

Desasfaltado de un aceite crudo pesado utilizando un solvente de bajo costo a condiciones atmosféricas

Deasphalting of heavy crude oil using low-cost solvent at atmospheric conditions

Felipe Sánchez-Minero^{1,*}, Cesar Fernández-Vargas¹ y Noemí Moreno-Montiel¹

(1) UCyEH, Departamento de Ingeniería Química Petrolera, ESIQIE, IPN, Zacatenco 07738, CDMX, México

*autor de correspondencia (fsanchez@ipn.mx)

Recibido 09/11/2024

Evaluado 05/12/2024

Aceptado 30/12/2024

<https://doi.org/10.65093/aci.v16.n1.2025.23>

RESUMEN

En el presente trabajo, se evaluó el proceso de desasfaltado de un aceite crudo pesado (15.9° API) utilizando diferentes solventes (n-pentano, n-hexano, mezcla parafínica y nafta ligera). El estudio fue realizado en una planta de desasfaltado a nivel laboratorio, la cual está integrada por tres contenedores para precipitar el insoluble en cada solvente. Los resultados muestran que el n-pentano alcanzó la mayor actividad en la precipitación de insolubles, lo cual de acuerdo con el análisis SARA corresponde a la fracción de asfaltenos. Enseguida, la nafta ligera muestra una actividad interesante en la precipitación de asfaltenos, 26% menor que la actividad del n-pentano, pero con un costo 8 o 10 veces menor que la n-parafina. Esto puede representar una alternativa para mejorar el aceite crudo pesado mediante un tratamiento de bajo costo.

Palabras clave: parafina, nafta ligera, precipitación, asfaltenos

ABSTRACT

In the present work, the deasphalting process of a heavy crude oil (15.9° API) was evaluated using different solvents (n-pentane, n-hexane, paraffinic blend, and light naphtha). The study was carried out in a deasphalting system to laboratory level, which is constituted for three containers to precipitate the insoluble in each solvent. Results show that n-pentane achieved the highest activity in the precipitation of insoluble, which according to the SARA analysis are mainly made up of the asphaltenes fraction. Then, light naphtha shows an interesting activity in the precipitation of asphaltenes, 26% lower than n-pentane, but with a cost 8 or 10 times lower than n-paraffin. This may represent an alternative to upgrade heavy crude oil at a lower treatment cost.

Keywords: paraffin, light naphtha, precipitation, asphaltenes

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera presenta una disminución en la refinación de aceites ligeros debido a que las reservas globales son principalmente de aceites pesados (Sorrell *et al.*, 2010; Aburto *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2021). Por tanto, se requiere del diseño de nuevas tecnologías para procesar este tipo de aceites. La literatura muestra procesos relacionados con el mejoramiento de crudos pesados, como es el caso de la dilución, el craqueo térmico y catalítico, la viscorreducción y el desasfaltado (Carrillo & Corredor, 2013; Yeletsky *et al.*, 2020, Sanchez *et al.*, 2020).

En particular, el desasfaltado con solventes (SDA) se presenta como una buena alternativa para el tratamiento de aceites pesados debido a su bajo costo, lo que implica la remoción de estructuras complejas como asfaltenos, resinas y estructuras asociadas a ambas fracciones (Gray, 2019). Incluso el proceso de hidrotratamiento de un crudo convencional puede consumir menos hidrógeno si este ha sido previamente desasfaltado (Nguyen *et al.*, 2021). Además, la presencia de metales asociados a los asfaltenos, como el vanadio, provoca una alta desactivación de los catalizadores, siendo aconsejable la remoción de los asfaltenos del crudo previo a su entrada a la unidad de hidrotratamiento o viscorreducción (Shin *et al.*, 2014; Tannous & de Klerk, 2019).

El proceso SDA usualmente utiliza n-parafinas puras como solvente para la precipitación de asfaltenos. La literatura reporta que cuanto más corta sea la n-parafina (n-propano < n-butano < n-pentano < n-hexano < n-heptano), mayor será la actividad de desasfaltado (Speight, 2019). Otros estudios con diferentes solventes han sido reportados por Kumar *et al.* (2022), utilizando mezclas de carbón alifático o n-heptano con solventes polares. Más recientemente, Ilyin *et al.* (2023), han evaluado el efecto de la silicona durante la precipitación de asfaltenos, encontrando que este compuesto puede ayudar a separar una mayor cantidad de asfaltenos en comparación con el uso de hidrocarburos alifáticos.

Finalmente, el uso de nafta ligera proveniente de la destilación primaria puede ser otra alternativa para remover los asfaltenos presentes en el crudo. Este destilado tiene un bajo costo y está compuesto principalmente por parafinas lineales como pentanos, hexanos y heptanos. Consecuentemente, en este trabajo se evaluó la actividad precipitante de una nafta ligera en presencia de un crudo pesado y los resultados fueron comparados con la actividad precipitante de n-parafinas puras (n-heptano y n-hexano) y una mezcla parafínica, que estaban compuestas por tres n-parafinas (n-pentano + n-hexano + ciclohexano + n-heptano).

