

Evaluación de la Viabilidad y Sostenibilidad en la Integración Sinérgica de CO₂-EOR y Biocatalizadores para la Recuperación Mejorada de Petróleo y la Transición hacia una Industria Energética Limpia

Feasibility and Sustainability Assessment of the Synergistic Integration of CO₂-EOR and Biocatalysts for Enhanced Oil Recovery and the Transition to a Clean Energy Industry

Zambrano Nevárez Eddie Manuel
López Rocafuerte Franklin Vicente
Ochoa Celi Joaquin Alejandro
Peña Murillo Sandra Emperatriz
Baquerizo Dawson Francisco Mendoza Almeida
Gilda Estefanía Villamar Pacheco

Abstract

Enhanced Oil Recovery (EOR) aims to maximize the sustainable extraction of remaining hydrocarbons in mature reservoirs. In this context, carbon dioxide capture, utilization, and storage (CCUS) applied to EOR emerges as a strategic technology, as it allows for increased crude oil production and simultaneously contributes to carbon emissions mitigation. In parallel, the use of biocatalysts in Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) represents an environmentally friendly and innovative alternative to optimize the efficiency of the extraction process. The objective of this research is to evaluate the feasibility and sustainability of integrating CO₂-EOR with MEOR, proposing a synergistic approach that enhances the recovery of residual hydrocarbons and promotes a cleaner energy industry. The methodology employed is bibliographic, supported by a critical analysis of scientific and technical literature, allowing the topic to be approached from a multidisciplinary perspective. The use of CO₂ in EOR improves extraction efficiency and simultaneously constitutes an effective underground carbon storage option. However, its implementation presents technical and economic challenges, such as high capture and transportation costs, control of gas movement in the reservoir, and equipment corrosion. MEOR, on

How to cite:

Zambrano, E.; López F.; Ochoa, J.; Peña, S.; Mendoza, D.; Villamar, G. (2025) Evaluación de la Viabilidad y Sostenibilidad en la Integración Sinérgica de CO₂-EOR y Biocatalizadores para la Recuperación Mejorada de Petróleo y la Transición hacia una Industria Energética Limpia. *Revista Iberoamericana De educación*, 9 (4).

Received: Noviembre 2025
Approved: Diciembre, 2025

<http://www.revista-iberoamericana.org/index.php/es>

Universidad de Guayaquil
<https://orcid.org/0000-0003-0358-0402>
eddie.zambranon@ug.edu.ec
Ecuador – Guayaquil

Universidad de Guayaquil
<https://orcid.org/0000-0002-0645-1756>
franklinlopezr@ug.edu.ec
Ecuador – Guayaquil

Universidad de Guayaquil
<https://orcid.org/0000-0001-5535-6563>
joaquin.ochoac@ug.edu.ec
Ecuador – Guayaquil

Universidad de Guayaquil
<https://orcid.org/0000-0002-7848-8021>
sandra.penam@ug.edu.ec
Ecuador – Guayaquil

the other hand, employs microorganisms and their metabolites to improve oil mobility, reduce chemical use, and reduce environmental impact. It is concluded that the combination of CO₂-EOR and MEOR is viable and sustainable, improving extraction efficiency and reducing long-term operating costs.

Keywords: Enhanced Oil Recovery (EOR), Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS), Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR), Biocatalysts, Energy Sustainability.

Resumen

La Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR, por sus siglas en inglés) tiene como finalidad maximizar la extracción sostenible de hidrocarburos remanentes en yacimientos maduros. En este contexto, la captura, utilización y almacenamiento de dióxido de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés) aplicado a EOR surge como una tecnología estratégica, ya que permite aumentar la producción de crudo y, simultáneamente, contribuir a la mitigación de emisiones de carbono. Paralelamente, la utilización de biocatalizadores en la Recuperación Mejorada de Petróleo Microbiana (MEOR, por sus siglas en inglés) representa una alternativa ecológica e innovadora para optimizar la eficiencia del proceso extractivo. El objetivo de esta investigación es evaluar la viabilidad y sostenibilidad de integrar CO₂-EOR con MEOR, proponiendo un enfoque sinérgico que potencie la recuperación de hidrocarburos residuales y promueva una industria energética más limpia. La metodología empleada es de tipo bibliográfica, sustentada en el análisis crítico de literatura científica y técnica, lo que permite abordar el tema desde una perspectiva multidisciplinaria. El uso de CO₂ en EOR mejora la eficiencia de extracción y al mismo tiempo constituye una opción efectiva de almacenamiento subterráneo de carbono. Sin embargo, su implementación presenta desafíos técnicos y económicos, como los altos costos de captura y transporte, el control del desplazamiento del gas en el yacimiento y la corrosión de los equipos. Por su parte, MEOR emplea microorganismos y sus metabolitos para mejorar la movilidad del petróleo, disminuir el uso de productos químicos y reducir el impacto ambiental. Se concluye que la combinación de CO₂-EOR y MEOR es viable y sostenible, al mejorar la eficiencia extractiva y reducir los costos operativos a largo plazo.

