

Biopolímeros y nanotecnología - alternativas eco-amigables circulares y sostenibles en la Recuperación Mejorada de Petróleo (RPM)

Edwars Naranjo^{1,2}, Lourdes Orejuela-Escobar^{1*}, Inés Hernández^{1,2}

¹ Universidad San Francisco de Quito USFQ Quito, Ecuador.

² Universidad de Carabobo, UC Valencia, Venezuela. Department of Chemical, Experimental Faculty of Sciences and Technology (FACYT), Valencia, Venezuela.

*Corresponding author: lorejuela@usfq.edu.ec

Biopolymers and Nanotechnology: eco-friendly and sustainable alternative in Enhanced Oil Recovery

Resumen

Los biopolímeros que son materiales naturales y biodegradables, así como las nanopartículas (NPs), surgen como alternativas prometedoras y sostenibles en la industria petrolera, optimizando la extracción de petróleo de forma rentable y amigable con el medio ambiente. Los biopolímeros, capaces de mejorar la relación de movilidad, aumentar la viscosidad del agua de inyección de 20 a 30 veces su magnitud y disminuir la permeabilidad relativa al agua en un rango de 10 a 50 % o incluso más, están surgiendo como una tendencia crítica en la recuperación mejorada de petróleo (RMP), con el potencial de reemplazar a los polímeros sintéticos convencionales. Las NPs mejoran la humectabilidad de la roca en el reservorio, bajan la tensión interfacial entre el agua inyectada y el petróleo, mejorando la movilidad y reología del petróleo y permitiendo incrementar el factor de recobro. Al seleccionar biopolímeros, NPs y nanomateriales para RMP, es esencial considerar factores como el costo, la disponibilidad y las propiedades funcionales. La metodología utilizada en esta investigación implicó una revisión sistemática de la literatura científica, abarcando un análisis crítico de los avances recientes en la investigación de biopolímeros, NPs y nanomateriales para RMP. El estudio también compara biopolímeros y polímeros sintéticos, y analiza las NPs y nanomateriales usados en RMP considerando eficiencia, costo e implicaciones ambientales. Además, esta investigación explora los aspectos económicos asociados con la utilización de biopolímeros, NPs y nanomateriales en RMP, incluidos factores de costo y posibles retornos de la inversión. La innovación continua en el uso de biopolímeros se considera el futuro de la RMP, ofreciendo una alternativa más ecológica y responsable para explotar este recurso importante. El uso de biopolímeros, NPs y nanomateriales contribuye a una industria petrolera más sostenible y cuidadosa con el medio ambiente.

Los biopolímeros, materiales naturales y biodegradables, junto con las nanopartículas (NPs) y los nanomateriales, surgen como alternativas prometedoras y sostenibles en la industria petrolera, optimizando la extracción de petróleo de manera rentable y ambientalmente amigable. Los biopolímeros pueden mejorar la relación de movilidad, aumentar la viscosidad del agua de inyección entre 20 y 30 veces y reducir la permeabilidad relativa al agua en un rango del 10 % al 50 % o más. Esto los posiciona



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
24/08/2024

Aceptado /
Accepted:
05/11/2024

Publicado en línea /
Published online:
13/06/2025



como una tendencia clave en la recuperación mejorada de petróleo (RMP), con el potencial de reemplazar a los polímeros sintéticos convencionales.

Por su parte, las NPs mejoran la humectabilidad de la roca en el reservorio y reducen la tensión interfacial entre el agua inyectada y el petróleo, lo que mejora la movilidad y la reología del crudo, permitiendo incrementar el factor de recobro. Al seleccionar biopolímeros, NPs para RMP, es esencial considerar factores como el costo, la disponibilidad y las propiedades funcionales. La metodología utilizada en esta investigación consistió en una revisión sistemática de la literatura científica, que incluyó un análisis crítico de los avances recientes en la aplicación de estos materiales en RMP. Además, el estudio compara biopolímeros con polímeros sintéticos y evalúa el uso de NPs y nanomateriales en función de su eficiencia, costo e impacto ambiental.

Asimismo, esta investigación analiza los aspectos económicos asociados con la aplicación de biopolímeros, NPs y nanomateriales en RMP, considerando costos y posibles retornos de inversión. La innovación continua en el uso de biopolímeros se perfila como el futuro de la RMP, ofreciendo una alternativa más ecológica y responsable para la explotación de este recurso.

El empleo de biopolímeros, NPs y nanomateriales contribuye a una industria petrolera más sostenible y comprometida con la protección del medio ambiente.

Palabras clave: biopolímeros, recuperación mejorada de petróleo (RMP), copolimerización, nanocompuestos e hidrogeles.

Abstract

Biopolymers, natural and biodegradable materials, as well as nanoparticles (NPs) and nanomaterials emerge as promising and sustainable alternatives in the oil industry, optimizing oil extraction in a profitable and environmentally friendly way. Biopolymers, capable of improving the mobility ratio, increasing the viscosity of injection water by 20 to 30 times its magnitude and decreasing its magnitude and decreasing the relative permeability to water in the range of 10 to 50 % or even more, are emerging as a critical trend in Enhanced Oil Recovery (EOR), with the potential to replace conventional synthetic polymers. When selecting biopolymers, NPs, and nanomaterials for EOR, it is essential to consider factors such as cost, availability, and functional properties. The methodology used in this research involved a systematic review of scientific literature, encompassing a critical analysis of recent advances in biopolymer, NPs research for EOR. This study also compares biopolymers and synthetic polymers, considering efficiency, cost, and environmental implications. Additionally, the research explores the economic considerations associated with utilizing biopolymers, NPs, and nanomaterials in EOR, including cost factors and potential returns on investment. Continuous innovation in using biopolymers is seen as the future of EOR, offering a more ecological and responsible alternative to exploit this important resource. The choice of biopolymers, NPs, contributes to a more sustainable and environmentally conscious oil industry.

Biopolymers, which are natural and biodegradable materials, along with nanoparticles (NPs), emerge as promising and sustainable alternatives in the oil industry, optimizing



oil extraction in a cost-effective and environmentally friendly manner. Biopolymers can enhance the mobility ratio, increase the viscosity of injection water by 20 to 30 times, and reduce the relative permeability to water by 10 % to 50 % or more. This positions them as a key trend in enhanced oil recovery (EOR), with the potential to replace conventional synthetic polymers.

NPs, on the other hand, improve the wettability of reservoir rock and reduce the interfacial tension between injected water and oil, enhancing oil mobility and rheology, thereby increasing the recovery factor. When selecting biopolymers, NPs for EOR, it is essential to consider factors such as cost, availability, and functional properties. The methodology used in this research consisted of a systematic review of scientific literature, including a critical analysis of recent advances in the application of these materials in EOR. Additionally, the study compares biopolymers with synthetic polymers and evaluates the use of NPs and nanomaterials in terms of efficiency, cost, and environmental impact. Furthermore, this research examines the economic aspects associated with the application of biopolymers, NPs in EOR, considering costs and potential returns on investment. Continuous innovation in the use of biopolymers is seen as the future of EOR, offering a more ecological and responsible alternative for the exploitation of this valuable resource. The use of biopolymers, NPs contributes to a more sustainable oil industry, committed to environmental protection.

Keywords: biopolymers, enhanced oil recovery, copolymerization, nanocomposites and hydrogels.

INTRODUCCIÓN

Los biopolímeros, materiales naturales y biodegradables, están ganando protagonismo en diversas industrias [1] debido a su compatibilidad con el medioambiente. Su origen en fuentes renovables y su capacidad para minimizar el impacto ambiental [2,3] los convierten en una alternativa atractiva frente a los polímeros sintéticos derivados del petróleo. En el campo de la recuperación mejorada de petróleo (RMP), los biopolímeros emergen como una tendencia prometedora, con el potencial de reemplazar a los polímeros sintéticos tradicionales [4] y promover prácticas más sostenibles en la industria petrolera. La creciente demanda de soluciones rentables y ecológicas en la producción de petróleo impulsa el interés en los biopolímeros, NPs y nanomateriales. Su capacidad para mejorar la eficiencia de la extracción en diversas condiciones de yacimientos los convierte en una opción atractiva para la RMP. Esta revisión bibliográfica explora el potencial de los biopolímeros, NPs y nanomateriales en este campo, analizando sus ventajas, desafíos y las innovaciones que buscan optimizar su rendimiento en condiciones adversas.

Los biopolímeros pueden provenir de varias fuentes. Hay de origen vegetal, animal, algal y microbiano [5]. A continuación, se presentan algunos ejemplos, destacando sus propiedades y aplicaciones específicas, seguido de los mecanismos de acción de los biopolímeros en RMP e impacto en la eficiencia de barrido y la movilidad del petróleo.

Polisacáridos provenientes de biomasa vegetal y de microorganismos

La biomasa y los microorganismos son fuentes ricas en polisacáridos que puede ser utilizados en RMP, a continuación, se detallan algunos ejemplos importantes:

El xantano (goma xantana) es un heteropolisacárido ramificado producido por la bacteria *Xanthomonas campestris*. Posee alta viscosidad, estabilidad térmica y química, además de ser resistente a la degradación. Sus aplicaciones principales son como agente espesante, para control de movilidad del agua, y para reducción de la permeabilidad [6]. El mecanismo de acción del xantano implica un aumento significativo de la viscosidad del agua de inyección, lo que mejora la relación de movilidad entre el agua y el petróleo. Esto resulta en un frente de desplazamiento más uniforme, reduciendo el fenómeno de "fingering" y aumentando la eficiencia de barrido [7,8].

El escleroglucano es producido principalmente por hongos del género *Sclerotium*, especialmente por la especie *Sclerotium rolfisii* (polímero de glucosa con enlaces β -1,3 y β -1,6); exhibe alta viscosidad, excelente estabilidad, y facilidad para formar geles. Sus aplicaciones principales son control de movilidad, reducción de permeabilidad y bloqueo selectivo [9]. Debido a su estructura molecular rígida, el escleroglucano mantiene su viscosidad incluso a altas temperaturas y salinidades, lo que lo hace particularmente útil en yacimientos en condiciones adversas, donde puede mejorar significativamente la eficiencia de barrido y el desplazamiento del petróleo.

