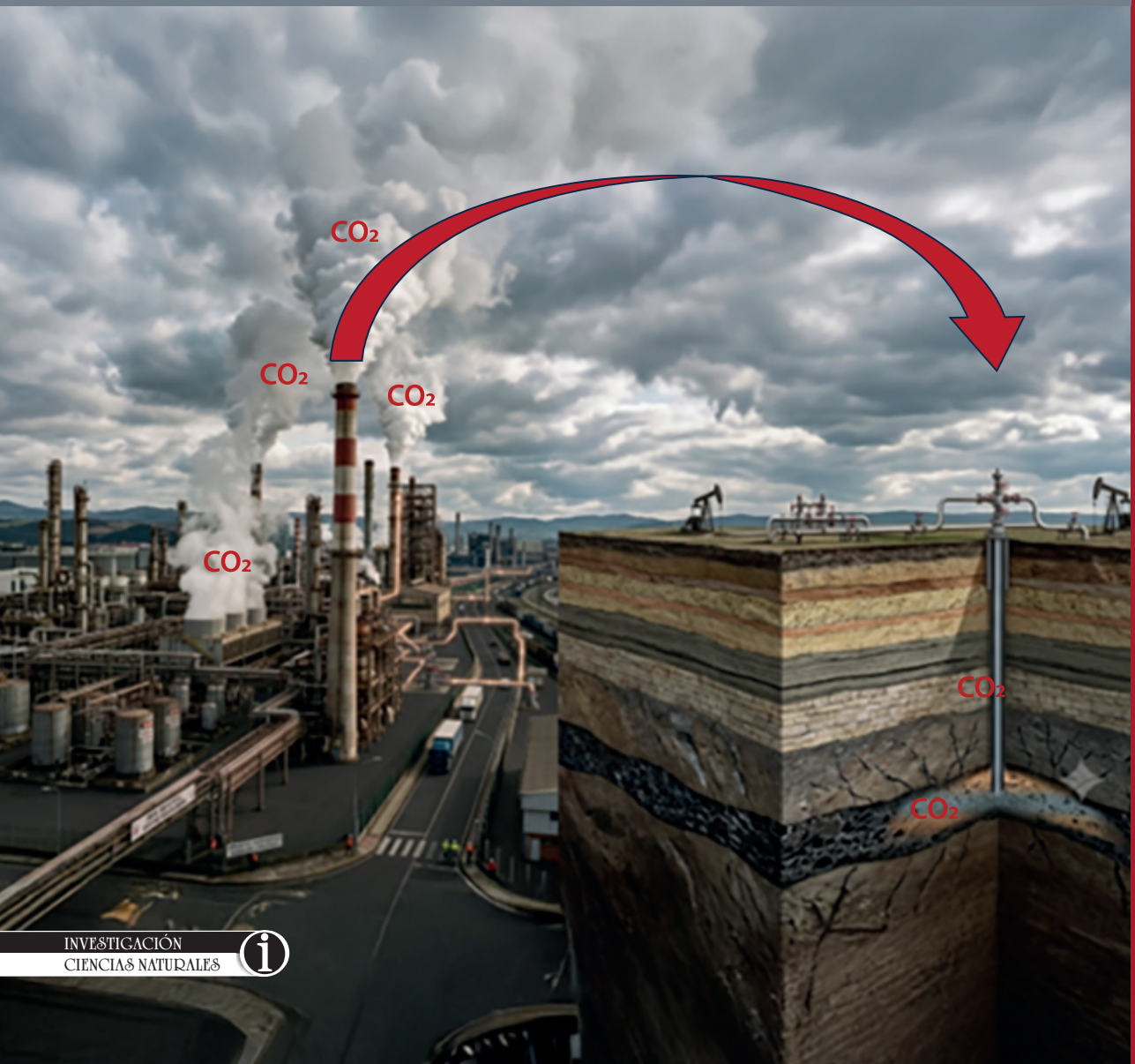
Jorge Eliécer Mariño Martínez
Brayan Alejandro Rojas Torres
José Manuel Camacho Rodríguez

Captura y almacenamiento de CO_2 en el subsuelo (CAC)

Estudio de caso: Sogamoso (Colombia)



INVESTIGACIÓN
CIENCIAS NATURALES

Jorge Eliecer Mariño Martinez

Profesor titular de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Ingeniero Geólogo de la UPTC. Magíster en Geología de la Universidad de Brigham Young (Utah). Doctorado en Geología de la Universidad de Illinois (EE.UU.) a través del programa Fullbright.

