

Artículo de investigación

Cómo citar: A. Bohórquez; O. Castiblanco. "Revisión del uso de biosurfactantes para su implementación en los procesos de recuperación mejorada de petróleo", Revista Inventum, vol. 16, no. 31, pp. 4-14. Julio - diciembre. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.16.31.2021.4-14

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520 (Impreso)
eISSN: 2590-8219 (En línea)

Fecha de recibido: 30 de mayo de 2021
Fecha de aprobado: 20 de junio de 2021
Fecha de publicación: 15 de julio de 2021

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

Revisión del uso de biosurfactantes para su implementación en los procesos de recuperación mejorada de petróleo¹

Review of the use of biosurfactants for their implementation in enhanced oil recovery processes

Revisão do uso de biossurfactantes para sua implementação em processos aprimorados de recuperação de óleo

Resumen

Mejorar el desempeño de los procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR) es de vital importancia en la industria petrolera, debido a que la cantidad de campos maduros seguirá creciendo y cada año más yacimientos superarán su pico de producción. Las tecnologías emergentes de recobro químico son una alternativa eficiente para reducir la cantidad de petróleo remanente que queda originalmente en sitio después de realizar las técnicas convencionales de extracción. Sin embargo, las sustancias químicas usadas son de origen sintético, lo que quiere decir que no son biodegradables. Por tal razón, la industria petrolera reconoce la necesidad de implementar nuevas técnicas amigables con el medio ambiente, que permitan aumentar el recobro de petróleo en campos maduros dada la dificultad de encontrar nuevos yacimientos. En este artículo se revisa la implementación de biosurfactantes en los procesos de recuperación mejorada de petróleo como una nueva alternativa para los procesos de recobro químico. El interés por crear e implementar compuestos que sean biodegradables, no tóxicos y además eficientes ha aumentado en todos los sectores de la industria durante los últimos años, y el caso de los surfactantes no es la excepción, ya que se ha demostrado que tienen un gran potencial de aplicación. Los biosurfactantes, a diferencia de sus contrapartes sintéticas, se producen a partir de recursos renovables, utilizando materias primas vegetales o mediante procesos de fermentación con diferentes tipos de microorganismos. Además, son biodegradables, tienen una menor toxicidad, una alta capacidad de reducir la tensión interfacial (IFT) a concentraciones bajas y presentan una buena actividad en un amplio rango de temperaturas.

Palabras clave: recuperación mejorada de petróleo (EOR), recobro químico, biosurfactante, surfactante, tensión interfacial (IFT), biodegradable.

¹ Producto derivado del proyecto de investigación *Evaluación de la implementación de biosurfactantes en los procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR) mediante simulación numérica*. Departamento de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia

Anngy Marcela Bohórquez Rodríguez
anngy.bohorquez@estudiantes.uamerica.edu.co;
ORCID: 0000-0003-4604-3674.

Orlando Castiblanco Urrego
orlando.castiblanco@profesores.uamerica.edu.co
ORCID: 0000-0002-3238-0912.



Abstract

Improving the performance of Enhanced Oil Recovery (EOR) processes is of vital importance in the oil industry, because the number of mature fields will continue to grow and each year more fields will exceed their production peak. Emerging chemical recovery technologies are an efficient alternative to reduce the amount of oil remaining originally on site after conventional extraction techniques are carried out. However, the chemicals used are of synthetic origin, which means that they are not biodegradable. For this reason, the oil industry recognizes the need to implement new environmentally friendly techniques that allow increasing oil recovery in mature fields given the difficulty of finding new deposits. This article reviews the implementation of biosurfactants in enhanced oil recovery processes as a new alternative for chemical recovery processes. The interest in creating and implementing compounds that are biodegradable, non-toxic and also efficient has increased in all sectors of the industry in recent years, and the case of surfactants is no exception, since they have been shown to have a great application potential. Biosurfactants, unlike their synthetic counterparts, are produced from renewable resources, using plant raw materials or through fermentation processes with different types of microorganisms. In addition, they are biodegradable, have a lower toxicity, a high capacity to reduce the interfacial tension (IFT) at low concentrations and have good activity in a wide range of temperatures.

Keywords: enhanced oil recovery (EOR), chemical recovery, biosurfactant, surfactant, interfacial tension (IFT), biodegradable.

Resumo

Melhorar o desempenho dos processos Enhanced Oil Recovery (EOR) é de vital importância na indústria do petróleo, porque o número de campos maduros continuará a crescer e a cada ano mais campos excederão seu pico de produção. Tecnologias emergentes de recuperação química são uma alternativa eficiente para reduzir a quantidade de óleo remanescente originalmente no local após a aplicação de técnicas convencionais de extração. No entanto, os produtos químicos utilizados são de origem sintética, o que significa que não são biodegradáveis. Por este motivo, a indústria do petróleo reconhece a necessidade de implementar novas técnicas ambientalmente corretas que permitam aumentar a recuperação de petróleo em campos maduros, dada a dificuldade de encontrar novos depósitos. Este artigo analisa a implementação de biossurfactantes em processos de recuperação avançada de óleo como uma nova alternativa para processos de recuperação química. O interesse em criar e implementar compostos biodegradáveis, atóxicos e também eficientes tem aumentado em todos os setores da indústria nos últimos anos, e o caso dos surfactantes não foge à regra, pois têm demonstrado grande potencial de aplicação. Os biossurfactantes, ao contrário de seus equivalentes sintéticos, são produzidos a partir de recursos renováveis, a partir de matérias-primas vegetais ou por meio de processos de fermentação com diferentes tipos de microrganismos. Além disso, são biodegradáveis, apresentam menor toxicidade, alta capacidade de redução da tensão interfacial (IFT) em baixas concentrações e apresentam boa atividade em uma ampla faixa de temperaturas.