El dextrano es producido principalmente por bacterias del género *Leuconostoc* y *Streptococcus*, y se caracteriza por su baja viscosidad, incompatibilidad y biodegradabilidad. Se utiliza como agente de movilidad y para mejorar la permeabilidad. Esto se debe a que puede remover partículas que obstruyen los poros del yacimiento o prevenir la formación de depósitos que reducen la permeabilidad [10].

El alginato es un polisacárido biodegradable, y se encuentra principalmente en las paredes celulares de las algas pardas, un grupo diverso de macroalgas que incluye especies como el kelp, el fucus y el sargassum (polisacárido aniónico) que forman geles diseñados para controlar los problemas de flujo preferencial de fluidos en yacimientos de alta temperatura. El sistema polimérico de alginato también puede aprovechar los iones Ca_2+ en el agua de formación, que existen en la mayoría de los yacimientos, para reforzar su resistencia capturando el Ca_2+ para formar enlaces Ca-alginato [11]. En otros estudios se encapsuló poli(acrilamida) (PAM) en una cubierta de alginato de sodio (SA) mejorada con nanofibras de celulosa oxidadas con 2, 2, 6, 6-tetrametilpiperidinooxi (TOCNFs) para formar microcápsulas. El tiempo de liberación de PAM de las microcápsulas se prolongó significativamente con la adición de TOCNFs. La mayor resistencia al cizallamiento de las microcápsulas se atribuyó a la estructura de red semi-interpenetrante de alginato de sodio (AS) y TOCNFs a través del entrecruzamiento de Ca_2+ y enlaces de hidrógeno [12].

La goma guar, es un polisacárido no iónico compuesto principalmente por manosa y galactosa. Presenta alta viscosidad a bajas concentraciones, buena estabilidad térmica y aceptable resistencia a la salinidad, sin embargo, es susceptible a la degradación bacteriana. La goma guar se utiliza principalmente como agente espesante en la inyección de agua para mejorar la eficiencia de barrido en yacimientos petroleros. En



menor medida, también se emplea para el control de movilidad y permeabilidad. La inyección de este polímero puede aumentar significativamente la recuperación de petróleo pesado; sin embargo, es importante destacar que la concentración de sal presente en el yacimiento influye considerablemente en su efectividad [13].

Ogunnkunle et al [13] evaluaron el rendimiento del polímero hidrofóbicamente asociativo (HAPAM), la goma xantana y la goma guar en procesos RMP. Investigaron su rendimiento en aplicaciones de recuperación de petróleo mediante análisis de comportamiento reológico y experimentos de inundación de núcleos. El petróleo acumulado recuperado después de la inundación con agua en diferentes muestras de núcleos de arenisca con propiedades petrofísicas similares implican que HAPAM muestra una mejor capacidad de recuperación de petróleo con 41,1, 62,4 y 63,5 % de petróleo recuperado en comparación con el xantano cuya capacidad de recuperación fue de 32,3, 33,7 y 56,2 % y de la goma guar con 41,8, 57,1 y 61,2 % de recuperación; utilizando las tres concentraciones; concentración, 1, 2 y 3 (1000, 4000 y 6000 ppm) respectivamente [14]. Bera et al [14] estudiaron el uso de NPs de sílice con goma guar para mejorar la recuperación de petróleo y encontraron que las NPs aumentan la viscosidad de la goma guar y mejoran su capacidad de recuperación de petróleo en experimentos de imbibición y de inundación de núcleos. La mezcla de goma guar y NPs de sílice cambió la humectabilidad de la roca, de ser mojada por petróleo a ser mojada por agua, lo que facilita la extracción de petróleo. Este método, que utiliza goma guar en lugar de poliácridamida o goma xantana, ofrece una nueva alternativa para RMP [15].

Elsayed et al [15] crearon dos nuevos hidrogeles a base de goma guar modificada para mejorar la recuperación de petróleo en yacimientos con alta salinidad. Estos hidrogeles, llamados, GG-g-poli (Am-AMPS) (GH) y GG-g-poli (Am-AMPS) /biocarbón (compuesto GBH), demostraron ser efectivos para extraer más petróleo que los métodos convencionales, especialmente en procesos de recuperación terciaria. Además, tienen la ventaja de ser biodegradables y de mejorar la humectabilidad de la roca, lo que facilita la extracción del petróleo.

Celulosa es un polisacárido lineal presente en todas las plantas terrestres y en algunos tunicados, se caracteriza por su baja solubilidad y alta viscosidad, aunque es susceptible a la degradación por microorganismos. Adicionalmente, la celulosa a escala nano (nanocelulosa) se presenta bajo nanocelulosa fibrilada (NCF) y nanocelulosa cristalizada (NCC), y sus aplicaciones en RMP incluyen su uso como agente espesante y como agente de control de movilidad y de permeabilidad. Ejemplos del uso de NCF y NCC han sido desarrollados por Wu, et al [11]. y por Molnes et al. [16]. Sus derivados como por ejemplo la carboximetil nanocelulosa (CMNC), también son usados para RMP, Yuan et al. [17]. observaron que los grupos modificados en la CMNC confirieron propiedades hidrofóbicas a la nanocelulosa, mejorando la interacción entre los diferentes grupos carboximetil y el petróleo crudo.

La lignina es un biopolímero heterogéneo amorfo, de naturaleza aromática, que está presente en las plantas vasculares (gimnospermas, angiospermas y pteridofitas) [18]. La lignina muestra alta estabilidad térmica y química, actividad superficial, y capacidad de modificación química. En RMP se utiliza para aumentar la viscosidad del agua inyectada, mejorando la eficiencia de barrido y previniendo la formación de canales preferenciales



[19]. Para aprovechar al máximo los residuos de lignina y al mismo tiempo tratar las aguas residuales aceitosas, se han diseñado y preparado racionalmente compuestos porosos a base de lignina [20]. Recientemente, se están desarrollando las nanoligninas (ligninas a escala nano) llamadas también NPs de lignina (LNPs, por sus siglas en inglés), para generar nanofluidos con aplicación en RMP [21]. De igual manera, se han desarrollado espumas de poliuretano superhidrofóbicas a base de aceite de castor y ligninas con NPs de carburo de silicio (SiC) para una separación eficiente y reciclable de la mezcla agua-petróleo [22].

Biopolímeros microbianos

La fermentación de microbios también es una fuente de producción de biopolímeros como el polihidroxialcanoato y polihidroxibutirato, dando lugar a una nueva área de estudio denominada bio-recuperación mejorada de petróleo (BEOR, por sus siglas en inglés) o BRMP (siglas en español) que incluye diferentes tipos de microorganismos, enzimas, biopolímeros, y bionanomateriales [23], entre otros, para RMP. A continuación, se detallan algunos ejemplos:

El polihidroxialcanoato (PHA), es un biopolímero producido mayormente por *Bacillus* spp, usando sustratos de biomasa y biomasa residual como fuente de alimento. A nivel de investigación, se ha realizado un enfoque ecobiotecnológico para producir copolímeros de polihidroxialcanoato (PHA) a partir de cáscaras de guisantes utilizando seis cepas de *Bacillus* spp. como cultivo mixto definido. La producción de copolímero se mejoró de 65 a 560 mg/L [24].

El polihidroxibutirato (PHB) es un biopolímero biodegradable, biocompatible y termoplástico. En RMP, se utiliza para crear microesferas para transporte en Recuperación Microbiana Mejorada de Petróleo (RMMP) [25]. Un estudio reciente aisló una bacteria productora de surfactina y polímeros, *Bacillus subtilis* RI4914, de un yacimiento petrolífero. Se investigó el efecto de la salinidad, la temperatura y el pH sobre la recuperación de petróleo por surfactina de *Bacillus subtilis* RI4914. La tensión interfacial aceite-agua (OW-IFT) disminuyó con la concentración de surfactina. La recuperación del petróleo se vio favorecida por el aumento en de la concentración de NaCl en la fase acuosa. La adición del biopolímero producido por *B. subtilis* RI4914 junto con la surfactina a la solución inyectada aumentó la recuperación de petróleo hasta en un 88 % del petróleo residual de las columnas llenas de arena [26].

Los biosurfactantes son otro grupo importante de biopolímeros microbianos derivados de fuentes renovables y biodegradables, que reducen la tensión interfacial y mejoran la humectabilidad. Sus aplicaciones en RMMP incluyen la mejora de la eficiencia de barrido y la remoción de petróleo residual [9,27,28]. Los tensioactivos derivados del petróleo utilizados en los procesos de RMP pueden tener impactos ambientales negativos. Los tensioactivos biosurfactantes derivados de recursos renovables y biodegradables son alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Los hallazgos científicos muestran por qué se debe hacer hincapié en el desarrollo y la adopción de biosurfactantes en RMP como una contribución sustancial a una industria del petróleo y del gas más sostenibles y respetuosas con el medioambiente [29].



Al considerar esta amplia gama de biopolímeros y sus aplicaciones, la industria petrolera puede aprovechar su potencial para mejorar la recuperación de petróleo de manera sostenible y respetuosa con el medioambiente.

