

## Evaluación y selección del proceso microbiano como método de recuperación mejorada mediante la herramienta HC-RMAM

*Evaluation and selection of the microbial process as an improved recovery method using the HC-RMAM tool*

Eduardo Vidal Castro-Jiménez<sup>1\*</sup>, Angélica Gabriela Vital-Ocampo<sup>1</sup>  
y Daniel de Jesús Montoya-Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Carmen. México

\*vidalcastro1494@gmail.com

### Resumen

En el presente trabajo se desarrolló una Herramienta Computacional llamada Recuperación Mejorada de Aceite por Microorganismos (HC-RMAM). Con ella, se evalúa técnica y económicamente la aplicabilidad de los procesos microbianos *in situ* y *ex situ* a campos petroleros como método de recuperación mejorada. En ésta, se propusieron y concentraron las guías de selección e indicadores económicos más relevantes con los cuales se evaluó su factibilidad. La HC-RMAM se validó con 16 campos nacionales e internacionales, obteniéndose resultados satisfactorios en un 100%. Posteriormente, se analizaron técnicamente 33 campos, los cuales resultaron ser viables en un 100% para el subproceso *ex situ*. Para el subproceso *in situ*, se analizaron 27 campos los cuales resultaron no ser viables debido a que no se asegura la supervivencia del microorganismo. Respecto al análisis económico, 2 de los 33 campos, presentaron un Valor Presente Neto (VPN) positivo oscilando entre 98 y 223 millones de dólares.

### Palabras clave

Campos petroleros, evaluación técnico y económico, herramienta computacional, recuperación mejorada de aceite por microorganismos.

### Abstract

In this paper, a Computational Tool called Improved Oil Recovery by Microorganisms (HC-RMAM) was developed. With this, the applicability of on-site and off-site microbial processes to oil fields is technically and economically assessed as an improved recovery method. In this study, the most relevant selection guides and economic indicators were proposed and concentrated, with which their feasibility was evaluated. The HC-RMAM was validated with 16 national

and international fields, obtaining satisfactory results in 100%. Subsequently, 33 fields were technically analysed which were 100 % viable for the ex situ subprocess. For the in situ subprocess, 27 fields were analyzed which were not viable because the survival of the microorganism is not assured. Regarding the economic analysis, 2 of the 33 fields presented a positive Net Present Value (NPV) ranging between 223 and 98 million dollars.

## Keywords

Computational tool, microbial enhanced oil recovery, oil fields, technical and economic evaluation.

## Introducción

Actualmente, en México existe el interés en reactivar los campos maduros que existen debido a la declinación de la producción de estos y a la disminución del descubrimiento de nuevos campos con volúmenes de hidrocarburos significantes. Por lo cual y ante la necesidad de cubrir la demanda energética del país, es de suma importancia innovar e implementar nuevas tecnologías que permitan la reactivación de los campos ya existentes.

Entre las distintas tecnologías a implementar en un yacimiento, para recuperar el aceite remanente, se encuentran los métodos de recuperación mejorada (EOR, por sus siglas en inglés), los cuales se clasifican en procesos de inyección térmica, química, gas y microbiano (CNH, 2012).

Particularmente el proceso de EOR microbiano (MEOR, por sus siglas en inglés), el cual consiste en utilizar microorganismos y sus bioproductos para mejorar la recuperación de petróleo, es una de las tecnologías que se puede implementar potencialmente con un costo operativo excepcionalmente bajo, posicionándolo como uno de los mejores métodos de EOR (Al-Sulaimani *et al.*, 2011). A pesar de ello, autores como Al-Sulaimani *et al.* (2011), y Aladasani y Bai (2010), entre otros, mencionan que los MEOR no han recibido popularidad debido a, la ausencia de resultados de campo estandarizados y del análisis posterior al ensayo, lo difícil que resulta extrapolar los resultados de una prueba de campo microbiana a otros yacimientos, la falta de metodología de investigación estructurada, y la falta de comprensión de los mecanismos de recuperación de petróleo, entre otros, ubicándolo entonces, como uno de los EOR de poco interés para la industria del petróleo. Sin embargo, trabajos por Cerón *et al.* (2016), y Hitzman *et al.* (2003), han reportado que al implementar MEOR se ha logrado obtener un factor de recuperación promedio del 20%.