Palavras-chave: recuperação aprimorada de óleo (EOR), recuperação química, biossurfactante, surfactante, tensão interfacial (IFT), biodegradável.

I. INTRODUCCIÓN

Los combustibles hidrocarbonados han sido la fuente de energía más importante a nivel mundial, debido a que nuestra sociedad e infraestructura depende en gran parte del petróleo. Actualmente, los hidrocarburos abastecen alrededor del 75% de la energía en Colombia [1]. La industria petrolera hace grandes esfuerzos por desarrollar nuevas tecnologías que permitan aumentar la producción de reservas de petróleo residual de una forma económica y además ambientalmente sostenible.

Lograr extraer la mayor cantidad de petróleo del yacimiento es uno de los retos de esta industria. En la actualidad, el factor de recuperación promedio a nivel mundial es de alrededor de 35%, es decir que aproximadamente dos tercios del petróleo queda dentro del yacimiento sin ser extraído [2], mientras que en Colombia el factor de recobro es de alrededor del 23% [3].

Las operaciones de recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés) son una serie de procesos que buscan extraer un mayor volumen de hidrocarburos en campos maduros donde la extracción convencional no es económicamente atractiva. Actualmente se realizan tres etapas de recuperación de petróleo. Durante la primera y la segunda, se llega a recuperar menos del 50% del petróleo inicial en el lugar (OIIP) y, a partir de este momento, se inicia la tercera etapa, en la que se emplean diferentes tecnologías de recuperación mejorada de petróleo, como la inyección de vapor o sustancias químicas, entre las que se encuentran polímeros, surfactantes o álcalis [4].

Las tecnologías en las que se usan productos químicos para la etapa de recuperación terciaria son ampliamente recomendadas debido a su eficiencia para la recuperación de petróleo. Las sustancias químicas empleadas logran reducir la saturación residual de petróleo a los valores más bajos, ya que alteran las propiedades del agua con la que son inyectadas y, a su vez, modifican la relación entre la salmuera y el hidrocarburo. Sin embargo, estas sustancias son de origen sintético y, por consiguiente, no son biodegradables.

Con base en lo anterior, en este artículo se presenta una revisión bibliográfica sobre la implementación de biosurfactantes en los procesos de recuperación mejorada de petróleo. Inicialmente, se describen las generalidades y propiedades características de los biosurfactantes, así como sus ventajas y aplicaciones, tanto en la industria del petróleo como en otros sectores en los que requiere reducir la tensión interfacial entre dos sustancias inmiscibles para formar una emulsión.

La información recopilada se obtuvo a través de artículos o trabajos de grado de carácter teórico y experimental. Para localizar y acceder a estas fuentes se realizó una búsqueda en diferentes bases de datos, como ScienceDirect, SpringerLink, VirtualPro, AccessEngineering, ResearchGate, OnePetro y Google Académico.

II. MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE PETRÓLEO

Los procesos de producción de hidrocarburos se dividen en tres etapas. La recuperación primaria ocurre cuando la presión natural del yacimiento puede hacer fluir el petróleo hasta la superficie gracias a la energía almacenada, mientras que la recuperación secundaria y la terciaria se inician cuando la presión natural del yacimiento decrece y, por esa razón, utiliza fluidos como agua, gas o sustancias químicas para ejercer una presión adicional sobre el petróleo y hacerlo subir [5].

Tanto la recuperación primaria como la secundaria dejan una gran cantidad de hidrocarburo en el sitio porque, a nivel microscópico, el crudo alcanza la saturación residual al quedar atrapado por las fuerzas capilares, y a nivel macroscópico, el fluido inyectado no penetra todas las zonas de yacimiento debido a la presencia de zonas de baja permeabilidad. Por lo general, la tasa de recuperación primaria es del 10 al 15%, mientras que la recuperación secundaria está entre el 25 y el 30% [6].

El objetivo principal de la recuperación mejorada de petróleo, también conocida como *recuperación terciaria*, es mejorar la eficiencia de barrido por medio de la reducción de las fuerzas capilares, mediante diferentes técnicas. Para disminuir la tensión interfacial, se utilizan surfactantes o soluciones alcalinas, y para mejorar la eficiencia de barrido, se utiliza el calentamiento, ya que con este se disminuye la viscosidad del petróleo. Los polímeros se utilizan para aumentar la viscosidad del agua, y la espuma, para taponar los caminos preferenciales con alta permeabilidad [6].

Por medio de la difusividad y las ecuaciones de la ley de Fick se describe el flujo de los fluidos presentes en el interior del yacimiento a lo largo del tiempo [7]. La difusión y la dispersión son mecanismos importantes para el transporte de productos químicos [7]. La transferencia de masa o difusión, como también se le conoce, relaciona el flujo de la sustancia que se está difundiendo y el gradiente de concentración responsable de dicha transferencia [8].

La difusión se puede describir como el transporte molecular de una sustancia de una región de alta concentración a una de baja concentración debido al movimiento molecular

aleatorio; la transferencia ocurre hasta alcanzar una concentración de equilibrio [9]. La dispersión, a diferencia de la difusión, se da por variaciones de la velocidad y, además, incorpora la mezcla que se genera durante el transporte de los fluidos a través de un medio poroso [7].