Palabras Clave: Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR), Captura, utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS),

Recuperación Mejorada de Petróleo Microbiana (MEOR), Biocatalizadores, Sostenibilidad energética.

Resumo

A Recuperação Aprimorada de Petróleo (EOR) visa maximizar a extração sustentável de hidrocarbonetos remanescentes em reservatórios maduros. Nesse contexto, a captura, utilização e armazenamento de dióxido de carbono (CCUS) aplicada à EOR surge como uma tecnologia estratégica, pois permite o aumento da produção de petróleo bruto e, simultaneamente, contribui para a mitigação das emissões de carbono. Paralelamente, o uso de biocatalisadores na Recuperação Aprimorada de Petróleo Microbiana (MEOR) representa uma alternativa ambientalmente correta e inovadora para otimizar a eficiência do processo de extração. O objetivo desta pesquisa é avaliar a viabilidade e a sustentabilidade da integração da EOR-CO₂ com a MEOR, propondo uma abordagem sinérgica que aprimore a recuperação de hidrocarbonetos residuais e promova uma indústria de energia mais limpa. A metodologia empregada é bibliográfica, apoiada por uma análise crítica da literatura científica e técnica, permitindo que o tema seja abordado sob uma perspectiva multidisciplinar. O uso de CO₂ na EOR melhora a eficiência da extração e, simultaneamente, constitui uma opção eficaz de armazenamento subterrâneo de carbono. No entanto, sua implementação apresenta desafios técnicos e econômicos, como altos custos de captura e transporte, controle da movimentação do gás no reservatório e corrosão dos equipamentos. O MEOR, por outro lado, utiliza microrganismos e seus metabólitos para melhorar a mobilidade do petróleo, reduzir o uso de produtos químicos e reduzir o impacto ambiental. Conclui-se que a combinação de CO₂-EOR e MEOR é viável e sustentável, melhorando a eficiência da extração e reduzindo os custos operacionais a longo prazo.

Palavras-chave: Recuperação Aprimorada de Petróleo (EOR), Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS), Recuperação Aprimorada de Petróleo Microbiana (MEOR), Biocatalizadores, Sustentabilidade Energética.

INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo enfrenta el desafío de obtener combustibles de yacimientos viejos, donde los métodos convencionales de recuperación de petróleo no supera el 20-40% del volumen original de petróleo en el yacimiento (Anikin et al., 2025). Esta limitación ha promovido el uso de formas nuevas para maximizar la extracción del petróleo (EOR), sin dañar al medio ambiente o desperdiciar todos los recursos. En esta situación, la mezcla de métodos para atrapar CO₂ junto con técnicas biológicas aparece como manera nueva a los problemas energéticos y ambientales del siglo XXI.

El uso de CO₂ en procesos EOR (CO₂-EOR) representa una estrategia dual ya que incrementa la recuperación de petróleo en 10-20% adicional mientras almacena carbono de forma permanente (Gulzar et al., 2020). Sin embargo, esta nueva técnica tiene grandes problemas, como el alto precio de instalarla, posibilidad de escapes y daño a los equipos. También, la necesidad actual de fuentes fósiles para obtener CO₂ reduce un poco sus ventajas para el medio ambiente requiriendo soluciones complementarias.

Por otro lado, la Recuperación Mejorada de Petróleo Microbiana (MEOR) utiliza biocatalizadores y microorganismos para mejorar la movilidad del petróleo, reduciendo la necesidad de químicos sintéticos. Aunque esta tecnología promete menor impacto ambiental y costos reducidos, su escalabilidad y efectividad en yacimientos heterogéneos aún son limitantes debido a la complejidad de su mecanismo y al entorno incontrolable del yacimiento (Wu et al., 2022).