Mecanismos de acción de los biopolímeros en RMP

Los biopolímeros ejercen su influencia en la RMP principalmente a través de la modificación de las propiedades reológicas de los fluidos inyectados, lo que a su vez impacta la eficiencia de barrido y la movilidad del petróleo en el yacimiento. En relación con la modificación de las propiedades reológicas, se destacan tres mecanismos principales:

1. **Aumento de la viscosidad:** los biopolímeros, al ser macromoléculas de cadena larga, incrementan la viscosidad del agua inyectada. Esto se debe a que sus cadenas se entrelazan y forman una red tridimensional que resiste el flujo, generando una mayor fricción interna en el fluido.
2. **Reducción de la permeabilidad:** algunos biopolímeros pueden interactuar con la roca del yacimiento, absorbiéndose en su superficie o formando geles en los poros. Esto reduce la permeabilidad efectiva del agua, dificultando su paso a través de las zonas de alta permeabilidad y favoreciendo su flujo hacia zonas de baja permeabilidad donde el petróleo podría estar atrapado [30].
3. **El control de la relación de movilidad:** esta relación entre el agua inyectada y el petróleo es crucial para la eficiencia de barrido en la RMP. Los biopolímeros juegan un papel importante en este proceso al aumentar la viscosidad del agua y reducir su movilidad relativa al petróleo [31]. Esto promueve un frente de desplazamiento más estable y uniforme, evitando la formación de canales preferenciales que pueden disminuir la eficiencia de la recuperación. Además, la adición de biopolímeros puede ayudar a reducir la permeabilidad, lo que resulta en un desplazamiento más uniforme del petróleo y en una mayor recuperación [31,32,33].

Impacto en la eficiencia de barrido y la movilidad del petróleo con el uso de biopolímeros

Los biopolímeros pueden tener un gran impacto en la RMP en los siguientes aspectos:

- a) **Mejora de la eficiencia de barrido:** Al aumentar la viscosidad y reducir la permeabilidad en zonas de alta permeabilidad, los biopolímeros obligan al agua inyectada a fluir hacia zonas de baja permeabilidad que de otro modo serían ignoradas. Esto aumenta el área de contacto entre el agua y el petróleo, mejorando la eficiencia de barrido y movilizándolo adicional [34].
- b) **Mejora de la relación de movilidad:** La relación de movilidad (M) se define como $M = (k_w/\mu_w) / (k_o/\mu_o)$, donde "k" es la permeabilidad efectiva y "μ" es la viscosidad del agua (w) y "o" el petróleo. Los biopolímeros aumentan "μw", reduciendo M. Una relación de movilidad favorable ($M \leq 1$) resulta en un desplazamiento más eficiente del petróleo [35]. Por ejemplo, el xantano puede aumentar la viscosidad del agua de inyección de 1 cP a 10-50 cP, dependiendo de la concentración y las



condiciones del yacimiento. Esto puede reducir la relación de movilidad de 10-20 (desfavorable) a cerca de 1 o menos, lo que resulta en una mejora significativa en la eficiencia de barrido y, por ende, en la recuperación de petróleo [36].

- c) **Reducción del “Fingerprinting” y el “Channeling”:** El aumento de la viscosidad del agua inyectada ayuda a prevenir la formación de “dedos” o canales preferenciales, donde el agua fluye rápidamente a través de zonas de alta permeabilidad sin desplazar eficientemente el petróleo. Esto asegura un desplazamiento más uniforme y una mayor recuperación de petróleo [37].
- d) **Movilización de petróleo atrapado:** Al reducir la permeabilidad en zonas de alta permeabilidad, los biopolímeros pueden aumentar la presión de inyección y forzar al petróleo atrapado en los poros a moverse y ser desplazado hacia los pozos productores [38].

Los biopolímeros modifican las propiedades reológicas de los fluidos inyectados en RMP, aumentando la viscosidad, reduciendo la permeabilidad y controlando la relación de movilidad. Estos cambios mejoran la eficiencia de barrido, reducen la formación de canales preferenciales y movilizan petróleo atrapado, lo que se traduce en una mayor recuperación de petróleo y una producción más eficiente. No obstante, aunque los biopolímeros ofrecen numerosas ventajas en RMP, también existen desafíos asociados a su aplicación, como la sensibilidad a las condiciones del yacimiento (alta salinidad, temperatura) y la posible degradación microbiana de los biopolímeros. La investigación y el desarrollo continuos se centran en superar estos desafíos y ampliar el uso de biopolímeros en RMP [31].

Nanotecnología aplicada a RMP

En los últimos años, la nanotecnología emerge como una alternativa para maximizar la RMP gracias a sus técnicas de producción eficaces y de bajo costo. Las NPs (entre 10 y 100 nm de diámetro) adquieren propiedades mejoradas comparadas con las partículas más grandes (en bulk), como, por ejemplo, alta área superficial. Algunas investigaciones han demostrado que las NPs mejoran la recuperación de petróleo gracias a que reducen la tensión superficial y aumentan la humectabilidad del yacimiento. Ciertas NPs funcionan más eficientemente que otras, dependiendo de las condiciones de operación de la RMP. Las NPs se clasifican en partículas de óxido metálico, inorgánicas y orgánicas [28].

La nanotecnología ha atraído gran atención en la RMP debido a su rentabilidad y respeto al medioambiente. Las NPs exhiben propiedades significativamente diferentes en comparación con las mismas moléculas finas o a granel debido a la mayor concentración de átomos en su superficie. Una de las propiedades más útiles de estas partículas es la creación de una fuerza impulsora de difusión masiva debido a la gran superficie. Estudios previos han demostrado que las NPs pueden mejorar la recuperación de petróleo al cambiar la humectabilidad del yacimiento hacia más humectabilidad al agua y reducir la tensión interfacial. El potencial de las NPs para reducir la viscosidad del petróleo, aumentar la relación de movilidad y alterar la permeabilidad del yacimiento no se ha investigado hasta la fecha. En este estudio, nuestro objetivo es proporcionar un resumen de las NPs disponibles en el mercado y enumerar sus condiciones operativas óptimas [32].

Mecanismos de acción de las NPs

Las NPs poseen alta área superficial en relación con su volumen, así como también efectos cuánticos y reactividad mejorada en RMP; propiedades que permiten mecanismos en RMP, como el mejoramiento de la humectabilidad y estabilidad térmica, la reducción de la tensión interfacial, la obstrucción selectiva y la desviación de fluidos, y los efectos catalíticos. A continuación, se resumen algunos tipos de NPs y sus efectos detallados por Hassan [33]:

1. **NPs de óxido de silicio y titanio.** Son las más populares en los campos petroleros del Oriente Medio. Pueden modificar las propiedades de la superficie de la roca, mejorando la inhibición del agua y el desplazamiento del petróleo
2. **NPs recubiertas de surfactante.** Pueden reducir la tensión interfacial entre el petróleo y el agua y facilita el flujo del petróleo.
3. **NPs de óxido metálico.** Las más empleadas son las de óxido de aluminio y óxido de zinc, las cuales mejoran la conductividad térmica y estabilidad durante los métodos termales de RMP, por ejemplo, la inundación de vapor. Otras NPs metálicas, como las de óxido de hierro, tienen propiedades catalíticas porque pueden promover reacciones químicas in situ que generan gases, facilitando el desplazamiento de petróleo.
4. **NPs recubiertas con polímeros.** Tienen la habilidad de tapar selectivamente zonas de alta permeabilidad y redirigir los fluidos de inyección, conduciendo a un barrido más uniforme y una mayor recuperación de petróleo. Se aplican con buenos resultados en los pozos de petróleo pesado de Canadá.

Los procesos bionano son una fusión entre biología, biotecnología y nanotecnología e integran las ventajas y beneficios de los microorganismos y de las NPs que provee una sinergia para la RMP, convirtiéndose en un enfoque promisorio eficaz para optimizar la RMP cuidando aspectos de productividad (económicos), ambientales y de sostenibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica y técnica publicada entre 2020 y 2024, en las bases de datos Web of Science, Scopus y Google Scholar. Se utilizaron las siguientes palabras clave: "biopolímeros", "copolimerización", "nanocompuestos", "hidrogeles" y "recuperación mejorada de petróleo", así como combinaciones de estas. Se seleccionaron artículos en función de los siguientes criterios de inclusión:

1. **Relevancia temática:** estudios relacionados con el uso de biopolímeros y NPs en la RMP.
2. **Calidad y rigor científico:** artículos publicados en revistas científicas y tesis doctorales con una metodología sólida y bien descrita.



- 3. Actualidad:** estudios publicados en los últimos cinco años (2020-2024). Se excluyeron artículos que no cumplieran con estos criterios, incluyendo aquellos que no abordaban directamente el tema de interés o presentaban deficiencias metodológicas significativas. Los artículos seleccionados se analizaron críticamente, extrayendo información sobre avances recientes en la investigación de biopolímeros, NPs y nanomateriales para RMP, comparación del desempeño de biopolímeros y polímeros sintéticos, potencial de los biopolímeros, NPs y nanomateriales en RMP, desafíos en su aplicación, innovaciones para optimizar su rendimiento, consideraciones económicas y su relación con la sostenibilidad.

Avances recientes en la investigación de biopolímeros y NPs para RMP

La investigación en el campo de los biopolímeros y NPs para RMP está en constante evolución, impulsada por la necesidad de soluciones más eficientes, sostenibles y adaptables a las diversas condiciones de los yacimientos. A continuación, se destacan algunos de los avances más recientes y prometedores.