MATERIALES Y METODOS

Aceite crudo. Para este estudio se utilizó un aceite crudo pesado. Las principales propiedades de este aceite fueron determinadas conforme a la metodología ASTM (Tabla 1). En primera instancia, se obtuvo la gravedad API conforme al método ASTM D1298, utilizando para ello la técnica del hidrómetro o densímetro. Posteriormente, se determinó el contenido de azufre elemental mediante la técnica de difracción por fluorescencia de rayos X (XRFD). Para esta determinación se utilizó un analizador de azufre modelo Sindie XOS de acuerdo con el método ASTM D7039. Finalmente, la composición SARA del aceite fue determinada mediante la técnica de columnas de separación, conforme al método ASTM D2007. Los resultados muestran que el aceite está compuesto principalmente por asfaltenos (38.7% en peso) y resinas (41.7% en peso), componentes químicos polares de alto peso molecular. De acuerdo con las características de los petróleos pesados (Rana *et al.*, 2019), este aceite presenta también un alto contenido de azufre (5.0% en peso). En suma, los parámetros anteriores indican que se trata de un aceite crudo de baja calidad, el cual requiere tratamiento para aumentar su valor agregado.

Solventes. Para este estudio se utilizaron cuatro solventes (nafta ligera, mezcla de n-parafinas, n-hexano y n-pentano). La nafta ligera de carácter parafínico fue obtenida de un centro de procesamiento de gas. La mezcla de n-parafinas se preparó utilizando n-pentano (39,0 % en peso), n-hexano (33,0 % en peso), ciclohexano (15,0 % en peso) y n-heptano (13 % en peso). Finalmente, se evaluaron n-pentano y n-hexano como solventes de referencia.

Tabla 1: Propiedades del aceite crudo utilizado en el estudio.

Propiedad	Valor	Unidad	Método ASTM
Gravedad API	15.9	° API	D1298
Azufre total	5.0	% peso	D4294
Composición SARA			
Saturados	15.3	% peso	D2007
Aromáticos	4.3	% peso	
Resinas	41.7	% peso	
Asfaltenos	38.7	% peso	

Sistema de desasfaltado. El proceso de desasfaltado se llevó a cabo en un sistema de evaluación compuesto por tres contenedores colocados en serie, diseñados con su respectivo agitador y válvula para decantar el producto libre de compuestos precipitados. Finalmente, se utilizó un equipo de destilación para separar el solvente utilizado en el proceso SDA (Figura 1).

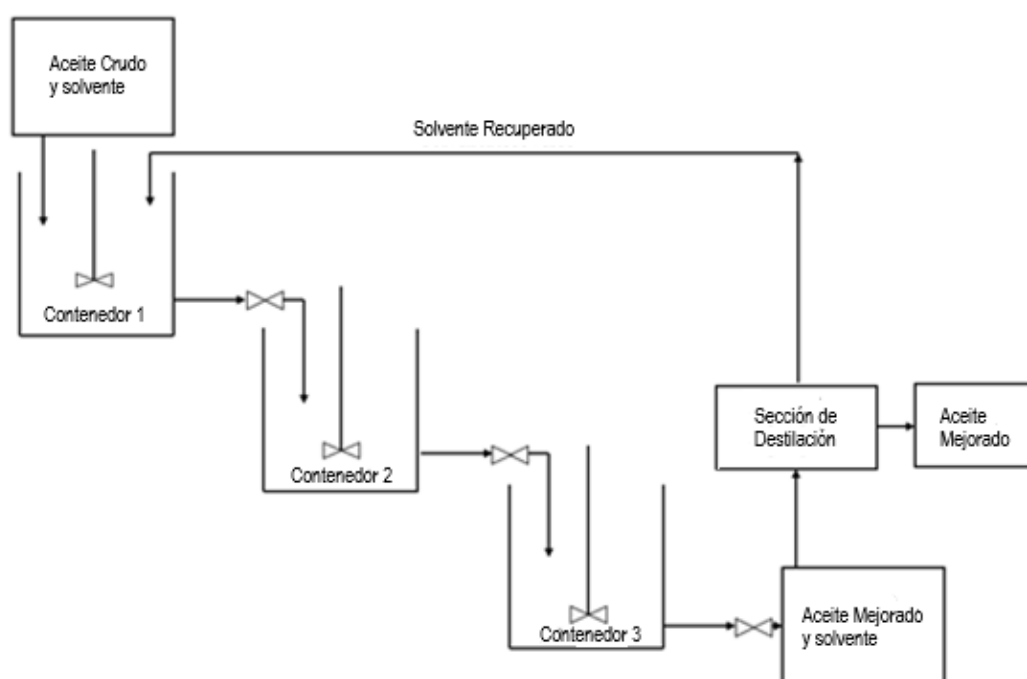


Fig. 1: Diagrama de proceso simplificado del sistema de desasfaltado (SDA).