III. SURFACTANTES

Los surfactantes, también conocidos como *tensoactivos*, son compuestos orgánicos de carácter anfifílico, debido a que están conformados por un grupo apolar, constituido por una cadena de carbonos, y un grupo polar en la

misma molécula. La parte hidrófoba (cola) es soluble en hidrocarburos y la parte hidrofílica (cabeza) es soluble en agua [10]. En la industria del petróleo, el surfactante cobra una gran importancia por la capacidad que tiene para reducir la tensión interfacial (IFT, por sus siglas en inglés) entre el petróleo y el agua con la solución de surfactante a valores bajos (en el orden de 0,01 a 0,001 dyn/cm) [11]. Cuando el conglomerado de moléculas tensoactivas forma una micela (ver figura 1), esta rodea y cubre en su interior al hidrocarburo, produciendo así una microemulsión (mezcla de dos fases inmiscibles, agua-petróleo), la cual permite movilizar con mayor facilidad el petróleo residual hacia los pozos productores [12].

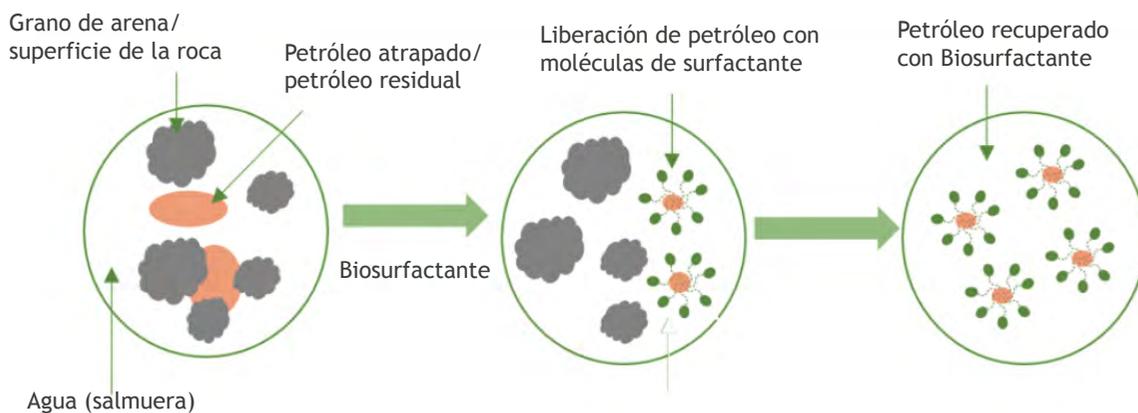


Figura 1. Acción microscópica de un surfactante
Fuente: Adaptada de [4, p. 26].

Los tensoactivos se pueden producir a partir de diferentes materias primas; los surfactantes sintéticos se obtienen a partir de derivados del petróleo, mientras que los biosurfactantes se producen a partir de extractos de plantas o de la transformación de residuos industriales por medio de microorganismos [13]. Actualmente, los surfactantes más utilizados para los procesos de recobro mejorado son los productos derivados del petróleo, como los sulfonatos propoxilados con cadenas levemente ramificadas de hidrocarburos [14].

En la industria del petróleo, los surfactantes frecuentemente utilizados para los procesos EOR son los sulfonatos de petróleo. Estos sulfonatos se han fabricado a partir de ciertos productos de refinería. Por ejemplo, el extracto de furfural, obtenido en las operaciones de lubricación con solventes, se considera una materia prima para la preparación de sulfonatos. Los sulfonatos de petróleo se preparan mediante la sulfonación de fracciones de gasóleo con trióxido de azufre [15] [16].

IV. INYECCIÓN DE SURFACTANTES

La inyección de surfactantes consiste, inicialmente, en mezclar el surfactante seleccionado con el agua del yacimiento para formar una solución que se introducirá en el pozo inyector. Una vez introducida en el yacimiento, la solución actuará como un tapón (*slug*) que reduce la tensión interfacial en la interfaz agua-petróleo, lo que produce una disminución de las fuerzas capilares y permite separar el petróleo de la roca porosa, para que se movilice con mayor facilidad hasta el pozo productor. La solución con el surfactante será empujada a través del yacimiento mediante una inyección convencional de polímero, para asegurar que la movilidad del tapón del surfactante esté bien controlada [11]. Finalmente, la solución con el polímero será empujada a través del yacimiento por medio de la inyección de agua convencional.

Las propiedades del yacimiento con las que se han obtenido resultados exitosos con las técnicas de recuperación por inyección de surfactantes y polímeros se presentan en la tabla 1. Por otro lado, en la tabla 2 se muestran las ventajas y desventajas de la inyección de surfactante en un yacimiento de petróleo.

Grados API	Viscosidad petróleo (cP)	Permeabilidad (mD)	Temperatura yacimiento (°F)	Salinidad (ppm)	Saturación petróleo (%)	Ref.
>25	<30	>20	<175	Baja	>30	[11]
14-35	< 35	>10	<158	<50000	>25	[17]
>25	<20	>20	<250	<50000	>25	[18]

Tabla 1. Criterios de selección para la inyección de surfactante
 Fuente: Elaboración propia.

Ventaja	Desventaja
Reduce la saturación de petróleo residual debido a que disminuye las fuerzas capilares.	Susceptible a la retención, precipitación y adsorción.
Disminuye la IFT entre el agua y el petróleo hasta posibles valores ultra bajos (0,01 a 0,001 dyn/cm), aumenta el número capilar y modifica la permeabilidad relativa.	Los surfactantes con elevado peso equivalente generan una gran disminución en la tensión interfacial, sin embargo, son rápidamente adsorbidos.
Mejora la eficiencia de barrido a nivel microscópico.	Poco eficaz cuando existe una baja saturación residual de petróleo.
Mejora la recuperación de petróleo al aumentar la humectabilidad de la roca al agua.	Sensible al contenido salino del agua presente en el yacimiento, lo que acelera la precipitación del surfactante.
Es posible mejorar el recobro de petróleo entre un 10 a 20% del OOIP.	