Técnicas de modificación

- 1. Funcionalización con NPs:** La incorporación de NPs como sílice, arcilla o nanotubos de carbono en la estructura de los biopolímeros, puede mejorar significativamente sus propiedades. Esto incluye un aumento de la viscosidad, mayor estabilidad térmica y química, y mejor control de la permeabilidad [15,34]. Las NPs coloidales de sílice funcionalizadas con amida modifican la superficie de las NPs de sílice, mejorando significativamente su estabilidad en condiciones de yacimiento, es decir, crea una capa protectora alrededor de las NPs, evitando su interacción directa con la roca y el crudo, lo que reduce la posibilidad de desestabilización y sedimentación. Esto permite que las nanopartículas permanezcan dispersas, activas, garantizando su transporte efectivo y su capacidad para mejorar la recuperación de petróleo de manera eficiente y sostenible. La ventaja de esta técnica es la de mejorar la estabilidad de NPs de sílice para RMP [34].
- 2. Copolimerización:** Implica la combinación de diferentes monómeros para crear copolímeros, permitiendo diseñar biopolímeros con propiedades individualizadas para aplicaciones específicas en RMP [35]. La ventaja de esta técnica es que mejora la resistencia a la salinidad y temperatura en la RMP, sobre todo en los yacimientos petrolíferos maduros, en donde la producción primaria y secundaria ha disminuido, dejando petróleo atrapado en los poros de la roca. La copolimerización de polisacáridos con polímeros sintéticos, o la combinación estratégica de diferentes biopolímeros, modifica la estructura química de estos compuestos, lo que incrementa su resistencia frente a las condiciones adversas del yacimiento y optimiza sus propiedades para la RMP.
- 3. Formación de hidrogeles:** Los hidrogeles son redes tridimensionales de polímeros capaces de absorber grandes cantidades de agua que ofrecen un gran potencial en RMP. La formación de hidrogeles a partir de biopolímeros puede ser utilizada para bloquear selectivamente zonas de alta permeabilidad, controlar la pérdida de fluidos y mejorar la eficiencia de barrido [36]. En la producción de petróleo, el agua



indeseada puede infiltrarse en los pozos, reduciendo la eficiencia de la extracción y aumentando los costos de producción. Los métodos tradicionales para controlar el flujo de agua, como la inyección de cemento o polímeros sintéticos, pueden ser costosos, tener un impacto ambiental negativo y no siempre ser efectivos en formaciones complejas. El desarrollo de hidrogeles resistentes y biodegradables a partir de copolímeros y nanocelulosa para el taponamiento selectivo de zonas de alta permeabilidad en yacimientos petrolíferos es una solución viable. La ventaja de esta técnica es el taponamiento de agua en yacimientos petrolíferos [37].

Aplicaciones innovadoras

1. **RMP en yacimientos de shale:** Los biopolímeros (polisacáridos provenientes de biomasa y de microorganismos) están siendo investigados para su aplicación en la recuperación de petróleo de yacimientos de esquisto (shale) [38], donde las condiciones extremas de presión y temperatura presentan desafíos significativos. La modificación química y la formación de hidrogeles pueden mejorar la estabilidad y el rendimiento de los biopolímeros en estos entornos.
2. **RMP en yacimientos costa afuera:** Los biopolímeros biodegradables ofrecen una alternativa atractiva para RMP en yacimientos costa afuera (offshore), donde las afectaciones por el impacto ambiental son críticas. Su uso puede minimizar el impacto en los ecosistemas marinos y facilitar el cumplimiento de las regulaciones ambientales [39].
3. **RMP inteligente:** La combinación de biopolímeros con tecnologías inteligentes, como sensores y nanomateriales, puede permitir un monitoreo en tiempo real y un control preciso de las operaciones de RMP. Esto puede optimizar la inyección de fluidos, mejorar la eficiencia de barrido y maximizar la recuperación de petróleo [40].

Otros posibles enfoques de los biopolímeros y fuentes renovables y circulares

1. **Biopolímeros de microalgas:** Las microalgas, organismos fotosintéticos unicelulares, están emergiendo como una fuente prometedora de biopolímeros para RMP. Estos biopolímeros, como el alginato y el carragenano, presentan ventajas como alta viscosidad, biodegradabilidad y capacidad de formar geles; además, su producción a partir de microalgas ofrece beneficios ambientales, como la captura de CO₂ y la reducción de la dependencia de recursos fósiles [36,37].
2. **Biopolímeros de residuos agrícolas:** La valorización de residuos agrícolas, como bagazo de caña de azúcar, cáscaras de arroz, raquis del plátano, paja de trigo, entre otros, utilizados para la producción de biopolímeros, representa una estrategia sostenible, circular y económicamente atractiva. Estos biopolímeros, como la celulosa y la hemicelulosa, pueden ser modificados químicamente para mejorar sus propiedades y adaptarse a las condiciones específicas de los yacimientos [32].

A continuación, en la Tabla 1 se presentan de manera resumida otras investigaciones desarrolladas recientemente sobre biopolímeros aplicados en RMP.

TABLA 1. Algunas investigaciones en el campo de los biopolímeros aplicados en RMP

Biopolímeros	Técnicas/métodos	Efectos	Ref
Biopolímeros modificados por medio del uso de materia prima ecoamigable (quitosano, celulosa, almidón)	Modificación de biopolímeros	Ofrece múltiples beneficios: mejora la producción de petróleo, representa una alternativa sostenible a los polímeros sintéticos, presenta propiedades adaptables a diversas aplicaciones en RMP y reduce significativamente el impacto ambiental de las operaciones.	[4]
Goma xantana asociativa hidrofóbica (HAXG)	Modificación hidrofóbica.	Proporciona mayor viscosidad y propiedades reológicas mejoradas, reduciendo significativamente la tensión interfacial y aumentando la eficiencia de recuperación de petróleo incluso en ambientes de yacimiento con condiciones adversas.	[7]
Inyección de polímeros de goma guar asistida por NPs de sílice	Inyección de polímeros asistida por NPs.	Potencia la recuperación de petróleo en formaciones de arenisca mediante tres mecanismos: aumento de viscosidad del fluido inyectado, reducción de la permeabilidad en zonas saturadas y modificación favorable de la mojabilidad de la roca.	[14]
Polímero hidrosoluble asociativo (PHA)	Síntesis y caracterización.	Facilita la movilización y extracción de hidrocarburos pesados mediante propiedades reológicas mejoradas, especialmente diseñado para las condiciones particulares de yacimientos con petróleo de alta viscosidad.	[15]
Goma guar	Modificados por medio del uso de materia prima ecoamigable.	Permite aplicación efectiva en RMP bajo condiciones de alta salinidad y temperatura, constituyendo una alternativa sostenible y ambientalmente favorable para la industria petrolera.	[27]
Goma Xantana modificada anfipáticamente (XGP20)	Modificación química anfipática.	Incrementa la resistencia a condiciones de alta temperatura y salinidad, potenciando la viscosidad del fluido y optimizando la eficiencia del proceso de recuperación de petróleo.	[41]
Biopolímero (Escleroglucano)	Evaluación experimental en rocas carbonatadas bajo condiciones adversas.	Demuestra excepcional capacidad viscosificante y comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento, manteniendo buena inyectividad incluso en formaciones carbonatadas bajo condiciones de yacimiento desfavorables.	[42]
Nanofluido de almidón cristalino (CSNF) y solución de almidón de yuca (CS)	Síntesis de NPs de almidón cristalino, aplicación en RMP.	Optimiza múltiples parámetros críticos para la RMP: incrementa la viscosidad del fluido de desplazamiento, reduce la tensión interfacial entre fases, modifica la humectabilidad de la roca y aumenta la recuperación total con beneficios económicos demostrables.	[43]



Biopolímeros	Técnicas/métodos	Efectos	Ref
Derivado de palmitato-goma guar	Simulación experimental y de Monte Carlos.	Actúa como eficiente agente de inundación mediante la reducción de tensión interfacial, modificación de mojabilidad y aumento de viscosidad, manteniendo estabilidad bajo diversas condiciones de yacimiento para aplicaciones a largo plazo.	[44]
Goma guar modificada químicamente con monómeros vinílicos sintéticos	Modificación química.	Exhibe resistencia mejorada a condiciones extremas de temperatura y salinidad, con propiedades viscosificantes superiores que permiten su aplicación efectiva en yacimientos de arenisca con condiciones severas.	[45]
Goma xantana con NPs de dióxido de titanio (TiO ₂)	Inducción de NPs.	Permite la recuperación de viscosidad perdida por factores ambientales adversos, mejora la estabilidad general del fluido y modifica favorablemente la mojabilidad de la roca, optimizando el desplazamiento de hidrocarburos.	[46]
Galactomanano de guar aumentado en viscosidad (VGG)	Aumento de viscosidad, alteración de la mojabilidad	Incrementa la recuperación de petróleo en formaciones carbonatadas con saturación de aceite al modificar la mojabilidad de las superficies rocosas hacia condiciones más favorables al agua, mejorando el desplazamiento del hidrocarburo.	[47]
Polímeros (sintéticos y biopolímeros), (Xantano y copolímeros que contienen un alto nivel de sulfonato de 2-acrilamido-2-metilpropano (AMPS))	Simulación dinámica 3D, modelos económicos en investigaciones experimentales	Demuestra que las tecnologías de inyección de polímeros y PAG proporcionan mayor recuperación de hidrocarburos, con biopolímeros mostrando ventajas adaptativas bajo ciertas condiciones específicas de yacimiento.	[48]
Nanoplaquetas de grafeno (GNP) funcionalizadas con biopolímeros, (goma arábiga)	Evaluación de estabilidad, experimentos de adsorción e inyección	Potencia la adsorción de inhibidores de incrustaciones, exhibe perfiles favorables de inyectividad, extiende significativamente la vida útil del tratamiento y genera un potencial de recuperación incremental de hidrocarburos de hasta un 8 %.	[49]
Soluciones de biopolímeros (Esquizofilano, scleroglucano, goma guar y goma xantana)	Caracterización reológica	Presenta propiedades reológicas óptimas para diversas aplicaciones de RMP, demostrando versatilidad y adaptabilidad según las necesidades específicas del yacimiento tratado.	[50]
Polímeros sintéticos (ATBS) y biopolímero (escleroglucano)	Evaluación de rendimiento en yacimientos carbonatados bajo condiciones adversas	Revela comportamientos complementarios: el escleroglucano demuestra mayor estabilidad bajo condiciones extremas mientras que el ATBS exhibe mejor inyectividad, permitiendo seleccionar el polímero óptimo según las necesidades específicas del yacimiento.	[51]