El problema central radica en cómo integrar la captura de CO₂ (CCUS) con biocatalizadores microbianos, para optimizar la eficiencia extractiva mientras se logra un enfoque sostenible. Según estudios experimentales recientes (Rui et al., 2025), esta sinergia supera las limitaciones individuales de cada método los procesos biológicos *in situ*, impulsados por la inyección de CO₂ capturado, pueden alcanzar eficiencias de conversión microbiana de hasta el 90% en condiciones óptimas, reduciendo significativamente la viscosidad del petróleo (30-50%) e incrementando las tasas de recuperación en 8-15 puntos porcentuales. Esto combina el almacenamiento geológico permanente de carbono con una

producción biológicamente mejorada de bajo impacto. Sin embargo, la viabilidad técnica y económica a escala de campo requiere más investigación, particularmente en la adaptabilidad de consorcios microbianos a yacimientos heterogéneos y en la optimización de los ciclos de inyección-nutrientes para garantizar rentabilidad.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la viabilidad y sostenibilidad de la integración entre la captura de CO₂ con biocatalizadores en procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR). Para ello, se analizarán los mecanismos y las oportunidades que presenta esta sinergia, considerando tecnologías emergentes que permitan optimizar la eficiencia extractiva mientras se reduce la huella de carbono. Al examinar los fundamentos de recuperación mejorada de petróleo (CO₂-EOR) y los mecanismos de integración de captura de CO₂ con biocatalizadores, se busca establecer criterios para su aplicación en yacimientos con características adecuadas, contribuyendo así a una transición energética más sostenible en la industria de hidrocarburos.

La creciente demanda energética y la necesidad de reducir emisiones impulsan nuevas soluciones en la industria petrolera, ya que los yacimientos maduros aún contienen petróleo aprovechable, lo que hace relevante la Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR), aunque los métodos tradicionales resultan costosos y contaminantes; en este contexto, la inyección de CO₂ (CO₂-EOR) mejora la extracción y permite almacenar carbono, aunque enfrenta desafíos técnicos y económicos, mientras que la opción microbiana (MEOR), más ecológica y potencialmente más económica, aún requiere más desarrollo para su aplicación a gran escala, por lo que combinar CO₂-EOR y MEOR surge como una estrategia prometedora para aumentar la eficiencia y reducir impactos ambientales.

Captura de CO₂ con biomasa

Los residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) tienen potencial como material de bajo costo para procesos de captura de CO₂ mediante combustión. Los resultados bibliométricos revelan un aumento significativo en investigaciones sobre valorización energética de biomasa agrícola para mitigación de emisiones (2015-2021) (Peña et al., 2022). Este hallazgo es particularmente valioso para sistemas CO₂-EOR, donde el uso de biocatalizadores derivados de desechos agrícolas podría reducir los costos operativos asociados

al almacenamiento geológico de carbono, al tiempo que mejora la sostenibilidad del proceso.

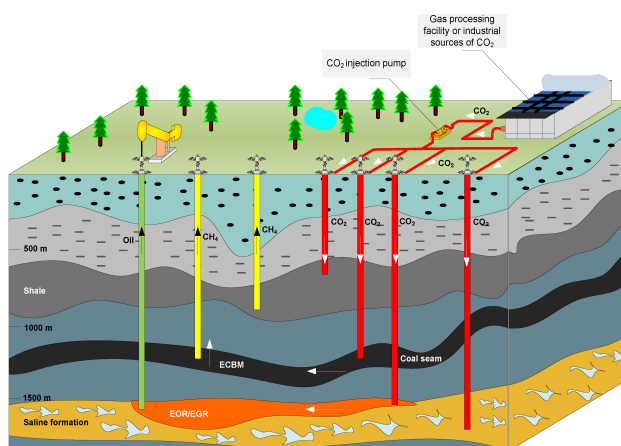
Mecanismos del CO₂-EOR

Los mecanismos del CO₂-EOR (Recuperación Mejorada de Petróleo mediante CO₂) como podemos observar en la Ilustración 1 han sido ampliamente estudiados en la literatura reciente, destacando su doble beneficio e incrementar la producción de petróleo y almacenar CO₂ de manera permanente. Un estudio publicado (Li et al., 2025) propone un método para determinar el frente de CO₂ en yacimientos mediante pruebas de pozos, lo que optimiza la eficiencia de la inyección y monitoreo del CO₂ en proyectos de EOR. Por otro lado, (Novak Mavar et al., 2021) resalta que los proyectos a gran escala de CO₂-EOR son los únicos económicamente viables dentro de las tecnologías de CCUS (Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono), ya que combinan la recuperación de petróleo residual con el secuestro permanente de CO₂ en yacimientos agotados.