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la inyección de surfactantes
 Fuente: Basada en [7] y [11].

La inyección de surfactante y polímero (SP) mejora la recuperación de petróleo, gracias a su capacidad para reducir la movilidad del agua y reducir la saturación de petróleo residual al disminuir la IFT, aumentar el número capilar y modificar la permeabilidad relativa. En la inyección de SP, el polímero no cambia significativamente los valores de IFT y el surfactante no modifica significativamente la viscosidad de la solución [7].

V. BIOSURFACTANTES

Los biosurfactantes son tensoactivos de origen natural que pueden ser producidos por diferentes tipos de microorganismos o plantas [4], [19]. Se caracterizan por ser biodegradables y presentar baja toxicidad, por lo cual son candidatos para reemplazar a los surfactantes sintéticos [10].

El interés por implementar compuestos que sean biodegradables, no tóxicos, y además eficientes en todos los sectores de la industria, ha aumentado en los últimos años, y el caso de los surfactantes no es la excepción. Cada vez más, se busca producir surfactantes a partir de nuevas materias primas en las que se aprovechen

los desechos agroindustriales y las sustancias biodegradables. Pero sin importar la forma en la que se produzca, el principal objetivo es obtener un tensoactivo con baja concentración micelar crítica (CMC), alta capacidad de reducir la IFT, buena solubilidad, y buena actividad en un amplio rango de temperatura [20].

Tradicionalmente, se conoce de la existencia de materias primas vegetales con la capacidad de disminuir la tensión interfacial. Esto se debe a la presencia de saponinas en algunas plantas. Las saponinas son sustancias muy polares, de naturaleza anfífila, a las que se les atribuyen propiedades tensoactivas [21]. En la tabla 3 se presentan algunas especies vegetales con las que se pueden producir biosurfactantes. Asimismo, diversos tipos de microorganismos, como bacterias, levaduras y hongos, son capaces de producir biosurfactantes a partir de su metabolismo. Sin embargo, las bacterias son las mayores productoras [22]. La cantidad y estructura del biosurfactante producido por microorganismos depende del medio de cultivo, la fuente de carbono y las condiciones de crecimiento, como temperatura y pH. En la tabla 4 se mencionan algunos microorganismos que pueden producir biosurfactantes [23].

Material vegetal	Tipo de tensoactivo	Descripción	Ref.
<i>Sapindus saponaria</i>	Tensoactivo no iónico	Especie nativa de Colombia (Tolima, Huila, Cundinamarca, Valle del Cauca).	[24] [25]
<i>Zizyphus Spina Christi</i> (cedro)	Tensoactivo no iónico	Especie nativa del Oriente Medio y Asia Central (Jordania, Irán, Irak y Egipto).	[26]
<i>Trigonella Foenum Graceum</i> (TFG)	Tensoactivo no iónico	Especie nativa del suroeste de Asia y países mediterráneos (India, Irán, China, Egipto, Italia, Grecia).	[27]
<i>Morus nigra</i>	Tensoactivo catiónico	Especie nativa del suroeste de Asia.	[28]
<i>Sapindus mukorossi</i>	---	Especie nativa de India.	[29]

Tabla 3. Biosurfactantes derivados de diferentes materias primas vegetales
Fuente: Elaboración propia.

Biotensoactivo	Microorganismo productor	Tipo de tensoactivo	CMC (mg/L)	IFT (mN/m)
Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	Lipopéptido de bajo peso molecular	23-160	1
Ramnolípido	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Glicolípido de bajo peso molecular	0,1-10	1
Soforolípido	<i>Torulopsis apicola</i>	Glicolípido de bajo peso molecular	--	0,9
Liposán	<i>Candida lipolytica</i>	Tensoactivo polimérico de alto peso molecular	--	--
Lichenisina	<i>Bacillus licheniformis</i>	Lipopéptido de bajo peso molecular	12-20	0,1-0,3

Tabla 4. Fuentes microbianas y propiedades de algunos biosurfactantes
Fuente: Adaptada de [23, p. 49].

La biodegradabilidad y la toxicidad de los surfactantes son factores tan importantes como el desempeño del producto, el precio de la materia prima y la manufactura [10]. Por esta razón, en los últimos años ha sido necesario buscar nuevas alternativas económicamente viables con un menor impacto ambiental.

Los biosurfactantes ofrecen un amplio rango de nuevas estructuras y propiedades fisicoquímicas. Presentan menor toxicidad, mayor biodegradabilidad, buena actividad en condiciones extremas de temperatura, salinidad y pH, además pueden producirse a partir de materias primas renovables. En la tabla 5 se muestran las ventajas de los biosurfactantes.

Ventaja	Descripción	Ref.
Biodegradabilidad	Pueden ser fácilmente degradados por los microorganismos.	[30]
Baja toxicidad	Son menos tóxicos que los surfactantes químicos.	[22]
Factores ambientales	Son estables a condiciones extremas de temperatura, salinidad y pH.	[31]
Especificidad	Tienen una amplia variedad de estructuras químicas y grupos funcionales que le otorgan mecanismos de acción específicos.	[32] [33]
Producción	“El costo de producción se desacopla del precio del petróleo, ya que pueden ser producidos a partir de sustratos de residuos renovables”.	[34]
Baja CMC	Concentración micelar crítica más baja (CMC), lo que significa que son efectivos a bajas concentraciones.	[4]
Aplicación en EOR	Capaces de reducir la tensión interfacial un 40 a 50% en el sistema agua-petróleo, adicionalmente “alteran la humectabilidad del medio poroso y generan factores de recobro incremental de alrededor del 20%”.	[35]
Otras aplicaciones	Son biocompatibles, lo cual permite su aplicación en industrias cosméticas, farmacéuticas y alimenticias como aditivos.	[36]

Tabla 5. Ventajas de los biosurfactantes
Fuente: Elaboración propia.