Biopolímeros	Técnicas/ métodos	Efectos	Ref
Hidrogel inteligente a base de nanocristales de celulosa (CNC)	RMP con CO ₂ y secuestro de carbono	Optimiza simultáneamente la eficiencia de barrido, el control del flujo de fluidos y la recuperación total de petróleo, con el beneficio adicional de contribuir al secuestro de carbono como estrategia de mitigación climática.	[52]
Solución de goma xantana mejorada con nanosílices modificadas en la superficie	Modificación superficial de nanosílices	Aumenta significativamente la tolerancia a condiciones extremas de temperatura y salinidad, potencia las propiedades viscosificantes y maximiza la eficiencia de recuperación de petróleo en yacimientos con condiciones desafiantes.	[53]
Polímeros naturales	Inyección alternada de agua y gas, (WAG) con polímeros naturales, (PWAG)	Incrementa la eficiencia de barrido en formaciones heterogéneas y aumenta la eficiencia total de recuperación entre un 6 % y 10 %, ofreciendo una alternativa más sostenible a los métodos convencionales de WAG.	[54]
Goma welan modificada con poli(2-oxazolona)	Modificación química.	Funciona como polímero termoviscosificante altamente efectivo para aplicaciones de RMP en yacimientos de alta temperatura, donde los polímeros convencionales suelen degradarse o perder eficacia.	[55]
Biopolímeros modificados por medio del uso de materia prima ecoamigable	Modificación de biopolímeros, diversas técnicas de RMP	Demuestra gran potencial para incrementar la producción de petróleo mediante una aproximación sostenible y efectiva, adaptable a diversos tipos de yacimientos y condiciones de operación.	[56]
Combinación de álcali, biosurfactante y biopolímero (AbSbP)	Recuperación mejorada de petróleo/ procesos químicos	Aprovecha el mecanismo sinérgico entre componentes para maximizar la eficiencia de recuperación, utilizando α -metil éster sulfonato de sodio como alternativa ecológica a surfactantes convencionales derivados del petróleo.	[57]
Fluido de ruptura de gel (GBF) a base de gel de limpieza de surfactante polimérico	Evaluación de rendimiento y efecto en RMP.	Proporciona mejora significativa en la recuperación de petróleo mediante un mecanismo dual de limpieza y control de movilidad, optimizando el desplazamiento del hidrocarburo residual.	[58]
Hidroxietilcelulosa (HEC), goma xantana y goma guar	Evaluación de propiedades reológicas y resultados de inundación en núcleos bajo condiciones adversas	Presenta comportamiento reológico variable según el tipo de biopolímero, resultando en diferentes tasas de recuperación de petróleo para cada uno, lo que permite seleccionar el más adecuado según las características específicas del yacimiento.	[59]



Como se muestra en la Tabla 1, son cada vez más los estudios desarrollados enfocados en demostrar que los biopolímeros y nanomateriales pueden mejorar la recuperación de petróleo en comparación con los métodos convencionales.

A continuación, en la Tabla 2 se compara las características más relevantes del desempeño de biopolímeros y polímeros sintéticos en RMP

TABLA 2. Comparación del desempeño de biopolímeros y polímeros sintéticos en RMP [60,61,62,63,64,65,66]

Característica	Biopolímeros	Polímeros sintéticos
Origen	Producidos por organismos vivos	Derivados del petróleo
Eficiencia		
Disponibilidad	Variable	Alta
Viscosidad	Generalmente menor que los sintéticos, pero suficiente para muchas aplicaciones	Alta viscosidad, ideal para control de movilidad y barrido
Estabilidad térmica y química	Variable, algunos son sensibles a altas temperaturas y salinidad	Generalmente alta estabilidad, adecuados para condiciones adversas
Biodegradabilidad	Alta, reduce el impacto ambiental a largo plazo	Baja o nula, pueden persistir en el yacimiento
Costo		
Producción	Puede ser más alto debido a la complejidad de la extracción y procesamiento	Generalmente más bajo debido a procesos de producción establecidos
Transporte y almacenamiento	Similar a los sintéticos, depende de la forma y concentración	Similar a los biopolímeros
Impacto ambiental		
Toxicidad	Baja, generalmente no tóxicos para el medio ambiente	Variable, algunos pueden ser tóxicos
Renovabilidad	Renovables	No renovables
Huella de carbono	Menor, provienen de fuentes renovables	Mayor, provienen de fuentes fósiles
Biocompatibilidad	Adecuados para su uso en yacimientos sensibles al medio ambiente o en áreas donde las regulaciones ambientales son estrictas	Baja o nula adecuación con el medio ambiente

La elección entre biopolímeros, polímeros sintéticos, NPs y nanomateriales depende de las condiciones específicas del yacimiento, las consideraciones ambientales y los objetivos económicos. Los biopolímeros ofrecen una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente, mientras que los polímeros sintéticos pueden ser más eficientes y económicos en ciertas situaciones. La investigación y el desarrollo continuos buscan mejorar el rendimiento de los biopolímeros y reducir su costo, ampliando su aplicabilidad en RMP y contribuyendo a una industria petrolera más sostenible [67]. El uso de NPs y



nanomateriales en combinación con biopolímeros pueden mejorar el desplazamiento del petróleo al alterar la mojabilidad y propiedades interfaciales optimizando el factor de recobro y controlar la formación de emulsiones y espumas indeseadas [57].

Ventajas y Potencial de los biopolímeros en RMP

Los biopolímeros presentan un enorme potencial en la RMP, ofreciendo ventajas significativas sobre los polímeros sintéticos tradicionales. Entre las principales ventajas se pueden anotar las siguientes:

1. **Biodegradabilidad y compatibilidad ambiental:** La naturaleza biodegradable de los biopolímeros minimiza el impacto ambiental de las operaciones de RMP, reduciendo la contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas. Además, su baja toxicidad los hace adecuados para su uso en yacimientos sensibles al medio ambiente [68].
2. **Mejora de la eficiencia de barrido:** Los biopolímeros pueden aumentar la viscosidad del agua inyectada, lo que mejora la eficiencia de barrido y reduce la movilidad del fluido, permitiendo un desplazamiento más uniforme del petróleo y una mayor recuperación [69].
3. **Control de la permeabilidad:** Los biopolímeros tienen la capacidad de disminuir selectivamente la permeabilidad en zonas altamente permeables del yacimiento, lo que optimiza el control de flujo de los fluidos inyectados. Este mecanismo redirige estratégicamente el fluido hacia regiones de baja permeabilidad, permitiendo acceder y movilizar el petróleo que permanecía atrapado en estas áreas, incrementando así la eficiencia de barrido y la recuperación total. [41].
4. **Estabilidad térmica y química:** Algunos biopolímeros, como la escleroglucana, exhiben una buena estabilidad térmica y química, lo que los hace adecuados para su uso en yacimientos de alta temperatura y salinidad [15,70].

Ventajas de las NPs y nanomateriales

Las ventajas más relevantes del uso de NPs y nanomateriales en RMP son la alteración de la humectabilidad, la reducción de la tensión interfacial (TIF), la mejora de la reología y el control de movilidad. Recientes estudios han propuesto el uso de nanopartículas (NPs) para estabilizar microemulsiones (ME) y mejorar la recuperación de petróleo en condiciones difíciles. Se han desarrollado métodos para producir NPs de óxido de hierro in situ en ME de aceite en agua (o/w). Los resultados indicaron que el uso de ME puede aumentar significativamente la eficiencia de recuperación de petróleo, es decir, pasando del 10 % para ME sin NPs estabilizadoras al 28,9 % a una concentración de NPs de 6400 ppm [11].

Desafíos en la aplicación de biopolímeros y NPs y nanomateriales

A pesar del sinnúmero de investigaciones realizadas hasta el momento en esta área, aún quedan muchas dificultades por resolver. Entre las principales se pueden anotar la sensibilidad a las condiciones de yacimiento, la degradación microbiana para los



biopolímeros, la escalabilidad para las NPs y nanomateriales y el costo, las cuales se detallan a continuación:

- 1. Sensibilidad a las condiciones del yacimiento:** Las condiciones adversas presentes en muchos yacimientos, como alta salinidad, temperaturas elevadas y presencia de iones divalentes, pueden deteriorar significativamente la viscosidad y estabilidad de los biopolímeros, lo que limita su aplicación efectiva en estos entornos hostiles [71,72].
- 2. Degradación microbiana:** Los biopolímeros son inherentemente susceptibles a la degradación por acción de microorganismos naturalmente presentes en el yacimiento. Este proceso de biodegradación puede comprometer gradualmente su efectividad, reduciendo su rendimiento en aplicaciones que requieren estabilidad a largo plazo [73].
- 3. Viabilidad económica:** Los biopolímeros frecuentemente presentan costos de producción superiores en comparación con los polímeros sintéticos convencionales, a pesar de sus ventajas ambientales. Esta desventaja económica representa un obstáculo significativo para su implementación a escala industrial y comercial [63,64,65,66].
- 4. Complejidad de las NPs y nanomateriales:** La aplicación de nanopartículas y nanomateriales enfrenta múltiples desafíos relacionados con su potencial toxicidad, impacto medioambiental, escalabilidad de producción, incertidumbre regulatoria y aceptación pública. Para aprovechar el potencial de estas tecnologías de manera segura y responsable, es fundamental establecer estrategias de investigación multidisciplinaria, innovación continua y colaboración entre los sectores académico, industrial y regulatorio [74].

Innovaciones para optimizar el rendimiento de los biopolímeros

El uso de los biopolímeros en RMP puede optimizarse mediante diversas estrategias de innovación tecnológica. Entre las más prometedoras se destacan:

- 1. Modificación química:** La transformación de la estructura química de los biopolímeros permite mejorar su resistencia a la degradación, aumentar su estabilidad térmica y química, y potenciar su rendimiento bajo las condiciones adversas presentes en diversos yacimientos [31].
- 2. Desarrollo de sistemas híbridos:** La combinación estratégica de biopolímeros con polímeros sintéticos o nanopartículas posibilita la creación de sistemas híbridos con propiedades superiores, como mayor resistencia a la degradación y control optimizado de la permeabilidad en diferentes zonas del yacimiento [75,76].
- 3. Aplicación de ingeniería genética:** La manipulación genética dirigida de microorganismos productores de biopolímeros facilita el desarrollo de compuestos con propiedades personalizadas específicamente diseñadas para las diversas aplicaciones y condiciones de la RMP [77].