Ha sido director de Investigaciones (CIFAS) de la UPTC sede Sogamoso, consejero ante el Consejo de Geociencias de Min Ciencias, representante de la UPTC ante la Red Nacional de Laboratorios de Geociencias RNLG, y representante de las universidades públicas ante la UNGRD.

jorge.marino@uptc.edu.co

https://orcid.org/0000-0001-5105-2095

Brayan Alejandro Rojas Torres

Ingeniero Geólogo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC y Tecnólogo en Instrumentación del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Estudiante de maestría en Oil and Gas Engineering en la Memorial University of Newfoundland (Canada). Es investigador del grupo Ingeolog y de EAGE ACGGP, y sus intereses de investigación incluye la geología del petróleo y las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento geológico del carbono (CCUS). Trabajo como petrografo en CDT Mineral y como ingeniero geólogo en WER Ingeniería SAS.

brayan.rojas07@uptc.edu.co

https://orcid.org/0009-0000-8230-8970

José Manuel Camacho Rodríguez

Ingeniero Geólogo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y empresario colombiano. Participó activamente en el Grupo de Investigación EAGE ACGGP, fortaleciendo sus conocimientos en geociencias y promoviendo el intercambio académico en temas relacionados con la exploración y caracterización del subsuelo.

jose.camacho01@uptc.edu.co

https://orcid.org/0009-0002-6715-1850



EDITORIAL UPTC

Captura y almacenamiento de CO_2 en el subsuelo (CAC)

Estudio de caso: Sogamoso (Colombia)

Jorge Eliécer Mariño Martínez
Brayan Alejandro Rojas Torres
José Manuel Camacho Rodríguez

Uptc®
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
VIGILADA MINEDUCACIÓN

EDITORIAL UPTC

Captura y almacenamiento de CO_2 en el subsuelo (CAC)

Estudio de caso: Sogamoso (Colombia)

Jorge Eliécer Mariño Martínez
Brayan Alejandro Rojas Torres
José Manuel Camacho Rodríguez

INGEOLOG

GRUPO DE INVESTIGACIÓN INGENIERÍA GEOLÓGICA UPTC SOGAMOSO

ENFOQUE: Investigación
ÁREA OCDE: Ciencias Naturales
Disciplina: Geociencias
Colección N°. 363

Captura y almacenamiento de CO_2 en el subsuelo (CAC) – Estudio de caso: Sogamoso (Colombia)

CO_2 Capture and Storage in the Subsurface (CAC) – Case Study: Sogamoso (Colombia)

Primera Edición, 2026
Versión digital

© Jorge Eliécer Mariño Martínez,2026
© Bryan Alejandro Rojas Torres, 2026
© José Manuel Camacho Rodríguez, 2026
© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2026

ISBN (Pdf) 978-628-7863-95-8

Proceso de arbitraje doble ciego
Recepción: junio de 2025
Aprobación: abril de 2026

Hecho en Colombia - Made in Colombia

Captura y almacenamiento de CO2 en el subsuelo (CAC) – Estudio de caso: Sogamoso (Colombia) /Capture and Storage in the Subsurface (CAC) – Case Study: Sogamoso (Colombia) / Mariño Martínez, Jorge Eliécer; Rojas Torres, Bryan Alejandro; Camacho Rodríguez, José Manuel. Tunja: Editorial UPTC, 2026. 189 p.