VI. APLICACIONES DE LOS BIOSURFACTANTES

Actualmente, los biosurfactantes son potenciales sustitutos de los surfactantes sintéticos en diferentes procesos industriales [37]. En la tabla 6 se muestran algunas de sus aplicaciones.

Industria	Aplicación	Ref.
Industria del petróleo	Recuperación mejorada de petróleo y limpieza de tanques.	[4] [22]
Medio ambiente	Biorremediación y tratamiento de aguas residuales para eliminar compuestos peligrosos.	[4]
Agricultura	Control biológico. Debido a su actividad insecticida y herbicida se utilizan en la elaboración de fertilizantes y pesticidas.	[22] [45]
Industria de alimentos	Estabilización de materias primas.	[22]
Industria cosmética y farmacéutica	Producción de repelentes, insecticidas, champú anticaspa, soluciones para lentes de contacto, desodorantes, colorantes, y antisépticos.	[22]
Otras	Polimerización y emulsión de pinturas, formulación en cementos, textiles y tratamiento de metales.	[45]

Tabla 6. Aplicaciones de los biosurfactantes
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en los artículos científicos [38], [39], [34], [25], [35], [40], [41], [42], [43], [44] se evalúa la implementación de biosurfactantes en los procesos de EOR a escala de laboratorio. En dichas investigaciones se tiene en cuenta el porcentaje de recuperación de petróleo que se logra tras la inyección de estos compuestos; además, en algunos de ellas se comparan los resultados alcanzados con los de un surfactante sintético. En la tabla 7 se muestra los resultados obtenidos con algunos biosurfactantes producidos a partir de extractos de plantas, y en la tabla 8 se recopilan los resultados relacionados con la implementación de biosurfactantes obtenidos a partir de microorganismos en los procesos de EOR.

Biosurfactante	Recobro	Características	Ref.
Biosurfactante no iónico producido a partir de las hojas del árbol <i>Zizyphus Spina-Christ</i>	Tras realizar la inyección de una solución de biosurfactante al 8 wt% se observa que la recuperación de petróleo es de aproximadamente 16% OOIP para núcleos humedecidos con petróleo y de 35 a 12,5% OOIP para núcleos mojados con agua.	Este biosurfactante logra disminuir la tensión interfacial de 48 a 9 dyn/cm, adicionalmente tiene un alto contenido en saponinas, las cuales son un tensoactivo no iónico natural que en comparación a los tensoactivos sintéticos representan un menor costo.	[25]

Biosurfactante	Recobro	Características	Ref.
Biosurfactante obtenido a partir del árbol <i>Sapindus saponaria</i>	Los resultados experimentales muestran que este biosurfactante pueden generar un factor de recobro incremental de alrededor del 20%.	El biosurfactante seleccionado tiene una CMC de 400 ppm y una adsorción total de 0,22 mg/g a 3000 ppm. Adicionalmente logra disminuir la tensión interfacial en el sistema agua-petróleo un 40 a 50%.	[35]
Surfactante natural extraído de hojas del árbol <i>Zizyphus Spina-Christi</i> (cedro)	Las pruebas a escala de laboratorio muestran que se obtiene una recuperación de petróleo incremental de 17 y 13% para los surfactantes sintéticos Bromuro de cetiltrimetil amonio (CTAB) y Alfa olefina sulfato de sodio (AOS) respectivamente, mientras que para el biosurfactante se obtiene una recuperación del 15%.	Los resultados experimentales arrojaron que este biosurfactante puede alterar la humectabilidad de las superficies de carbonato y arenisca de igual forma que los tensoactivos sintéticos, debido a que puede reducir la tensión interfacial en el sistema petróleo-agua a 7,1 mN/m.	[41]

Tabla 7. Aplicación de biosurfactantes obtenidos a partir de materias primas vegetales en los procesos de EOR
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados expuestos en las tablas 7 y 8, de estudios a escala de laboratorio, permiten observar que los biosurfactantes tienen un gran potencial de aplicación en la recuperación mejorada de petróleo, dado que pueden llegar a cumplir las mismas funciones que los surfactantes sintéticos y obtener un recobro de petróleo incremental de alrededor del 20%.

La ventaja de los biosurfactantes es que logran reducir la tensión interfacial utilizando menor concentración de tensoactivo y, por ende, menor cantidad del agente químico, debido a que los biosurfactantes se caracterizan por tener una concentración micelar crítica baja. Por otra parte, los biosurfactantes, al ser de carácter no iónico, presentan menor adsorción en la roca del yacimiento, por lo tanto, cabe esperar una menor pérdida del agente químico, lo cual resulta favorable, ya que una vez el

surfactante se adsorbe en la roca, se reduce la concentración del tensoactivo y, en consecuencia, se hace menos eficiente la reducción de la IFT [7].

A pesar de las ventajas de los biosurfactantes, su uso es limitado aún, debido al alto costo de producción. No obstante, en el caso de los surfactantes producidos a partir de microorganismos mediante procesos de fermentación, es recomendable el uso de materias primas más baratas y la optimización en los componentes del medio de cultivo para hacer más viable la producción de biosurfactantes. [41] [37]. De otra parte, se pueden usar desechos de la industria láctea; residuos de la industria agrícola y aceites vegetales; sustancias de almidón, como residuos de productos de papa, y glicerol, melaza, queso o residuo de la producción de biodiesel [38].