Consideraciones económicas del uso de biopolímero, NPs y nanomateriales en RMP

La viabilidad económica de los biopolímeros en RMP es un factor crucial a considerar, ya que impacta directamente en la rentabilidad de los proyectos de recuperación de petróleo. A continuación, se analizan los principales aspectos económicos:

Costos asociados

Son varios los costos asociados al uso de biopolímeros, NPs, y nanomateriales en RMP. Los más relevantes se mencionan a continuación:

- 1. Costo de producción de biopolímeros:** Puede ser más elevado que el de los polímeros sintéticos debido a la complejidad de los procesos de extracción, purificación y modificación química; sin embargo, el avance en la biotecnología y la utilización de fuentes renovables y residuos agrícolas están contribuyendo a reducir estos costos [57,58,78].
- 2. Transporte y almacenamiento:** Los costos de transporte y almacenamiento dependen de la forma y concentración del biopolímero. En general, los biopolímeros en polvo o gránulos son más fáciles de transportar y almacenar que las soluciones líquidas, lo que puede reducir los costos logísticos [79].
- 3. Aplicación:** El costo de aplicación de biopolímeros en el yacimiento incluye la preparación de la solución, la inyección y el monitoreo del proceso. Estos costos pueden variar dependiendo de las características del yacimiento, la tecnología de inyección utilizada y la complejidad del proyecto [80].

Potencial de retorno de la inversión

Está influenciado por tres puntos importantes que se indican a continuación:

- 1. Mayor recuperación de petróleo:** Los biopolímeros pueden mejorar significativamente la recuperación de petróleo en comparación con los métodos convencionales, lo que se traduce en un mayor volumen de producción y mayores ingresos [81].
- 2. Beneficios ambientales:** El uso de biopolímeros biodegradables puede reducir los costos asociados a la remediación ambiental y el cumplimiento de regulaciones, además de mejorar la imagen de la empresa en términos de sostenibilidad [82].

Análisis costo-beneficio

La evaluación económica de los biopolímeros en RMP debe considerar un análisis detallado de los costos y beneficios potenciales dependiendo de cada caso; no obstante, factores como el precio del petróleo, las características del yacimiento, la tecnología disponible y las regulaciones ambientales influyen en la viabilidad económica de cada proyecto [83].



Biopolímeros y sostenibilidad

La adopción de biopolímeros en la RMP trasciende los beneficios económicos y técnicos, posicionándose como un pilar fundamental en la transición hacia una industria petrolera más sostenible y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODSs) [11].

Beneficios ambientales:

El uso de biopolímeros biodegradables puede reducir los costos asociados a la remediación ambiental y el cumplimiento de regulaciones, además de mejorar la imagen de la empresa en términos de sostenibilidad [82].

Reducción de costos operativos:

La mejora en la eficiencia de barrido y la reducción de la necesidad de inyectar grandes volúmenes de agua pueden disminuir los costos operativos a largo plazo [83].

Reducción del impacto ambiental

- 1. Biodegradabilidad:** La naturaleza biodegradable de los biopolímeros minimiza la contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas, protegiendo los ecosistemas y la biodiversidad. Esto contribuye directamente al ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y al ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres).
- 2. Baja toxicidad:** La ausencia de sustancias tóxicas en los biopolímeros reduce el riesgo de daños a la salud humana y al medio ambiente, promoviendo el ODS 3 (salud y bienestar) y el ODS 12 (producción y consumo responsables).
- 3. Menor huella de carbono:** La producción de biopolímeros a partir de fuentes renovables, como residuos agrícolas y microalgas, disminuye la dependencia de recursos fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al ODS 13 (acción por el clima).

Fomento de la Bioeconomía Circular

- 1. Valorización de residuos:** La utilización de residuos agrícolas y otros subproductos como materia prima para la producción de biopolímeros promueve la economía circular y reduce el desperdicio, en línea con el ODS 12 (producción y consumo responsables).
- 2. Desarrollo de bioeconomías locales:** La producción y aplicación de biopolímeros pueden impulsar el desarrollo de bioeconomías locales, generando empleo y promoviendo el crecimiento económico sostenible en comunidades cercanas a los yacimientos, contribuyendo al ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico).

Responsabilidad social empresarial

- 1. Imagen corporativa:** La adopción de tecnologías sostenibles, como los biopolímeros, mejora la imagen corporativa de las empresas petroleras, demostrando



su compromiso con la protección del medio ambiente y la responsabilidad social, en consonancia con el ODS 12 (producción y consumo responsable) y el ODS 17 (alianzas para lograr los objetivos).

- 2. Licencia social para operar:** El uso de biopolímeros puede facilitar la obtención de la licencia social para operar, al reducir el impacto ambiental de las actividades de RMP y generar confianza en las comunidades locales, contribuyendo al ODS 16 (paz, justicia e instituciones sólidas).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los biopolímeros, NPs y nanomateriales desempeñan un papel crucial en la construcción de una industria petrolera más sostenible y responsable. Su adopción no solo mejora la eficiencia de la recuperación de petróleo, sino que también reduce el impacto ambiental, promueve la economía circular y fortalece la licencia social para operar. Al elegir biopolímeros, NPs y nanomateriales, la industria petrolera puede alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y contribuir a un futuro más limpio y equitativo para todos.

El uso de biopolímeros, NPs y nanomateriales se perfila como una solución innovadora y sostenible para la RMP. A pesar de los retos técnicos y operativos que aún persisten, su potencial para incrementar la producción de manera ecológica y a un costo reducido los convierte en una herramienta clave para la industria petrolera del futuro. La continua investigación y desarrollo en este campo permitirá superar las limitaciones actuales y consolidar a los biopolímeros, NPs y nanomateriales como alternativas viables y responsables en la búsqueda de un futuro energético más sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Universidad San Francisco, por el espacio para la publicación.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Lourdes Orejuela-Escobar, Edwars Naranjo, e Inés Hernández diseñaron y concibieron la revisión de los artículos reseñados. Edwars Naranjo, Inés Hernández y Lourdes Orejuela realizaron la escritura del manuscrito, y Lourdes Orejuela-Escobar realizó la edición, validación y revisión final del documento.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan que no hay conflicto de intereses en esta investigación y que no ha habido financiación externa para esta investigación. No existe ningún interés financiero ni no financiero que declarar.

REFERENCIAS

- [1] Emad, W. (2022). Effects of trapping number on biopolymer flooding recovery of carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development Online*, 49(4), 895-905. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60319-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60319-7)
- [2] Kumar, A., Mishra, R. K., Verma, K., Aldosari, S. M., Maity, C. K., Verma, S., & Thakur, V. K. (2023). A comprehensive review of various biopolymer composites and their applications: From biocompatibility to self-healing. *Materials Today Sustainability*, 23, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100431>
- [3] de Souza, C. K., Ghosh, T., Lukhmana, N., Tahiliani, S., Priyadarshi, R., Hoffmann, T. G., [...] & Han, S. S. (2023). Pullulan as a sustainable biopolymer for versatile applications: A review. *Materials Today Communications*, 36, 106477. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106477>
- [4] Abou-alfitooh, S. A., & El-hoshoudy, A. N. (2024). Eco-friendly modified biopolymers for enhancing oil production: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(5), 2457-2483. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03132-1>
- [5] Rodríguez-Gomez, D., López-Ramírez, V., Alpizar-Negrete, A., & Calixto-Olalde, M. E. (2020). *Biopolímeros: de principio a fin. Mujeres en la Ciencia Biología*, ECORFAN, 107-129.
- [6] Saravia, J. M. H. (n.d.). *Injectivity of biopolymers solutions through porous media* <https://doi.org/10.47749/tunicamp.2023.1390915>
- [7] Fu, X., Qin, F., Liu, T., & Zhang, X. (2021). Enhanced oil recovery performance and solution properties of hydrophobic associative xanthan gum. *Energy & Fuels*, 36(1), 181-194. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02941>
- [8] Gao, X., Huang, L., Xiu, J., Yi, L., & Zhao, Y. (2023). Evaluation of viscosity changes and rheological properties of diutan gum, xanthan gum, and scleroglucan in extreme reservoirs. *Polymers*, 15(21), 4338. <https://doi.org/10.3390/polym15214338>
- [9] García, R. H. C. (2024). *Evaluación de las interacciones biopolímero escleroglucano (grado RMP), entrecruzador y nanopartícula basada en el comportamiento de las propiedades reológicas y desempeño en recobro mejorado* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85890>
- [10] Meleán Brito, R. S., Padró, J. M., Villa-Pérez, C., Strumia, M. C., Mattea, F., & Milanesio, J. M. (2024). Hydrophobic dendritic modification of a poly (acrylamide-co-acrylic acid) copolymer with Behera s amine as viscous agent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(31), 13580-13589. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01650>
- [11] Pu, J., Bai, B., & Schuman, T. P. (2021). Systematic evaluation of a novel self-healing poly (acrylamide-co-vinyl acetate)/alginate polymer gel for fluid flow control in high temperature and high salinity reservoirs. *Polymers*, 13(21), 3616. <https://doi.org/10.3390/polym13213616>
- [12] Wu, Y., Jiang, Z., Wang, Y., Jiang, X., Hou, J., & Wei, B. (2024). TEMPO oxidized cellulose nanofiber-reinforced sodium alginate encapsulated poly (acrylamide) microcapsules and its releasing behaviours for enhancing oil recovery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 135707. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135707>
- [13] Olabode, O., Oni, B., Dike, H., Akinsanya, O., Ajidahun, J., & Olaniyan, D. (2024). Investigating the effect of salt concentration on oil recovery during guar gum polymer flooding: A simulation study. *Results in Engineering*, 22, 102269. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102269>
- [14] Ogunkunle, T. F., Oni, B. A., Afolabi, R. O., Fadairo, A. S., Ojo, T., & Adesina, O. (2022). Comparative analysis of the performance of hydrophobically associating polymers, xanthan and guar gum as mobility controlling agents in enhanced oil recovery application. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 34(7), 402-407. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.01.003>
- [15] Bera, A., Shah, S., Shah, M., Agarwal, J., & Vij, R. K. (2020). Mechanistic study on silica nanoparticles-assisted guar gum polymer flooding for enhanced oil recovery in sandstone reservoirs. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 598, 124833. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124833>
- [16] Elsaheed, S. M., Zaki, E. G., Omar, W. A., Ashraf Soliman, A., & Attia, A. M. (2021). Guar gum-based hydrogels as potent green polymers for enhanced oil recovery in high-salinity reservoirs. *ACS Omega*, 6(36), 23421-23431. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03352>