Por lo anterior, y en espera de contribuir en proyectos relacionados a la industria petrolera, así como en el aprendizaje de la comunidad estudiantil, se desarrolló la Herramienta HC-RMAM, con la cual es posible reducir los tiempos de selección de métodos EOR, generar una evaluación rápida de la rentabilidad de posibles proyectos de EOR y analizar un sin número de posibles escenarios sobre la implementación de procesos microbianos a campos nacionales o internacionales.

## Metodología de investigación

Para la evaluación y selección de los MEOR se dividió el estudio en dos análisis, es decir, un análisis técnico y otro el económico. Para el desarrollo del análisis técnico, de la herramienta HC-RMAM, fue necesario realizar cinco actividades particulares, mismas que se describen a continuación.

1. Propuesta de los criterios de selección del sistema roca-fluido de los subprocesos microbianos: los criterios, sirvieron como primer paso para realizar la comparación de las propiedades del sistema roca-fluido del campo de estudio respecto a los establecidos en la herramienta. Cabe señalar que los criterios propuestos en HC-RMAM son intervalos de valores en los cuales se encuentran las propiedades más relevantes del sistema roca-fluido de un MEOR. Para la propuesta de éstos, se tomaron de referencia los trabajos presentados por Aladasani y Bai (2010), Donaldson *et al.* (1989), y Cerón *et al.* (2016), entre otros.

2. Predicción de los porcentajes promedio de implementación del MEOR: como una segunda actividad, se determinó que el 80% es el porcentaje promedio mínimo que define de manera preliminar la viabilidad del MEOR. Para ello, se realizó el análisis paramétrico de cada una de las variables que definen los criterios de selección de cada uno de los subprocesos y se estableció que solo se tomará en cuenta el subproceso si cumple con el porcentaje señalado. En caso de incumplir, las propiedades resultarían críticas para el éxito técnico del proyecto.

3. Cálculo del tiempo del proyecto y del aceite incremental: para esta actividad, se propuso un factor de recuperación promedio del 20%. Dicha propuesta se basó de la revisión de los trabajos presentados por Cerón *et al.* (2016), y Hitzman *et al.* (2003), entre otros.

4. Selección del bioproducto: para la selección del bioproducto, se partió del mecanismo de producción a implementar en el campo, seguido de los bioproductos que generan dicho mecanismo MEOR, y, finalmente, se identificó a los principales microorganismos que generan dicho metabolito. Estos pasos a modo de *check list* se implementaron en HC-RMAM.

5. Producción de aceite: para esto, se partió del cálculo del índice de productividad antes y después de la estimulación microbiana con la cual es posible predecir los barriles producidos a partir de cada libra de presión que se pierda en el campo (Beggs, 1991).