ISBN (Pdf) 978-628-7863-95-8

Incluye referencias bibliográficas

1. Captura de CO2. 2. Almacenamiento. 3. Trampa geológica. 4. CAC. 5. Contaminación atmosférica. 6. Mitigación.
(Dewey 363.7/21) (THEMA RNPG – Cambio climático)

Rector UPTC
Enrique Vera López

Comité Editorial
Carlos Mauricio Moreno Téllez
Vicerrector de Investigación y Extensión

Yolanda Torres Pérez
Directora de Investigaciones

Óscar Pulido Cortés
Delegado Vicerrectoría Académica

Martín Orlando Pulido Medellín
Representante Área Ciencias Agrícolas

Yolima Bolívar Suárez
Representante Área Ciencias Médicas y de la Salud

Nelsy Rocío González Gutiérrez
Representante Área Ciencias Naturales

Olga Yanet Acuña Rodríguez
Representante Área Ciencias Sociales

Juan Guillermo Díaz Bernal
Representante Área Humanidades

Pilar Jovanna Holguín Tovar
Representante Área Artes

Edgar Nelson López López
Representante Área Ingeniería y Tecnología

Juan Sebastián González Sanabria
Representante Grupos de Investigación

Editora
Bertha Ramos Holguín

Corrección de Estilo
Claudia Helena Amarillo Forero

Asesor de arte e imagen
Pedro Alexander Sosa Gutiérrez

Imagen de carátula
Generada con Midjourney

Diseño y Diagramación
Aura Patricia Sarmiento Hernández

Libro de investigación

Citar este libro / Cite this book
Mariño-Martínez, J; Rojas-Torres, B., Camacho-Rodríguez, J. (2026). *Captura y almacenamiento de CO_2 en el subsuelo (CAC) – estudio de caso: Sogamoso (Colombia)*. Editorial UPTC.
doi.org/10.19053/uptc.9786287863958

Libro financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Editorial UPTC
La Colina, Bloque 7, Casa 5
Avenida Central del Norte No. 39-115, Tunja, Boyacá
comite.editorial@uptc.edu.co
https://editorial.uptc.edu.co

Resumen

Ante la suficiente evidencia científica de que el cambio climático está relacionado con el aumento en la atmósfera de los gases de efecto invernadero (GEI), que son debidos principalmente a las emisiones del dióxido de carbono (CO_2), el propósito de este libro es exponer los principios básicos de una de las estrategias de mitigación conocida como captura y almacenamiento de CO_2 en el subsuelo (CAC), en la que se retiene el CO_2 generado por plantas industriales como termoeléctricas, plantas de cemento, acero, campos de hidrocarburos y refinerías. El CAC es un proceso cuyo objetivo es captar el CO_2 emitido por la industria, enviarlo a una trampa geológica de almacenamiento y aislarlo de la atmósfera por un largo tiempo. En décadas recientes, el método CAC ha evolucionado a CAUC o captura, almacenamiento y uso del CO_2, porque cuando este se introduce en el subsuelo, además de almacenar un porcentaje, se puede utilizar para "empujar" los hidrocarburos que no se han conseguido extraer por métodos convencionales. Esta técnica se conoce como recuperación secundaria de petróleo (EOR).

Este libro presenta los principios básicos de CAUC, también revisa y plantea posibles locaciones de trampas geológicas y sus probables integraciones con fuentes de emisiones, y hace aproximaciones técnico-económicas a un potencial proyecto piloto en Colombia. Adicionalmente, este texto aborda los aspectos económicos y legales que se deberían tener en cuenta para un desarrollo exitoso de un proyecto CAUC.

Considerando que una vez el CO_2 es inyectado en el subsuelo es necesario hacer un seguimiento a la trampa, se explican, por lo tanto, los

diferentes sistemas de monitoreo del almacenamiento. Un capítulo aborda los criterios de selección de sitios para la captura y almacenamiento de CO_2 y los costos respectivos. En la parte final se examinan las cuencas o clústeres con mayor potencial para proyectos CAUC en Colombia: Llanos, Barrancabermeja y Sogamoso, y se selecciona este último para un análisis más detallado en los últimos capítulos. En estos se presentan inicialmente los aspectos geológicos del proyecto CAUC-Sogamoso y luego se discuten los elementos de ingeniería asociados.