- [17] Molnes, S. N., Mamonov, A., Paso, K. G., Strand, S., & Syverud, K. (2018). Investigation of a new application for cellulose nanocrystals: A study of the enhanced oil recovery potential by use of a green additive. *Cellulose*, 25, 2289-2301. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1715-5>
- [18] Yuan, J., Liu, D., Tian, Y., Tang, H., Wang, S., Song, J., & Jia, H. (2024). Novel insights to the effects of different modification groups on the enhanced oil recovery related properties of carboxyl nanocellulose at the crude oil/water interface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 686, 133351. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133351>
- [19] Logan, K. J., & Thomas, B. A. (1985). Distribution of lignin derivatives in plants. *New Phytologist*, 99(4), 571-585. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb03685.x>
- [20] Abbas, A. H., Pourafshary, P., Wan Sulaiman, W. R., Jaafar, M. Z., & Nyakuma, B. (2021). Toward reducing surfactant adsorption on clay minerals by lignin for enhanced oil recovery application. *ACS Omega*, 6(29), 18651-18662. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01342>
- [21] He, Z., Wang, M., & Ma, S. (2024). Porous lignin-based composites for oil/water separation: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129569. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129569>
- [22] Zhang, M., Wen, Y., Deng, Q., Xue, C., Ji, D., Gong, W., & Li, Y. (2024). Sustainable nanofluids constructed from size-controlled lignin nanoparticles: Application prospects in enhanced oil recovery. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(42), 46486-46496. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsmi.4c07918>
- [23] Alshehri, F. (2019). Production of polyhydroxybutyrate (PHB) by bacteria isolated from soil of Saudi Arabia. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 13(2), 897-904. <https://doi.org/10.22207/JPAM.13.2.26>
- [24] Lv, W., Wu, J., Ma, X., Xu, X., Wang, X., Zhu, J., [...] & Chen, J. (2024). Superhydrophobic polyurethane foam based on castor oil and lignin with SiC nanoparticles for efficient and recyclable oil-water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 104897. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104897>
- [25] Kumar, P., Singh, M., Mehariya, S., Patel, S. K., Lee, J. K., & Kalia, V. C. (2014). Ecobiotechnological approach for exploiting the abilities of *Bacillus* to produce co-polymer of polyhydroxyalkanoate. *Indian Journal of Microbiology*, 54, 151-157. <https://doi.org/10.1007/s12088-014-0457-9>
- [26] Rivera, M. A. H., Morales, M. E. O., & Morales, A. M. (2019). Recuperación mejorada de petróleo asistida por microorganismos con capacidad de sintetizar biosurfactantes. *Emerging Trends in Education*, 5(15), 5-20. <https://doi.org/10.19136/jobs.a5n15.3569>
- [27] Salam, A. H., Alsaif, B., Hussain, S. M. S., Khan, S., Kamal, M. S., Patil, S., [...] & Hassan, A. M. (2024). Advances in understanding polymer retention in reservoir rocks: A comprehensive review. *Polymer Reviews*, 64(4), 1387-1413. <https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2373925>
- [28] Musa, T. A., Ibrahim, A. F., Nasr-El-Din, H. A., & Hassan, A. M. (2021). New insights into guar gum as environmentally friendly polymer for enhanced oil recovery in high-salinity and high-temperature sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11(4), 1905-1913 <https://doi.org/10.1007/s13202-020-01080-3>
- [29] Lopez Sanchez, A. M. (2021). *Estudio de pre-factibilidad del método de inyección de soluciones poliméricas en recuperación mejorada al Campo los Cusis* [Tesis doctoral, Universidad Mayor de San Andrés]. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/36355>
- [30] Correia, J. A. H. (2024). *Development of (bio) molecules' cocktails (including (bio) polymers and (bio) surfactants) to promote additional oil recovery* [Tesis doctoral, Universidade do Minho]. <https://hdl.handle.net/1822/89382>
- [31] Carvalho, R. T., da Silva Santos, A., Marques, A. M. T., Palermo, L. C., & Mansur, C. R. (2024). Experimental design to optimize the extraction and properties of an alternative gum from *Crotalaria Juncea* seeds. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(4), 1837-1848. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03068-6>
- [32] Abou-alfitoh, S. A., El-Hosiny, F. I., Ramzi, M., Mansour, E. M., Elnaggar, O. M., & El-hoshoudy, A. N. (2021). Chemical modification of guar by different synthetic vinyl monomers for enhancing oil recovery under severe sandstone reservoir conditions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 30(3), 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2021.07.001>
- [33] Perdana, R. H., Afridhol, M. K., Erfando, T., Setiawan, C., Saputra, I. D., & Adam, F. (2023, May). Biopolymer manufacturing from pectin extraction of jackfruit waste to increase oil production in EOR. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1187, No. 1, p. 012003). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1187/1/012003>

- [34] El-Masry, J. F., Bou-Hamdan, K. F., Abbas, A. H., & Martyushev, D. A. (2023). A comprehensive review on utilizing nanomaterials in enhanced oil recovery applications. *Energies*, 16(2), 691. <https://doi.org/10.3390/en16020691>
- [35] Choque Guzmán, J. A. (2022). *Análisis de factibilidad de la inyección combinada de álcali-surfactante-polímero (ASP), para incrementar el factor de recuperación del Campo La Peña* [Tesis doctoral, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/32113>
- [36] Lalji, S. M., Ali, S. I., & Asad, M. (2023). Experimental effect of biopolymers, synthetic and modified polymers on Western Pakistan shale (GHAZI) stability. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(12), 16639-16653. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07737-5>
- [37] Madadi, R., Maljaee, H., Serafim, L. S., & Ventura, S. P. (2021). Microalgae as contributors to produce biopolymers. *Marine Drugs*, 19(8), 466. <https://doi.org/10.3390/md19080466>
- [38] Medrano Barboza, J. L. (2024). *Biorrefinería de microalgas: Una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales de origen industrial y la valorización energética de la biomasa obtenida* [Tesis de maestría, Universidad Rey Juan Carlos]. <https://burjcdigital.urjc.es/items/ae117298-6b01-48c5-af35-83ccf9a7d817>
- [39] Torres Martínez, J. G. (2020). *Síntesis y caracterización de un polímero hidrosoluble asociativo (PHA) para su aplicación en la recuperación mejorada de petróleo pesado* [Tesis doctoral, Universidad Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/28551/TESIS%20JOSELINE%20GUADALUPE%20TORRES%20MARTINEZ%281%29.pdf?sequence=1>
- [40] Elhossary, D. A., Alameri, W., & Al-Shalabi, E. W. (2020, May). Experimental investigation of biopolymer rheology and injectivity in carbonates. In *Offshore Technology Conference*. OTC. <https://doi.org/10.4043/30680-MS>
- [41] Junin, R., & Agi, A. (2020, October). Experimental investigation of ultrasound-assisted weak-acid hydrolysis of crystalline starch nanoparticles for chemical enhanced oil recovery. In *Offshore Technology Conference Asia*. OTC. <https://doi.org/10.4043/30071-MS>
- [42] Huang, J., Zhong, C., & Yang, Y. (2020). Aggregating thermodynamic behavior of amphiphilic modified xanthan gum in aqueous solution and oil-flooding properties for enhanced oil recovery. *Chemical Engineering Science*, 216, 115476. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115476>
- [43] Said, M., Haq, B., Al Shehri, D., Rahman, M. M., Muhammed, N. S., & Mahmoud, M. (2021). Modification of xanthan gum for a high-temperature and high-salinity reservoir. *Polymers*, 13(23), 4212. <https://doi.org/10.3390/polym13234212>
- [44] Gunaji, R. G., Junin, R., Bandyopadhyay, S., & Guttula, P. (2020). Production of biopolymer Schizophyllan using local sources in Malaysia. In *Offshore Technology Conference Asia*. OTC. <https://doi.org/10.4043/30156-MS>
- [45] El-hoshoudy, A. N. (2024). Assessment of biopolymers rheological properties and flooding results under reservoir conditions for enhanced oil recovery processes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(9), 231-244. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2024.258404.9090>
- [46] Rock, A., Hincapie, R. E., Tahir, M., Langanke, N., & Ganzer, L. (2020). On the role of polymer viscoelasticity in enhanced oil recovery: Extensive laboratory data and review. *Polymers*, 12(10), 2276. <https://doi.org/10.3390/polym12102276>
- [47] Keykhosravi, A., Vanani, M. B., & Aghayari, C. (2021). TiO₂ nanoparticle-induced Xanthan Gum Polymer for EOR: Assessing the underlying mechanisms in oil-wet carbonates. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 204, 108756. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108756>
- [48] Rellegadla, S., Jain, S., Sangwai, J. S., Lavania, M., Lal, B., Gieg, L., [...] & Agrawal, A. (2021). Wettability alteration of the oil-wet carbonate by viscosity-augmented guar galactomannan for enhanced oil recovery. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(4), 1983-1994. <https://doi.org/10.1021/acscapm.1c00059>
- [49] Dennar, L., Amro, M., Kummer, N. A., Arochukwu, E., Suleiman, A., & Ekpeyong, O. (2021). Exploring the suitability of polymer injection in the Niger delta sands using 3-D simulation and experimental analysis-a case study. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/207093-MS>
- [50] Zainal, S., Razali, N., & Rodzali, M. A. (2023). Graphene nanoplatelets for extended lifetime of scale inhibitor squeeze treatment in high temperature reservoirs. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/215228-MS>