La **Ilustración 1.** muestra un esquema conceptual de cómo se implementa la inyección de dióxido de carbono (CO₂) en distintos sistemas geológicos para mejorar la extracción de petróleo y, simultáneamente, almacenar CO₂ de manera subterránea como estrategia de mitigación climática. Este proceso es parte de las tecnologías conocidas como EOR (Enhanced Oil Recovery) y CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage).

Ilustración 1.

Inyección de CO₂ en la recuperación mejorada de petróleo



Fuente: (Novak Mavar et al., 2021)

Aplicaciones de EOR-CO₂ en proyectos internacionales

En Estados Unidos, la instalación Shute Creek de ExxonMobil procesa 7 Mtpa de CO₂ mediante tecnología criogénica, destinando la totalidad del gas capturado a operaciones de recuperación mejorada. Brasil también destaca con el proyecto offshore de Petrobras, que inyecta 10.6 Mtpa en yacimientos presal mediante la técnica WAG (Water Alternating Gas), utilizando membranas poliméricas para separar el CO₂ del gas natural (Blecich et al., 2024).

Canadá implementó el sistema Alberta Carbon Trunk Line, una red de transporte de 240 km diseñada específicamente para EOR, que actualmente mueve 1.8 Mtpa con capacidad para expandirse a 14.6 Mtpa. Estos casos evidencian la tendencia hacia infraestructuras compartidas que optimizan costos mediante economías de escala, con un precio referencial de 85 USD por tonelada de CO₂ almacenada. La experiencia operativa acumulada en estas instalaciones que representan 17 de las 41 plantas CCUS globales confirma a la EOR-CO₂ como solución técnicamente madura para la descarbonización del sector energético (Blecich et al., 2024).

Biocatalizadores en EOR

Los biocatalizadores, como lipasas y oxidorreductasas, han demostrado ser herramientas prometedoras en la Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR) por su capacidad para modificar propiedades clave del yacimiento, como la mojabilidad de las rocas y la tensión interfacial entre fluidos, lo que facilita la movilización del petróleo residual. Estos biocatalizadores ofrecen ventajas frente a métodos químicos tradicionales, incluyendo menor impacto ambiental, mayor especificidad y eficiencia en condiciones extremas de temperatura y salinidad, además de ser biodegradables y compatibles con principios de química verde (Ishak et al., 2025).

Limitaciones Individuales

Aunque la captura y uso de carbono (CCU) para recuperación mejorada de petróleo (EOR) tiene beneficios potenciales, enfrenta importantes limitaciones. Los principales son los altos costos energéticos en las etapas de captura, transporte e inyección de CO₂, lo que reduce su eficiencia energética neta, y las limitaciones geológicas, ya que requiere formaciones con porosidad específica y sellos naturales adecuados para garantizar un almacenamiento seguro a largo plazo. (Davoodi et al., 2024).

Los biocatalizadores mejoran la eficiencia del proceso al modificar la mojabilidad de las rocas y reducir la tensión interfacial, facilitando la movilización del petróleo atrapado. Aunque el CO₂-EOR a gran escala sigue siendo una opción viable dentro de las tecnologías CCUS, la falta de metodologías estandarizadas para medir emisiones dificulta su comparación con otras estrategias climáticas, mientras que los biocatalizadores emergen como alternativa sostenible por su bajo impacto ambiental y compatibilidad con yacimientos maduros (Novak Mavar et al., 2021).