Palabras clave: captura de CO_2, almacenamiento, trampa geológica, CAC, contaminación atmosférica, mitigación.

Abstract

Since there is sufficient scientific evidence that climate change is linked to rising atmospheric emissions of greenhouse gases (GHGs), primarily carbon dioxide (CO_2), the aim of this book is to present the basic principles of one of the mitigation strategies known as underground CO_2 capture and storage (CCS), which captures the CO_2 generated by industrial plants such as thermal power plants, cement plants, steel mills, hydrocarbon fields, and refineries. CCS is a process that focuses on capturing CO_2 emitted by industry, sending it to a geological storage trap, and isolating it from the atmosphere for a long time. In recent decades, the CCS method has evolved into CCUS, or CO_2 capture, storage, and utilization, because when CO_2 is injected underground, in addition to storing a portion of it, it can be used to "push" hydrocarbons that cannot be extracted using conventional methods. This technique is known as enhance oil recovery (EOR).

This book not only presents the basic principles of CCUS but also reviews and proposes possible geological trap locations and their integration with emission sources. It also presents technical and economic approaches to a potential pilot project in Colombia. Additionally, the book presents the economic and legal aspects that must be taken into account for the successful development of a CAUC project.

Given that once CO_2 is injected into the subsurface, it is necessary to monitor the storage site, the various storage monitoring systems are therefore explained. A chapter addresses the site selection criteria for CO_2 capture and storage, along with their respective costs. The final section

discusses the basins or clusters with the greatest potential for CAUC projects in Colombia: Llanos, Barrancabermeja, and Sogamoso. The latter is selected for more detailed analysis in the final chapters. The geological aspects of the Sogamoso CAUC project are first presented, followed by a discussion of the associated engineering elements.

Keywords: CO_2 capture, storage, geological trap, CCS, Air pollution, mitigation.

Contenido

1 Introducción.....17
2 Fundamentos teóricos de la captura de CO_2.....25
2.1 Aspectos geológicos de las trampas de hidrocarburos.....26
2.2 CAC o captura y almacenamiento de CO_2 (CCS - Carbon Capture and Storage).....28
2.3 CAUC o captura, uso y almacenamiento de CO_2 (CCUS - Carbon Capture Use and Storage).....32
2.4 El CO_2 como materia prima para utilización en procesos industriales y químicos 35
2.5 El CCUS como parte de un sistema petrolero total (SPT) 36
2.6 Análisis.....37
3 Principales fuentes emisoras de CO_2 con posibilidades de captura.....39
3.1 Termoeléctricas. 41
3.2 Plantas de cemento. 42
3.3 Acerías o plantas de producción de acero 45
3.4 Refinerías de petróleo 46
3.5 Campos petrolíferos 48
3.7 Mantos-minería del carbón. 52
4 Transporte del CO_2 desde la fuente al almacenamiento 57
4.1 Tuberías o carbonoductos.....57
4.2 Buques 58
4.3 Camiones cisterna (pipas). 59
4.4 Trenes.....60
5 Sitios geológicos de almacenamiento de CO_2.....65
5.1 Reservorios de petróleo agotados. 65

5.2 Reservorios de gas agotados 69
5.3 Acuíferos salinos profundos. 71
5.4 Mantos de carbón 73
5.5 Sistema integrado de almacenamiento como parte de un sistema petrolero total (SPT) 74

6 Tipos de trampas geológicas o formas de retención del CO_2 77

6.1 Trampas estructurales 80
6.2 Trampas estratigráficas 81
6.3 Trampa hidrodinámica 81
6.4 Trampa residual 85
6.5 Trampa por solubilidad. 86
6.6 Trampa mineral 88
6.7 Trampa por adsorción 89
6.8 Análisis 91