- [51] Clinckspoor, K. J., Sousa-Ferreira, V. H. D., & Barros-Zanoni-Lopes-Moreno, R. (2021). Bulk rheology characterization of biopolymer solutions and discussions of their potential for enhanced oil recovery applications. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 11(1), 123-135. <https://doi.org/10.29047/01225383.367>
- [52] Elhossary, D. A., Sebastian, A., Alameri, W., & Al-Shalabi, E. W. (2021, December). Bulk rheology and injectivity assessments of potential biopolymer and synthetic polymer for applications in carbonates under harsh conditions. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference* (p. D0315068R003). SPE. <https://doi.org/10.2118/208105-MS>
- [53] Carpenter, C. (2021). Cellulose nanocrystal switchable gel improves CO2 sweep efficiency. *Journal of Petroleum Technology*, 73(11), 58-59. <https://doi.org/10.2118/1121-0058-JPT>
- [54] Xu, L., Liu, X., Ding, H. Y., Zhang, H., Liu, L., Li, J. H., [...] & Dong, M. Z. (2023). Temperature/salt tolerance and oil recovery of xanthan gum solution enhanced by surface-modified nanosilicas. *Petroleum Science*, 20(1), 577-589. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.08.020>
- [55] Abbas, A. H., Zhuniskenov, Y., Serikov, G., Nyah, F., Ridzuan, N., Gbonhinbor, J., & Agi, A. (2024, August). Navigating the future: A numerical study of natural polymers and CO2 in offshore applications. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/221614-MS>
- [56] He, S., Zhang, M., Chen, B., Wei, X., & Su, X. (2024). Modification of Welan gum with poly (2-oxazoline) to obtain thermoviscosifying polymer for enhanced oil recovery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130193. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130193>
- [57] Massarweh, O., & Abushaikha, A. S. (2024). Towards environmentally sustainable oil recovery: The role of sustainable materials. *Energy Reports*, 12, 95-119. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.013>
- [58] Habib, S. H., Yunus, R., Zakaria, R., Biak, D. R. A., Jan, B. H. M., & Amir, Z. (2024). Chemical enhanced oil recovery: Synergetic mechanism of alkali, surfactant and polymer with overview of methyl ester sulfonate as a green alternative for EOR surfactant. *Fuel*, 363, 130957. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130957>
- [59] Liao, Y., Jin, J., Du, S., Ren, Y., & Li, Q. (2024). Research on performance evaluation of polymeric surfactant cleaning gel-breaking fluid (GBF) and its enhanced oil recovery (EOR) effect. *Polymers*, 16(3), 397. <https://doi.org/10.3390/polym16030397>
- [60] Al_Ani, M., Sidek, M. A., Jaafar, M. Z., Agi, A., Gbonhinbor, J., Ridzuan, N., [...] & Oseh, J. (2023, July). Application of lignin polymeric nanofluid as a chemical enhanced oil recovery agent at reservoir condition. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/217132-MS>
- [61] Ramadhan, R., Abdurahman, M., & Srisuriyachai, F. (2020). Sensitivity analysis comparison of synthetic polymer and biopolymer using reservoir simulation. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 43(3), 143-152. <https://doi.org/10.29017/scog.43.3.516>
- [62] Muhammed, N. S., Haq, M. B., Al-Shehri, D., Rahaman, M. M., Keshavarz, A., & Hossain, S. Z. (2020). Comparative study of green and synthetic polymers for enhanced oil recovery. *Polymers*, 12(10), 2429. <https://doi.org/10.3390/polym12102429>
- [63] Gowthaman, N. S. K., Lim, H. N., Sreeraj, T. R., Amalraj, A., & Gopi, S. (2021). Advantages of biopolymers over synthetic polymers: Social, economic, and environmental aspects. In *Biopolymers and their industrial applications* (pp. 351-372). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819240-5.00015-8>
- [64] Mtibe, A., Motloung, M. P., Bandyopadhyay, J., & Ray, S. S. (2021). Synthetic biopolymers and their composites: Advantages and limitations—An overview. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(15), 2100130. <https://doi.org/10.1002/marc.202100130>
- [65] Reddy, M. S. B., Ponnamma, D., Choudhary, R., & Sadasivuni, K. K. (2021). A comparative review of natural and synthetic biopolymer composite scaffolds. *Polymers*, 13(7), 1105. <https://doi.org/10.3390/polym13071105>
- [66] Hahn, S., & Hennecke, D. (2022, May). *Final Report WP4—Comparison between natural and synthetic polymers* [Technical report]. German Environment Agency. <https://cefic-iri.org/wp-content/uploads/2022/07/EC052-WP4-Report-polymer-Final.pdf>
- [67] Ortiz Suarez, M. A. (2022). *Reducción del impacto ambiental de la industria petrolera en Bolivia mediante la implementación de Nanotecnología* [Tesis doctoral, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional – Universidad Mayor de San Andrés. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/36360>

- [68] Hu, Z., Nourafkan, E., Gao, H., & Wen, D. (2017). Microemulsions stabilized by in-situ synthesized nanoparticles for enhanced oil recovery. *Fuel*, 210, 272-281. <https://doi.org/10.34726/hss.2024.114641>
- [69] Arumanatharayil, J. J. (2024). *Exploring the effectiveness of biosurfactant in enhancing oil recovery and reducing environmental impact in oil and gas industry* [Tesis doctoral, Technische Universität Wien]. TU Wien Academic Press. <https://doi.org/10.34726/hss.2024.114641>
- [70] Ali, A. G., Amao, A. M., & Moawad, T. M. (2024). Citrus-based biopolymer for enhanced oil recovery applications in high-salinity, high-temperature reservoirs. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(6), 8643-8659. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08619-6>
- [71] Castro, R. H., Corredor, L. M., Llanos, S., Causil, M. A., Arias, A., Pérez, E., [...] & Cortés, F. B. (2024). Experimental investigation of the viscosity and stability of scleroglucan-based nanofluids for enhanced oil recovery. *Nanomaterials*, 14(2), 156. <https://doi.org/10.3390/nano14020156>
- [72] Chaturvedi, K. R., Narukulla, R., Goswami, R. R., & Sharma, T. (2024). Challenges, opportunities, and the way ahead in polymer flooding. In *Advancements in chemical enhanced oil recovery* (1st ed., pp. 61–84). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003453727-4>
- [73] Maleki, M., Kazemzadeh, Y., Dehghan Monfared, A., Hasan-Zadeh, A., & Abbasi, S. (2024). Bio-enhanced oil recovery (BEOR) methods: All-important review of the occasions and challenges The Canadian Journal of Chemical Engineering. <https://doi.org/10.1002/cjce.25216>
- [74] Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- [75] Qamar, S. A., Junaid, M., Riasat, A., Jahangeer, M., Bilal, M., & Mu, B. Z. (2024). Carrageenan-based hybrids with biopolymers and nano-structured materials for biomimetic applications. *Starch-Stärke*, 76(1-2), 2200018. <https://doi.org/10.1002/star.202200018>
- [76] Mumtaz, M., Hussain, N., Ashraf, M., Azam, H. M. H., & Iftikhar, A. (2024). Introduction to biopolymers, their blend, IPNs, gel, composites, and nanocomposites. In *Applications of Biopolymers in Science, Biotechnology, and Engineering* (pp. 1-29). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119783473.ch1>
- [77] Wu, B., Xiu, J., Yu, L., Huang, L., Yi, L., & Ma, Y. (2022). Research advances of microbial enhanced oil recovery. *Heliyon*, 8(11), e11367. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11424>
- [78] Pandey, A., Qamar, S. F., Das, S., Basu, S., Kesarwani, H., Saxena, A., [...] & Sarkar, J. (2024). Advanced multi-wall carbon nanotube-optimized surfactant-polymer flooding for enhanced oil recovery. *Fuel*, 355, 129463. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129463>
- [79] Tackie-Otoo, B. N., Mohammed, M. A. A., Yekeen, N., & Negash, B. M. (2020). Alternative chemical agents for alkalis, surfactants and polymers for enhanced oil recovery: Research trend and prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106828. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106828>
- [80] Matovanni, M. P. N., Ikhsanudin, M. N., Arvianto, R. I., Waluyo, J., Distantina, S., Kaavessina, M., & Pranolo, S. H. (2023). The prospects and challenges of biopolymers for enhanced oil recovery (EOR). *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 7(1), 78-86. <https://jurnal.uns.ac.id/equilibrium/article/view/73947>
- [81] Xia, S., Zhang, L., Davletshin, A., Li, Z., You, J., & Tan, S. (2020). Application of polysaccharide biopolymer in petroleum recovery. *Polymers*, 12(9), 1860. <https://doi.org/10.3390/polym12091860>
- [82] Abdulrahman, J., Ebhota, W. S., & Tabakov, P. Y. (2024). Biopolymer composite materials in oil and gas sector. *International Journal of Polymer Science*, 2024(1), 8584879. <https://doi.org/10.1155/2024/8584879>
- [83] Osorio, S. E. T., Arias, C. J. Y., Laguaquiza, J. S. E., & Molina, J. C. T. (2024). Soluciones energéticas sostenibles: un estudio sobre estrategias para el uso de gas asociado a la extracción de petróleo en la industria ecuatoriana. *AlfaPublicaciones*, 6(2), 52-72. <https://doi.org/10.33262/ap.v6i2.467>