Biosurfactante	Recobro	Características	Ref.
Cepas de <i>Bacillus subtilis</i> aisladas de suelos contaminados con petróleo.	Las pruebas a escala de laboratorio muestran que este biosurfactante logra recuperar aproximadamente el 23% del petróleo residual.	Logra reducir la tensión interfacial de 46,6 a 3,28 mN/m con una concentración micelar crítica (CMC) de 0,4 g/L.	[39]
Surfactina producido a partir de cepas de <i>Bacillus subtilis</i> con almidón de papa como medio de cultivo.	Las pruebas de recuperación de petróleo realizadas a escala de laboratorio muestran que se produce más petróleo bajo la inyección de surfactina que con el surfactante sintético Lauril sulfato de sodio (SLS).	La surfactina tiene una CMC mucho más baja que la de los surfactantes sintéticos (0,23 g/L), por esa razón tiene un mayor efecto sobre la tensión interfacial.	[40]
Biosurfactante (S-021206) producido a partir de un medio de cultivo rico en almidón.	La inyección de este biosurfactante junto con polímero a escala de laboratorio muestra una recuperación del 17% OOIP.	Este biosurfactante tiene una tensión interfacial muy baja (10^{-2} nM/m) con una concentración de 2000 ppm y una baja adsorción (0,65 mg/g) en comparación con el surfactante sintético.	[34]

Tabla 8. Aplicación de biosurfactantes obtenidos a partir de microorganismos en los procesos EOR
 Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en el caso de los biosurfactantes obtenidos a partir de material vegetal, es recomendable implementar procesos que requieren una menor cantidad de solvente para la extracción de saponinas. Las técnicas de extracción verde, en comparación con las técnicas de extracción por reflujo, requieren menor cantidad de solvente, puesto que son asistidas por la manipulación de presión y temperatura. Entre estas técnicas se encuentran la extracción acelerada por solvente (ASE, por sus siglas en inglés) y la extracción asistida por ultrasonido (EAU) [21].

17 empresas han desarrollado con éxito la producción de biosurfactantes a escala industrial para diversas aplicaciones, relevantes en la industria del petróleo, la biorremediación, la farmacéutica, la cosmética, y las industrias de alimentos, entre otras. En la tabla 9 se mencionan cinco de estas empresas [4].

Empresa	Producto	Aplicación	Ref.
Lipofabrik (Francia)	Lipopeptides (Surfactin)	Industria de alimentos, farmacéutica, petrolera.	[46]
AGAE Technologies (USA)	Rhamnolipids	Cosméticos, limpieza de tanques, productos de limpieza para el hogar y cuidado personal, recuperación de petróleo mejorada, remediación ambiental.	[47]
Allied Carbon Solutions Co., Ltd. (Japón)	Bio Surfactants ACS-Sophor® (Sophorolipids)	Industria farmacéutica, alimentaria, cosmética, pesticidas, industria petrolera y de biodegradación.	[48]
Jeneil Biotech (USA)	Biosurfactant Products	Productos de cuidado personal, lubricantes, biorremediación, tratamiento de aguas residuales, textiles, impresión, curtido, agricultura y minería.	[49]
Rhamnolipids Companies, Inc. (USA)	Rhamnolipids	Eliminan amenazas patógenas, debido a que pueden romper las paredes celulares de los microbios patógenos sin dañar a los humanos.	[50]

Tabla 9. Empresas productoras de biosurfactantes
 Fuente: Adaptada de [4, p. 25].

VII. CONCLUSIONES

Los biosurfactantes no solo tienen un gran potencial de aplicación en los procesos de Recuperación Mejorada de petróleo (EOR), sino que también son empleados en otros sectores de la industria, debido a que pueden llegar a cumplir las mismas funciones que los surfactantes sintéticos.

Pueden producirse a partir de diferentes materias primas vegetales, en presencia de saponinas, o pueden obtenerse mediante procesos de fermentación con diferentes tipos de microorganismos, especialmente bacterias.

Los biosurfactantes tienen una alta capacidad de reducir la tensión interfacial (IFT) a menores concentraciones de tensoactivo. Por otro lado, presentan menor toxicidad, mayor biodegradabilidad, buena actividad en condiciones extremas de temperatura, salinidad y pH. Además pueden producirse a partir de materias primas renovables.

Para disminuir el costo de la producción de biosurfactantes a partir de microorganismos es recomendable utilizar materias primas más económicas para el medio de cultivo, como residuos de la industria agrícola, residuos de productos de papa, melaza, queso o residuo de la producción de biodiesel. También se puede optimizar la producción de biosurfactantes a partir de materias primas vegetales con la extracción de saponinas mediante la aplicación de técnicas como la extracción acelerada por solvente (ASE) y la extracción asistida por ultrasonido (EAU), en las cuales se requiere menor cantidad de solvente.

La inyección de biosurfactante a escala de laboratorio presenta un recobro de petróleo incremental de alrededor del 20%, similar al que se obtiene con los surfactantes sintéticos. Por tal razón, una vez que se optimicen los procesos de producción de los biosurfactantes es recomendable iniciar pruebas piloto a nivel de campo.