Integración de CO₂ Capturado y Biocatalizadores

La integración entre la captura de CO₂ y el uso de biocatalizadores en procesos EOR ofrece una alternativa innovadora que busca mejorar la eficiencia en la extracción de crudo y reducir el impacto ambiental. Esta sinergia aprovecha las fortalezas de ambas tecnologías, como lo muestra (Rui et al., 2025), quienes destacan la viabilidad del CO₂-EOR para mejorar la producción energética y reducir emisiones. Además, (Alyousef et al., 2025) señalan que modificar el fluido inyectado, ya sea de forma química o biológica, puede aumentar la eficiencia del proceso, mientras que (Lin et al., 2025) identifican cepas microbianas con capacidad para mineralizar CO₂, demostrando su posible uso en EOR.

Biocatalizadores mejorando la eficiencia del barrido del CO₂

Uno de los principales problemas del CO₂-EOR es la canalización del gas, que tiende a desplazarse por zonas de alta permeabilidad sin contactar completamente el petróleo. Los biocatalizadores, como los biopolímeros, podrían mejorar este problema al aumentar la viscosidad del agua inyectada, mejorando así el barrido. Aunque no existen estudios directos combinando CO₂-EOR y biopolímeros, (Ryou et al., 2025) muestran que los surfactantes pueden disminuir la presión capilar, lo que apoya el uso de agentes modificadores de fluido para reducir la canalización.

Biocatalizadores mitigando problemas del CO₂

El CO₂ puede provocar acidificación y precipitación de minerales en el yacimiento, afectando su integridad. Algunos microorganismos tienen la capacidad de mitigar estos efectos mediante la mineralización del CO₂, transformándolo en compuestos estables. (Lin et al., 2025) y (Alyousef et al., 2025) evidencian cómo este proceso reduce el impacto ambiental y mejora la estabilidad del

yacimiento, reforzando el valor de los biocatalizadores en este contexto.

Biosurfactantes reduciendo la tensión interfacial en la interfaz crudo-CO₂-agua

Los biosurfactantes microbianos reducen significativamente la tensión interfacial entre el petróleo y el agua, así como entre el crudo y el CO₂. Esto mejora la movilización del petróleo atrapado en los poros del yacimiento. (Ryou et al., 2025) destacan que los surfactantes, al reducir la presión capilar, aumentan la eficiencia del CO₂-EOR. Al ser biodegradables, los biosurfactantes representan una alternativa más ecológica y eficaz frente a los compuestos sintéticos tradicionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se basó en una metodología de revisión sistemática y análisis crítico de literatura científica para evaluar la integración de CO₂-EOR y MEOR. Se realizó una búsqueda en bases de datos especializadas como ScienceDirect, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, utilizando términos clave como "CO₂-EOR AND MEOR integration", "CCUS microbial enhanced oil recovery" y "biocatalysts in carbon capture oil recovery". El periodo de estudio se limitó a publicaciones entre 2020 y 2025 para garantizar la relevancia tecnológica.

Los materiales seleccionados fueron evaluados según los siguientes criterios:

- Evaluación ambiental y mecanismos del CO₂-EOR.
- Producción de biosurfactantes microbianos y el factor de recuperación combinado.
- Tecnologías CO₂-EOR (eficiencia, almacenamiento, costos).
- Integración sinérgica CCU y biocatalizadores.

Diseño del sistema híbrido CO₂-biocatalizadores

Basado en el estudio de (Rui et al., 2025) se desarrolló un sistema de integración de inyección de CO₂ con consorcios microbianos que demuestran incrementos en la recuperación de petróleo en formaciones profundas.

Análisis de captura y almacenamiento de CO₂

Información descrita por (Davoodi et al., 2024) se enfocó en el uso de CO₂ para recuperación mejorada de petróleo (CO₂-EOR),

analizando específicamente los mecanismos de miscibilidad y almacenamiento permanente en yacimientos petroleros. El estudio evaluó en cómo la inyección cíclica de CO₂ supercrítico puede incrementar en la extracción de crudo, mientras simultáneamente se logra un almacenamiento geológico del CO₂ inyectado.

Evaluación económico-ambiental

Se analizaron las implicaciones económicas y ambientales asociadas con las aplicaciones de CO₂ en EOR, como lo describen (Davoodi et al., 2024) se empleó una metodología comparativa para evaluar los hallazgos de estudios como (Martin Roberts et al., 2021) y se realizó una clasificación sistemática de los indicadores de rentabilidad, sostenibilidad identificados en la literatura, integrando datos de proyectos en diversas regiones.