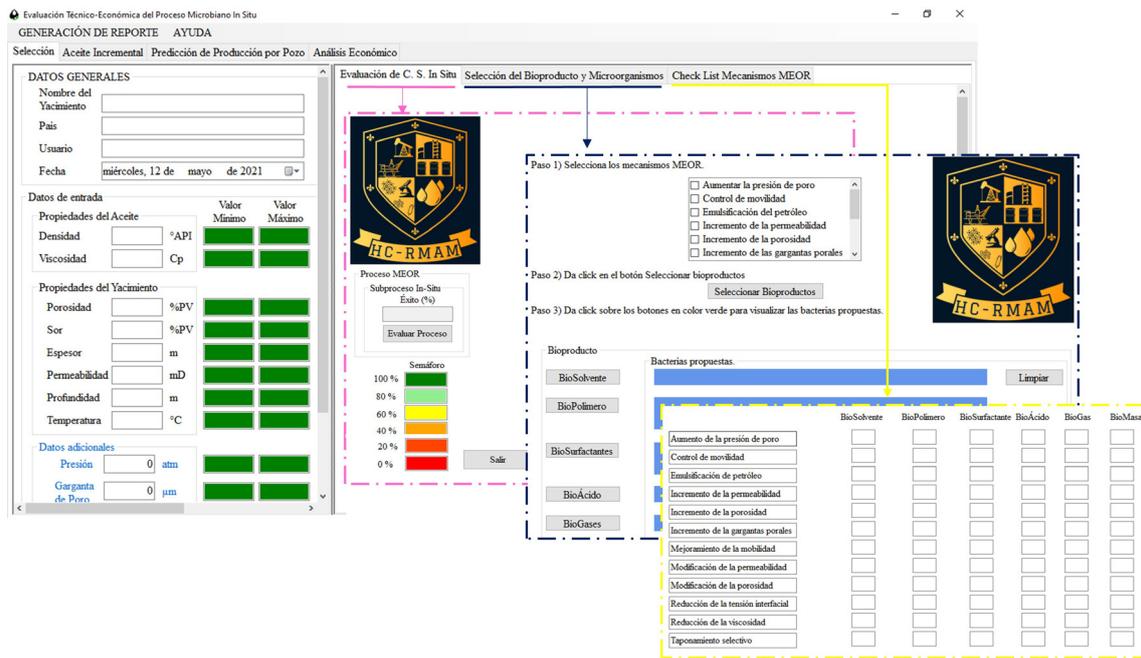
Para el análisis económico, fue necesario seleccionar y definir en HC-RMAM, los principales indicadores económicos, cálculo de la producción anual, flujo de efectivo y Valor Presente Neto (VPN), entre otros, que permitieron definir la viabilidad o rentabilidad del proyecto.

### Desarrollo de la herramienta computacional

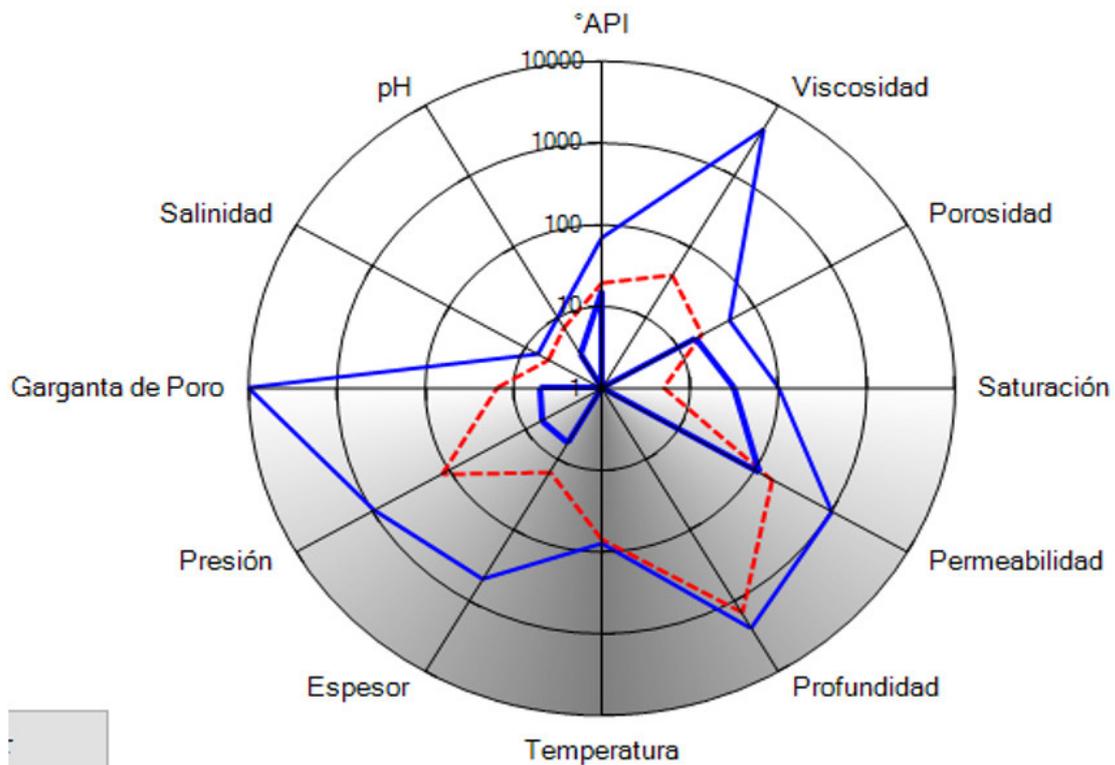
Para aplicar la metodología de forma automática se desarrolló la herramienta HC-RMAM bajo el lenguaje del compilador C#. A modo de ejemplo, en la figura 1 se muestra la ventana principal de HC-RMAM, la cual se conforma de 7 secciones principales llamadas; selección, evaluación, selección del bioproducto y microorganismos, aceite incremental, predicción de producción por campo, análisis económico y ayuda.