7 Monitoreo del almacenamiento del CO_2 93

7.1 Monitoreo geofísico. 97
7.2 Monitoreo geoquímico 97
7.3 Monitoreo geodésico 98
7.4 Estudios sísmicos 98
7.5 Estudios geológicos y de ingeniería 98
7.6 Modelos geológicos detallados. 98
7.7 Casos de estudio de monitoreo de CO_2 99

8 Criterios y ruta tecnológica para determinar la factibilidad de un proyecto de CCUS 105

8.1 Marco teórico 107
8.2 Incubación 108
8.3 Política pública 108
8.4 Planeación y ejecución 109
8.5 Fases de escala piloto y demostrativa 110
8.6 Escala comercial 110
8.7 Mecanismos de financiamiento e incentivos 110
8.8 Colaboración y coordinación 111

9 Costos 113

9.1 El Clúster 1-Barrancabermeja 118
9.2 El Clúster 2-Putumayo 118
9.3 El Clúster 3-Cartagena 118
9.4 El Clúster 4-Valle del Cauca 118

9.5 El Clúster 5-Llanos 118
10 Legislación 121
11 Elección de los mejores sitios para proyectos de CAUC-EOR en Colombia 127
11.1 Cuenca Llanos 127
11.2 Clúster de Barrancabermeja. 131
11.3 Clúster de Sogamoso 134
11.4 Análisis 137
12 Aspectos geológicos del proyecto CAUC-EOR Sogamoso 139
12.1 Ubicación 140
12.2 Descripción geológica 142
12.3 Geoquímica 149
12.4 Evaluación petrofísica y de recursos y geología del petróleo 151
13 Aspectos de ingeniería del proyecto CCUS-EOR Sogamoso 159
13.1 Fuentes y cantidades de Emisión de CO_2 159
13.2 Logística de Transporte del CO_2 160
13.3 Preparación para la inyección y reevaluación de volúmenes de almacenamiento 163
13.4 Simulación y modelado 165
13.5 Monitoreo y seguridad 166
13.6 Análisis final 166
Glosario 169
Referencias 175

1. Introducción

Desde hace ya varias décadas existe suficiente evidencia científica de que el cambio climático que el planeta Tierra ha venido experimentando está relacionado con el aumento en la atmósfera de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) principalmente del dióxido de carbono (CO_2) (Figura 1.1), y que dichas emisiones son superiores a las que los sumideros naturales del planeta, como los mares, los bosques, los suelos y las rocas, pueden capturar (LETA-CIAB, 2024; Greeenfacts, 2025; Global CCS Institute, 2023a). Este cambio climático ya se percibe no solamente por los aumentos de la temperatura, sino también por el desajuste del clima como la falta de precipitación en ciertos periodos que incrementa las sequías y las olas de calor, o el exceso de agua que causa precipitaciones, inundaciones y deslizamientos fuertes. Otros efectos del cambio climático son las repercusiones en la salud, la inflación, los refugiados climáticos, y los efectos colaterales de tipo social y político que dichos cambios están generando (IDEAM, 2021).

Figura 1.1 Emisiones de gases con efecto invernadero en plantas industriales que queman hidrocarburos



Fuente: Imagen base generada mediante Midjourney v6.0 y adaptada por los autores (2026).

Las fuentes de GEI son múltiples y resultan de todas las actividades humanas, desde las activas cuando se queman hidrocarburos en industrias, transporte y residencias, hasta las emisiones pasivas producidas en la exploración de hidrocarburos, la minería, la agricultura y la ganadería. Estas últimas no son tan evidentes porque no existe quema; y, por lo tanto, son más difíciles de detectar y medir. La radiación se absorbe y remite por la capa de gases de efecto invernadero, lo cual evita que parte de ese calor salga del planeta. Como resultado, el planeta se calienta, y como derivación, sucede el