Costos y Viabilidad Económica

Se analizaron diversos estudios técnicos y económicos publicados recientemente. Los resultados indican que los costos de captura, transporte e inyección de CO₂ representan el componente más importante de la inversión inicial, oscilando entre 40 y 80 dólares por tonelada métrica, dependiendo de factores como la pureza del flujo de CO₂ y la distancia al yacimiento (Regufe et al., 2021). La viabilidad económica de estos proyectos está estrechamente vinculada al precio del petróleo, siendo necesarios valores superiores a 60 dólares por barril para garantizar rentabilidad en la mayoría de los escenarios. Este umbral económico se ve afectado por los altos costos asociados a la infraestructura de captura e inyección de CO₂ (Ren et al., 2022).

El análisis reveló que, si bien la tecnología muestra beneficios ambientales como la reducción de emisiones netas y la sustitución de químicos sintéticos, persisten desafíos económicos relacionados con los altos costos de infraestructura.

La investigación se basó principalmente en revisiones sistemáticas de literatura indexada, con especial énfasis en análisis comparativos entre diferentes contextos operacionales. Los resultados fueron contrastados con datos técnico-económicos reportados por operadores en los proyectos analizados, lo que permitió establecer patrones de viabilidad bajo distintas condiciones de mercado y regulatorias.

RESULTADOS

Los resultados de la investigación revelan una serie de hallazgos significativos que respaldan la integración de CO₂-EOR y MEOR como una estrategia eficaz y sostenible. Uno de los indicadores clave evaluados fue la eficiencia de recuperación de petróleo. Los datos sugieren que la combinación de CO₂-EOR y MEOR supera significativamente los métodos individuales en términos de volumen de hidrocarburos recuperados.

La mejora en la recuperación se debe a varios mecanismos. El CO₂ inyectado se disuelve en el petróleo, lo que provoca su hinchamiento y una reducción de la viscosidad, facilitando su flujo a través del medio poroso. Además, la acidificación del agua de formación por el CO₂ disuelto puede disolver minerales y abrir nuevos canales de flujo. Por otro lado, los microorganismos y sus productos metabólicos (biocatalizadores) pueden alterar la mojabilidad de la roca, reducir la tensión interfacial entre el petróleo y el agua, y generar biopolímeros o biosurfactantes que mejoran el barrido del petróleo. La combinación de estos efectos físicos y biológicos resulta en una movilización más efectiva del petróleo residual.

Otra de las características también destacadas en la integración de CO₂-EOR y MEOR es la mitigación de emisiones de carbono. Al utilizar CO₂ capturado de fuentes industriales para la inyección en yacimientos, se logra un secuestro geológico de este gas de efecto invernadero. La combinación con MEOR puede potenciar este efecto al mejorar la capacidad de almacenamiento del yacimiento o al influir en la mineralización del CO₂.

Uno de los enfoques de la investigación fue el estudio sobre el impacto específico de los biocatalizadores en el proceso. Se identificaron los tipos de microorganismos y sus metabolitos más efectivos para mejorar las propiedades del petróleo y del yacimiento, los cuales se pueden observar en la **Tabla 1**. Esto incluye la producción de biosurfactantes, biopolímeros, ácidos orgánicos y gases, que colectivamente contribuyen a la movilización del petróleo.

Tabla 1.

Efectos de los Biocatalizadores en las Propiedades del Yacimiento y del Petróleo

Tipo de Biocatalizador/ Mecanismo	Efecto en el Yacimiento/Petróleo	Impacto en EOR
Biosurfactantes	Reducción de la tensión interfacial	Mejora la movilización del petróleo
Biopolímeros	Aumento de la viscosidad del agua de inyección, mejora del barrido	Control de la movilidad, previene el 'fingering'
Ácidos Orgánicos	Disolución de minerales, apertura de poros	Mejora la permeabilidad
Producción de Gas (in situ)	Aumento de la presión del yacimiento	Desplazamiento del petróleo

Fuente modificada a partir de (Ren et al., 2022)

Los biocatalizadores actúan a través de una variedad de mecanismos. Los biosurfactantes, por ejemplo, son moléculas anfífilas que reducen la tensión interfacial entre el petróleo y el agua, permitiendo que el petróleo se movilice más fácilmente. Los biopolímeros pueden aumentar la viscosidad del agua de inyección, mejorando la eficiencia del barrido y reduciendo la formación de “fingering” o digitación. Los ácidos orgánicos pueden disolver la matriz rocosa, creando o ampliando los canales de flujo y mejorando la permeabilidad. Finalmente, la producción in situ de gases como el metano o el dióxido de carbono por parte de los microorganismos puede aumentar la presión del yacimiento, contribuyendo al desplazamiento del petróleo.