Cabe mencionar que, de no cumplir algún parámetro con el rango de aplicabilidad establecido, la herramienta computacional cuenta con un semáforo de colores que le indican al usuario en automático el estatus de cada propiedad, es decir le indican si el parámetro introducido se encuentra dentro del rango propuesto. Además, visualmente el usuario podrá analizar los datos con ayuda de un gráfico radar a como se muestra en la figura 2, cuyas líneas azules muestran los rangos de aplicabilidad propuestos y la línea roja punteada muestra los datos introducidos por el usuario, lo cual ayuda a la toma de decisiones.

**Figura 1.**  
Ventana principal de HC-RMAM



**Figura 2.**  
Secciones principales que conforman la aplicación HC-RMAM



## Resultados y discusión

La primera propuesta para el desarrollo del software consistió en definir, delimitar y generar las tablas de criterios de selección a partir de diferentes trabajos publicados por autores como Cerón

et al. (2016), Mauren y Dietrich (1999), Steven y Lockhart (2000), Osunde y Balogun (2013), por mencionar algunos. En total se generaron 9 listas para el proceso microbiano.

Para el subproceso *in situ* se generó la lista de los principales criterios a partir de 7 autores (Tabla 1).

**Tabla 1.**

Criterios de selección propuestos y utilizados en HC-RMAM para el subproceso MEOR *in situ*

	Método	Subproceso <i>in situ</i>
Propiedades aceite	Densidad (API)	>15
	Viscosidad (cP)	<4550
Propiedades del Yacimiento	Saturación (%)	>30
	Espesor (m)	>3
	Porosidad (%)	>17
	Permeabilidad (mD)	>100
	Profundidad (m)	<2683
	Temperatura (°C)	<80
	Presión (atm)	<900
	Salinidad (% NaCl)	<7
	Gargantas porales (µm)	>0.5
	pH	3-10

Cabe señalar que la importancia del análisis paramétrico está basado en vigilar el cumplimiento de cada una de las variables, puesto que existen variables críticas que definen el éxito del proceso MEOR, aun si el porcentaje dado por la herramienta es mayor al 80% de aplicabilidad. Los anterior es debido a que la HC-RMAM realiza un promedio del porcentaje de aplicabilidad de cada variable, como se mostró en la ecuación (Figura 3), cuyo nivel de importancia dependerá del microorganismo a utilizar o el bioproducto a implementar en el yacimiento, además dependerá del criterio del usuario.

**Figura 3.**

Ecuación porcentaje de aplicabilidad del proceso MEOR

$$PA = \frac{(\%^\circ API + \% \mu + \% Sor + \% h + \% \phi + \% k + \dots + \% p + \% T + \% P + \% sal + \% GP + \% pH)}{12} \quad (1)$$

Para el subproceso MEOR *ex situ* se generaron 8 listas para los diferentes bioproductos propuestos, los cuales son biopolímero, biosurfactante, e inyección de gases miscibles e inmiscibles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gas hidrocarburo y nitrógeno (N<sub>2</sub>).

La importancia de proponer una tabla actualizada de criterios de selección es debido a: 1) dado que los valores de los parámetros de las propiedades de los yacimientos y sus fluidos varían de acuerdo al autor, la comparación de estos valores respecto a guías de selección presentes en la literatura puede consumir un tiempo considerable y valioso, lo cual no es conveniente, 2) permiten la preselección, o desestimación, rápida del proceso EOR adecuado a un campo en particular, 3) permite desde el punto de vista del ingeniero de yacimientos, contemplar el proceso MEOR como un método EOR a implementar. Por lo anterior las tablas propuestas fueron implementadas en el código de la herramienta computacional para la preselección del proceso microbiano.