LISTA DE ABREVIATURAS

API: *American Petroleum Institute*
EOR: recuperación mejorada de petróleo
OIP: petróleo inicial en el lugar
IFT: Tensión interfacial
SP: inyección de surfactante y polímero
CMC: concentración micelar crítica

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Minas y Energía, *Plan Energético Nacional. Colombia: Ideario Energético 2050*, Bogotá, Colombia, 2015.
- [2] A. Labastie, "En Route: Increasing Recovery Factors: A Necessity", *J. Pet. Technol.*, vol. 63, n.º 8, pp. 12-13, ago. 2011, doi: 10.2118/0811-0012-JPT."Increasing Recovery Factors: A Necessity", *SPE*, pp.12-13, 2011.
- [3] Agencia Nacional de Hidrocarburos, "Presidente de la ANH instaló II Foro Mundial de Recobro Mejorado organizado por Ecopetrol" Gobierno de Colombia, 28 de octubre, 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.anh.gov.co/Sala-de-Prensa/Lists/Anuncios/Noticias.aspx?ID=191>.
- [4] S. J. Geetha, I. M. Ibrahim Banath y J. S. J. Joshianket, "Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR)", *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 14, pp. 23-32, abril, 2018, doi: 10.1016/j.bcab.2018.01.010
- [5] SNF Floerger, "Geología del petróleo: sistemas petrolíferos", *Oil-EOR Handbook ESP*. Edition 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.snf.us/wp-content/uploads/2017/03/EOR-101-Geolog%C3%ADa-del-petr%C3%B3leo-Sistemas-petrol%C3%ADferos.pdf>
- [6] J. L. Salager, *Recuperación mejorada del petróleo* (Cuaderno FIRP S357-C), Facultad de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2005. [En línea]. Disponible: <http://oilproduction.net/files/S357C.pdf>
- [7] J. J. Sheng, *Modern chemical enhanced oil recovery*, Burlington, MA, USA: Elsevier, 2011.
- [8] J. Welty, C. Wicks y R. Wilson, *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*, México: Limusa, 1999.
- [9] H. Juárez, "Modelos y problemas de difusión", Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, 2015. [En línea]. Disponible: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/hect/Taller_de_Modelado_I/notasTM1.pdf

- [10] M. Ortiz Pacheco, *Surfactantes producidos a partir de derivados de la biomasa* (Cuaderno FIRP SC307R), Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2016. [En línea]. Disponible: <https://es.firp-ula.org/sc307rsurfactantes-producidos-a-partir-de-derivados-de-la-biomasa/>
- [11] M. Paris de Ferrer, *Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos*, Maracaibo, Venezuela: Astro Data., 2001.
- [12] A. Gil Muíño, “Análisis y caracterización de agentes tensioactivos, polímeros y química fina en un laboratorio de control”, Trabajo de fin de máster. Universidad de La Coruña, España, 2014.
- [13] J. Salager y A. Fernandez, *Surfactantes I. Generalidades II. Materias primas* (Cuaderno FIRP S301PP). Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2004. [En línea]. Disponible: <https://es.firp-ula.org/s301pp-surfactantes-generalidades-y-materias-primas/>
- [14] R. AL-Mjeni et al. “¿Llegó el momento para la tecnología EOR?”. *Oilfield Rev.*, vol. 22, n.º 4 pp.16-35, 2011.
- [15] E. C. Donaldson, *Enhanced oil recovery, II Processes and Operations*, Amsterdam: The Netherlands: Elsevier, 1989.
- [16] J. L. Salager, *Surfactantes: tipos y usos* (Cuaderno FIRP S300A). Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2002. [En línea]. Disponible: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S300A.pdf>
- [17] Ecopetrol, “Assessment of a surfactant- polymer formulation applied to the conditions of one Colombian field”, *Cienc. Tecnol. Futuro*, vol. 9, n.º 1, pp. 47-63, 2018. doi: <https://doi.org/10.29047/01225383.152>
- [18] E. Donaldson y G. Chilingarian, *Enhanced Oil Recovery, I Fundamentals and Analyses*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1985.
- [19] M. Smith, S. Gandolfi, P. Coshall y P. Rahman, “Biosurfactants: a COVID-19 perspective”. *Front. Microbiol.*, vol. 11, pp. 1-14, junio, 2020. doi: 10.3389/fmicb.2020.01341
- [20] C. Burgos, “Biotensoactivos producidos por *Sphingobacterium detergens* sp. nov.: Producción, caracterización y propiedades”, trabajo de grado. Universidad de Barcelona, España, 2012.
- [21] C. Yoong, H. Karim y R. Sulaiman, “Extraction and quantification of saponins: A Review”. *Food Res. Int.*, vol. 59, pp. 16-40, mayo, 2014. doi: 10.1016/j.foodres.2014.01.057
- [22] D. Jiménez, S. Medina y J. Gracida, “Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol.26 no.1, pp 65-84, 2010, feb. 2010.
- [23] J. Dasai y I. Banat, “Microbial Production of Surfactants and Their Commercial Potential”, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, vol. 61, n.º 1, pp. 47-64, 1997.
- [24] J. Sanchez y L. Silva, “Estudio silvicultural de la especie *Sapindus saponaria* L. (Jaboncillo) como base para su aprovechamiento silvoindustrial”, *Rev. Colomb. For.*, vol. 11, pp. 71-81, ene.-dic. 2008.
- [25] M. Pordel Shahri, S. Shadizadeh y M. Jamialahmadi, “Applicability test of new surfactant produced from *Zizyphus spina-christi* leaves for enhanced oil recovery in carbonate reservoirs”, *J. Jpn. Pet. Inst.*, vol. 55, n.º 1, pp. 27-32, 2012. doi: 10.1627/jpi.55.27
- [26] M. Amirpour, S. Shadizadeh, H. Esfandyari y S. Ahmadi, “Experimental investigation of wettability alteration on residual oil saturation using nonionic surfactants: Capillary pressure measurement”. *Elsevier*, pp. 289-299, 2015.
- [27] A. Barati, A. Najafi, A. Daryasafar, P. Nadali y H. Moslehi, “Adsorption of a new nonionic surfactant on carbonate minerals in enhanced oil recovery: experimental and modeling study”. *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 105, pp. 1-29, ene. 2016. doi: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.cherd.2015.10.047>
- [28] A. Moslemizadeh, A. Farajzadeh, J. Milad, M. Naseri, S. Gholamreza y E. Kargar, “Novel bio-based surfactant for chemical enhanced oil recovery in montmorillonite rich reservoirs: adsorption behavior, interaction impact, and oil recovery studies”, *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 109, pp. 18-31, may. 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116067>
- [29] S. Banerjee, R. Kumar y T. Naiya, “Use of a novel natural surfactant for improving flowability of indian heavy crude oil” *Pet. Sci. Technol.*, vol. 33, n.º 7, pp. 819-826, may. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2015.1014961>