La integración de CO₂-EOR y MEOR no solo ofrece beneficios técnicos en la recuperación de petróleo y la mitigación de CO₂, sino que también presenta un perfil de sostenibilidad y viabilidad económica atractivo. La reducción de la necesidad de productos químicos sintéticos en MEOR y el uso de un subproducto industrial (CO₂) en CO₂-EOR contribuyen a un proceso más ecológico. Desde el punto de vista económico, la mejora en la eficiencia de recuperación puede compensar los costos iniciales de implementación, especialmente si se consideran los créditos de carbono o los impuestos a las emisiones.

Tabla 2.

Análisis de Sostenibilidad y Viabilidad Económica

Aspecto	CO₂-EOR (solo)	MEOR (solo)	CO₂-EOR + MEOR (integrado)
Impacto Ambiental	Moderado (secuestro de CO ₂)	Bajo (uso de microorganismos)	Bajo (sinergia de secuestro y bioprocesos)
Costo Operacional	Alto (captura y transporte de CO ₂)	Moderado (cultivo y manejo de microorganismos)	Potencialmente reducido (eficiencia mejorada)
Retorno de Inversión	Depende del precio del petróleo y créditos de carbono	Depende del precio del petróleo y eficiencia	Mejorado (mayor recuperación, menores emisiones)

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

En la **Tabla 2.** se puede observar un análisis sobre la viabilidad económica de la integración la cual depende de múltiples factores, incluyendo el precio del petróleo, los costos de captura y transporte de CO₂, los incentivos gubernamentales para la reducción de emisiones y la disponibilidad de tecnologías de biocatalizadores. Sin embargo, la mayor eficiencia de recuperación y los beneficios ambientales pueden hacer que esta estrategia sea competitiva a largo plazo.

CONCLUSIONES

La evaluación de la integración de CO₂-EOR con biocatalizadores ha demostrado ser una estrategia viable y prometedora para la Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR). La sinergia entre ambas tecnologías permite superar las limitaciones individuales, ofreciendo un enfoque más robusto para la optimización de la extracción de hidrocarburos residuales. Se ha evidenciado que los biocatalizadores pueden mejorar la eficiencia del barrido del CO₂, movilizar crudo no contactado y mitigar problemas asociados a la inyección de CO₂, como la acidificación y la precipitación. Además, el CO₂ puede actuar como sustrato o modulador para ciertos microorganismos, abriendo nuevas oportunidades para procesos biológicos in situ que potencien la EOR.

Esta integración no solo contribuye a una mayor recuperación de petróleo, sino que también promueve una industria energética más limpia y sostenible al reducir la huella de carbono y minimizar el uso de químicos convencionales.

Presenta una viabilidad económica condicionada principalmente a que los precios del crudo se mantengan por encima de los 60 USD por barril. Los análisis técnico-económicos demuestran que, si bien los costos iniciales asociados a la captura e inyección de CO₂ son significativos, esta tecnología ofrece ventajas económicas a mediano y largo plazo. Estas ventajas incluyen un incremento en la recuperación de hidrocarburos residuales entre un 10% y 20%, la reducción progresiva de la dependencia de métodos extractivos convencionales menos eficientes, y la posibilidad de generar ingresos complementarios a través de créditos de carbono.

Aunque se requiere mayor investigación a escala de campo para validar la viabilidad técnica y económica, los hallazgos de esta revisión bibliográfica sugieren un camino prometedor hacia la implementación de soluciones más eficientes y ambientalmente responsables en la industria petrolera.