Para poder determinar el rango de aplicabilidad de los parámetros en el código de la HC-RMAM, que es del 100-80%, se utilizó el valor máximo encontrado en la literatura como el límite superior de los parámetros propuesto, y el valor mínimo como el límite inferior. De acuerdo con la convergencia o divergencia de los datos de estudio respecto al rango propuesto, se calculará un porcentaje de aplicabilidad. En la figura 3 se muestra como el porcentaje de estos parámetros es promediado para poder obtener el porcentaje de aplicabilidad del proceso MEOR.

Donde cada valor corresponde al porcentaje de la densidad, °API; viscosidad,  $\mu$ ; saturación de aceite residual,  $S_{or}$ ; espesor,  $h$ ; porosidad,  $\phi$ ; permeabilidad,  $k$ ; profundidad,  $p$ ; salinidad,  $sal$ ; garganta de poro,  $GP$ ; acidez,  $Ph$ ; y  $PA$  corresponde al porcentaje de aplicabilidad.

Para confirmar la correcta funcionalidad de la herramienta HC-RMAM, fue necesario validarla; para ello, se utilizaron 16 casos reportados como exitosos a nivel nacional e internacional (Cerrón *et al.*, 2016; Mauren y Dietrich, 1999; Pautz *et al.*, 1992). Antes de concluir satisfactorios los resultados obtenidos fue necesario realizar un análisis paramétrico con el fin de identificar las propiedades que incumplieron y determinar si resultan críticas para la viabilidad técnica de la HC-RMAM, el cual determinó que dicha validación fue satisfactoria en 100%.

Una vez validada la herramienta, se procede a realizar la evaluación y selección técnica de 33 campos de diferentes regiones de la República Mexicana reportados por Reyes (2017). Para esto se recopilan las propiedades del sistema roca-fluido basadas en los criterios de selección establecidas en la herramienta computacional, mismos que serán comparados y permitirán definir la viabilidad del proceso microbiano como método de recuperación mejorada.

Derivado de dicha actividad, se identificó que para el MEOR bajo el subproceso *ex situ*: el 54% de los 33 campos analizados resultaron compatibles con el biopolímero, 30% con biosurfactantes, 82% con inyección miscible de  $CO_2$ , 100% con inyección miscible de gas hidrocarburo, 0% con inyección miscible de  $N_2$ , 51% con inyección inmisible de  $CO_2$ , 6% con inyección inmisible de gas hidrocarburo, y 84% con inyección inmisible de  $N_2$ . Derivado de la información recopilada, para el subproceso *in situ* se analizaron 27 campos de la Sonda de Campeche, los cuales resultaron no ser viables después del análisis paramétrico debido al incumplimiento de dos propiedades críticas (concentración de sal y temperatura) que definen la supervivencia del microorganismo.

Dependiendo del subproceso microbiano, *in situ* o *ex situ*, se tienen criterios de selección relevantes que el usuario debe prestar mayor atención. Por ejemplo, para el subproceso *in situ*, la temperatura del medio ambiente tiene una profunda influencia en el microbio. Al aumentar

la temperatura también aumenta la velocidad de reacción; pero, existe un nivel de temperatura óptimo para cualquier especie dada. Cuando la temperatura se eleva por encima del nivel óptimo, la tasa microbiana del metabolismo disminuye y finalmente se detiene a medida que las proteínas que forman las enzimas se desnaturalizan. La mayoría de las enzimas no pueden soportar temperaturas superiores a 70 °C; sin embargo, algunas enzimas que poseen los microbios termofílicos permanecen activas a temperaturas de hasta 100 °C (Donaldson *et al.*, 1989).

Respecto al subproceso MEOR *ex situ*, la temperatura es un parámetro crítico limitante de aplicación a los procesos químicos como métodos de EOR, debido a que estos procesos se basan en la estabilidad de los químicos inyectados, ya que el aumento de la temperatura sobre el rango de aplicación sugerido degradará el químico inyectado y reducirá la eficiencia de recuperación de aceite y por lo tanto será un proyecto no rentable.