- [30] J. Perez, "Producción de biosurfactantes por bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno crecidas en hidrocarburos", *Cienc. Quím.*, vol. 41, pp. 1-9, 2010.
- [31] S. Adhijit, O. Keka, M. Ajay y S. Ashis, "Extraction and characterization of an eco-friendly surfactant for its use in enhanced oil recovery", *J. Pet. Eng. Technol.*, vol. 3, n.º 1, pp. 20-29, 2013.
- [32] L. Raiger y N. Lopez, "Los biosurfactantes y la industria petrolera", *Quím. Viva*, vol. 8, n.º 3, pp. 146-161, dic. 2009.
- [33] X. Martínez, "Producción de biosurfactantes por microorganismos aislados de sitios extremos y contaminación con hidrocarburos", tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional, México, 2011.
- [34] P. Luque, A. Alsofi, J. Wang y M. Han, "Toward an alternative bio-based sp flooding technology: I. biosurfactant evaluation", presentado en *SPE Asia Pacific Enhanced Oil Recovery Conference*, Kuala Lumpur, Malasia, agosto, 2015. doi: <https://doi.org/10.2118/174621-MS>
- [35] Y. Rodriguez Arturo, "Obtención y evaluación de un ecotensoactivo como alternativa para procesos de recobro mejorado de petróleo", tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2019.
- [36] N. De la rosa, E. Sanchez y L. Ortiz, "Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas". *Rev. Latinoam. Biotecnol. Ambient. Algal.*, vol. 5, n.º 1, pp. 47-67, 2014. doi: [10.7603/s40682-014-0004-8](https://doi.org/10.7603/s40682-014-0004-8)
- [37] R. Reis, G. Pacheco, A. Pereira y D. Freire, "Biosurfactants: production and applications", en *Biodegradation-lie of Science*, pp. 31-61, Rijeka, Croacia: InTech, 2013. doi: [10.5772/56144](https://doi.org/10.5772/56144)
- [38] L. Mondragón, "Aislamiento y caracterización de cepas bacterianas aerobias autóctonas de yacimientos petroleros productoras de biosurfactantes para su aplicación en técnicas de MEOR", tesis de maestría, Instituto Politecnico Nacional, México, 2011.
- [39] H. Al-sulaimani et al., "Optimization and partial characterization of biosurfactants produced by bacillus species and their potencial for ex-situ enhanced oil recovery", *Soc. Pet. Eng. J.*, vol. 16, n.º 3, pp. 672-689, sept. 2012.
- [40] S. J. Johnson; M. Salehi, K. Friedemann Eisert y J.-T. Liang. G. A. Bala y S. L. Fox. "Using biosurfactants produced from agriculture process waste streams to improve oil recovery in fractured carbonate reservoirs". Presentado en el *International Symposium on Oilfield Chemistry*, Houston, Texas, U.S.A., febrero de 2007. doi: [10.2118/106078-](https://doi.org/10.2118/106078-)
- [41] S. J. Daghljan Sofla, M. Sharifi, y A. Hemmati Sarapardeh, "Toward mechanistic understanding of natural surfactant flooding in enhanced oil recovery processes: The role of salinity, surfactant concentration and rock type", *J. Mol. Liq.*, vol. 222, pp. 636-369, oct. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2016.07.086>.
- [42] M. Martinez, "Obtención de un biosurfactante para el recobro mejorado de petróleo", tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2014.
- [43] M. J. McInerney, S. K. Maudgalya, R. Knapp y M. Folmsbee, "Development of biosurfactant-mediated oil recovery in model porous systems and computer simulations of biosurfactant-mediated oil recovery", Departamento de Ingeniería del Petróleo y Departamento de Botánica y Microbiología, Universidad de Oklahoma, 2004.
- [44] A. B. Chhetri, K. C. Watts, M. S. Rahman y M. R. Islam, "Soapnut extract as a natural surfactant for enhanced oil recovery", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, n.º 20, pp. 1893-1903, ago. 2009. doi: [10.1080/15567030802462622](https://doi.org/10.1080/15567030802462622)
- [45] S. Banerjee, R. Kumar, A. Mandal y T. Naiya, "Use of a novel natural surfactant for improving flowability of indian heavy crude oil", *Pet. Sci. Technol.*, pp. 819-826, may. 2015. doi: [10.1080/10916466.2015.1014961](https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1014961).
- [46] Lipofabrik, "Lipofabrik". [En línea]. Disponible: <http://www.lipofabrik.com/>.
- [47] AGAE Technologies, "Ramnolípidos de alta pureza para sus necesidades de aplicación". [En línea]. Disponible: <http://www.agaetech.com/>.
- [48] Allied Carbon Solutions Co., Ltd., "Potencial application of biosurfactant". [En línea]. Disponible: <http://www.allied-c-s.co.jp/english.php>.
- [49] Jeneil Biotech, "Biosurfactantes". [En línea]. Disponible: <http://www.jeneilbiotech.com/>.
- [50] Rhamnolipid, "Ramnolípidos, eliminación de amenazas patógenas", [En línea]. Disponible: <http://rhamnolipid.com/>.