REFERENCIAS

- Alyousef, M. H., Alshammari, S., & Al-Yaseri, A. (2025). Synergy of CO₂ Mineralization in Produced Water with Enhanced Oil Recovery: An Experimental Study. *Fuel*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133694>
- Anikin, O. V., Derevyanko, V. K., Bolotov, A. V., Minkhanov, I. F., Varfolomeev, M. A., Konstantinovich, E. A., & Kadysheva, V. A. (2025). Gas enhanced oil recovery methods for offshore oilfields: Features, implementation, operational status. *Petroleum Research*, 10(2), 404–415. <https://doi.org/10.1016/J.PTLRS.2024.12.003>
- Blecich, P., Wolf, I., Senčić, T., & Bonefačić, I. (2024). Current Status of Enhanced Oil Recovery Projects Using Carbon Dioxide (EOR CO₂) in Croatia. *Engineering Proceedings 2024*, Vol. 67, Page 19, 67(1), 19. <https://doi.org/10.3390/ENGPROC2024067019>
- Davoodi, S., Al-Shargabi, M., Wood, D. A., Mehrad, M., & Rukavishnikov, V. S. (2024). Carbon dioxide sequestration

- through enhanced oil recovery: A review of storage mechanisms and technological applications. *Fuel*, 366, 131313. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.131313>
- Gulzar, A., Gulzar, A., Ansari, M. B., He, F., Gai, S., & Yang, P. (2020). Carbon dioxide utilization: A paradigm shift with CO₂ economy. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100013. <https://doi.org/10.1016/J.CEJA.2020.100013>
- Ishak, S. N. H., Saad, A. H. M., Latip, W., Rahman, R. N. Z. R. A., Salleh, A. B., Kamarudin, N. H. A., Leow, A. T. C., & Ali, M. S. M. (2025). Enhancing industrial biocatalyst performance and cost-efficiency through adsorption-based enzyme immobilization: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 316, 144278. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.144278>
- Li, J., Cui, C., Wang, J., Zhang, Y., Li, G., Li, Y., Li, H., & Han, F. (2025). Determining CO₂ front in CO₂-EOR using a well-testing method. *Energy Geoscience*, 6(2), 100385. <https://doi.org/10.1016/J.ENGEOS.2025.100385>
- Lin, X., Zheng, X., Wen, Y., Yu, C., Li, D., & Zhang, H. (2025). Microbial-induced carbon dioxide (CO₂) mineralization: Investigating the bio-mineralization chemistry process and the potential of storage in sandstone reservoir. *Applied Energy*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124268>
- Martin Roberts, E., Scott, V., Flude, S., Johnson, G., Haszeldine, R. S., & Gilfillan, S. (2021). Carbon capture and storage at the end of a lost decade. *One Earth*, 4(11), 1569–1584. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2021.10.002>
- Novak Mavar, K., Gaurina-Međimurec, N., & Hrnčević, L. (2021). Significance of Enhanced Oil Recovery in Carbon Dioxide Emission Reduction. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 1800, 13(4)*, 1800. <https://doi.org/10.3390/SU13041800>
- Peña, S. E., Forero, C. R., & Velasco, F. J. (2022). Bibliometric study of the combustion of cane cutting waste (RAC) in the capture of carbon dioxide. *SN Applied Sciences*, 4(5), 1–9. <https://doi.org/10.1007/S42452-022-05009-9/FIGURES/12>
- Regufe, M. J., Pereira, A., Ferreira, A. F. P., Ribeiro, A. M., & Rodrigues, A. E. (2021). Current Developments of Carbon Capture Storage and/or Utilization—Looking for Net-Zero Emissions Defined in the Paris Agreement. *Energies 2021, Vol. 14, Page 2406, 14(9)*, 2406. <https://doi.org/10.3390/EN14092406>

- Ren, B., Male, F., & Duncan, I. J. (2022). Economic analysis of CCUS: Accelerated development for CO₂ EOR and storage in residual oil zones under the context of 45Q tax credit. *Applied Energy*, 321, 119393. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119393>
- Rui, Z., Liu, T., Wen, X., Meng, S., Li, Y., & Dindoruk, B. (2025). Investigating the Synergistic Impact of CCUS-EOR. In *Engineering* (Vol. 48, pp. 16–40). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.04.005>
- Ryou, J. E., Gang, S., Yong Lee, J., & Jung, J. (2025). Assessing surfactant influence on CO₂ injection efficiency in geological storage: A pore network approach. *Fuel*, 381. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133598>
- Wu, B., Xiu, J., Yu, L., Huang, L., Yi, L., & Ma, Y. (2022). Research advances of microbial enhanced oil recovery. *Heliyon*, 8(11), e11424. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11424>