Para continuar con el análisis económico, se seleccionaron dos de los campos analizados previamente con mayor porcentaje de aplicabilidad y compatibilidad con los bioproductos. Dichos campos fueron el Otates y Magallanes, ambos ubicados en el estado de Tabasco. De éstos, se calculó la cantidad de aceite incremental y el tiempo de duración del proyecto. Los resultados obtenidos mostraron que para el campo Otates la cantidad de aceite incremental era de 50.5 millones de barriles (MMBLS) en un tiempo de 37 años, y mientras que para el campo Magallanes era de 213.7 MMBLS en un tiempo de 100 años. Con estos datos se procedió a realizar el análisis económico, obteniendo un estatus del proyecto rentable en ambos campos, debido a que el VPN da un valor positivo de 223 millones para el campo Otates y 98 millones de dólares para el campo Magallanes.

## Conclusiones

Para contar con una herramienta computacional confiable, en HC-RMAM se determinó que el porcentaje mínimo de implementación de los MEOR fuera del 80%, en caso contrario puede afectar el desempeño del proyecto.

El desarrollo y uso de HC-RMAM permitió conocer de manera preliminar la viabilidad de los MEOR en campos nacionales ubicados en Veracruz, Tabasco, Tamaulipas y Campeche.

Se asume de vital importancia incluir el análisis paramétrico de cada una de las propiedades que definen la viabilidad de los MEOR ya que de ello depende el garantizar el éxito de los proyectos.

## Referencias

- Aladasani, A. y Bai, B. (2010). *Recent Developments and Updated Screening Criteria of enhanced Oil Recovery Techniques*. Society of Petroleum Engineers, SPE 130726. Conferencia y Exposición Internacional de Petróleo y Gas CPS/SPE, Beijing, China. <https://cutt.ly/enodXdX>
- Al-Sulaimani, H., Joshi, S., Al-Wahaibi, Al-Bahry, S. Elshafie, A. y Al-Bemani, A. (2011). Microbial biotechnology for enhancing oil recovery: Current developments and future prospects. *Society for Applied Biotechnology*, 1(2), 147-158, India. <https://cutt.ly/bnodVvk>
- Beggs, H. D. (1991). *Production Optimization Using Nodal Analysis TM*. OGCI.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) (2012). *El futuro de la producción de aceite en México: Recuperación Avanzada y Mejorada IOR-EOR*. <https://cutt.ly/dnogtd>

- Cerón, I. B., Imbaquingo, V. H. y Gallegos, A. (2016). Recuperación mejorada de petróleo mediante biotecnología para el Campo BEV. *Revista Politécnica*, 38(1). <https://bit.ly/3rQvuxh>
- Donaldson, E.C., Chilingarian, G.V. y Yen, T.F. (1989). *Microbial enhanced oil recovery. Developments in petroleum science*. Elsevier. <https://bit.ly/3DFUBos>
- Hitzman, D.O., Bailey, S.A. y Stepp, A.K. (2003). *Innovative MIOR Process Utilizing Indigenous Reservoir Constituents*. Final Technical Report. U.S. Department of Energy, National Petroleum Technology Office. <https://bit.ly/3lOobCe>
- Maure, M. A., Saldaña, . A. A. y Juarez, A. R (2005). Biotechnology applications to EOR in Talara offshore oil fields, Northwest Peru. En *SPE Latin American and Caribbean petroleum engineering conference*. SPE Publications, Rio de Janeiro. <https://cutt.ly/6nod8cU>
- Osunde J. E. y Balogun, S. A. (2013). Micro-organisms in enhanced oil recovery. *Ife Journal of Science*, 15(3), 617-630. <https://www.ajol.info/index.php/ijs/article/view/131590>
- Pautz, J.F., Sellers C.A., Nautiyal C. y Allison E. (1992). *Enhanced Oil Recovery Projects Database*. National Institute for Petroleum and Energy Research. <https://bit.ly/31l4lfM>
- Reyes Rentería, I. (2017). *Desarrollo de una herramienta computacional para la evaluación y selección de procesos químicos como métodos de recuperación mejorada* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Carmen].
- Steven L. B., y Lockhart, T. P. (2000). Reservoir Engineering Analysis of Microbial Enhanced Oil Recovery. *Society of Petroleum Engineers Inc.*, SPE 63229. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas. <https://doi.org/10.2118/63229-MS>