Evaluación. Se colocaron 15 g de aceite crudo en el primer contenedor. Posteriormente, se agregaron 300 mL de solvente. El sistema se agitó a 320 rpm durante 30 minutos a 25 °C y presión atmosférica. La mezcla se dejó reposar durante 15 minutos. La fase líquida del primer recipiente se decantó y se alimentó al segundo recipiente, mientras que la fase sólida húmeda retenida en el primer recipiente se retiró para su análisis. Este procedimiento fue repetido en los recipientes 2 y 3. Finalmente, la mezcla líquida se separó por destilación a temperatura ambiente. Así, se obtuvo un producto mejorado, un solvente recuperado y una fase sólida retenida en cada vaso de precipitado. Estos compuestos se caracterizaron para evaluar el proceso de desasfaltado con diferentes solventes.

Balance de masa. Durante el proceso de desasfaltado se obtuvo una fase líquida sin precipitados y una fase sólida que contenía dichos precipitados. Estos componentes se evaluaron en términos de volumen y densidad para establecer un balance de masa del proceso. La Tabla 2 presenta el balance de masa con cada solvente utilizado.

Tabla 2: Balance de masa del proceso SDA con diferentes solventes.

Solvente	n-pentano	n-hexano	Mezcla n-parafinas	Nafta ligera
Aceite crudo, g	15.0	15.0	15.0	15.0
Fase líquida, g	10.34	10.92	10.81	11.43
Fase sólida				
Contenedor 1, g	2.18	2.01	2.09	1.61
Contenedor 2, g	1.57	1.39	1.42	1.12
Contenedor 3, g	0.81	0.56	0.53	0.64
Masa pérdida, g	0.10	0.12	0.15	0.20

Caracterización. La fase líquida obtenida durante el proceso de desasfaltado con diferentes solventes se caracterizó utilizando los métodos ASTM previamente descritos. Los valores de las propiedades obtenidas en función del disolvente utilizado se muestran en la Tabla 3. Los resultados muestran una caída importante en la concentración de asfaltenos de la fase líquida final con respecto al aceite original, lo cual confirma el desasfaltado del aceite con los disolventes utilizados. Por su parte, la concentración de maltenos (saturados, aromáticos y resinas) presenta un incremento en su concentración debido a la pérdida de concentración de asfaltenos. El análisis particular de cada disolvente muestra que las parafinas lineales (n-pentano y n-hexano) precipitan una mayor concentración de asfaltenos, sin embargo, el valor alcanzado por los otros disolventes no se encuentra muy alejado de los primeros.

Tabla 3: Propiedades de la fase líquida obtenida durante el proceso SDA con diferentes solventes

Solvente	n-pentano	n-hexano	Mezcla n-parafinas	Nafta ligera
Gravedad API	34.1	32.5	32.0	30.2
Azufre total, wt. %	0.34	0.61	0.76	1.54
Composición SARA				
Saturados, wt. %	24.5	22.0	22.2	20.6
Aromáticos, wt. %	6.1	5.6	5.6	5.2
Resinas, wt. %	58.4	60.4	59.8	61.0
Asfaltenos, wt. %	10.8	12.0	12.4	13.2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actividad del disolvente. Los resultados del crudo desasfaltado muestran diferentes grados de actividad en función del disolvente utilizado y del número de contenedores utilizados en el proceso (Figura 2). El n-pentano es el disolvente que alcanza la mayor actividad tras el paso del crudo por el sistema de desasfaltado. Con n-pentano como disolvente, se precipitó una masa total de 4,56 g, mientras que, con la mezcla de parafinas, n-hexano y nafta ligera, la masa precipitada fue de 4,04, 3,96 y 3,37 g, respectivamente. Si consideramos que la literatura establece que las fracciones precipitantes de un aceite crudo en presencia de componentes parafínicos son normalmente asfaltenos y resinas (Song *et al.*, 2024), y en el presente estudio, la fracción de asfaltenos en el crudo utilizado es del orden del 38,7 % en peso, equivalente a 5,81 g del total alimentado al proceso, se puede establecer que la masa precipitada corresponde principalmente a la fracción de asfaltenos.

Independientemente del disolvente utilizado, el contenedor 1 es donde precipita la mayor masa de asfaltenos. La actividad de los solventes disminuye a medida que el petróleo pasa del contenedor 1 al contenedor 2 y, finalmente, al contenedor 3. Esto confirma la presencia de diferentes tipos de asfaltenos (Abbasi *et al.*, 2024), algunos más insolubles a componentes parafínicos que otros. Consecuentemente, en este estudio podemos establecer al menos tres tipos de asfaltenos en función de su velocidad de floculación (solidificación) en cada contenedor. Así, en cada contenedor se precipitó una estructura química de asfaltano diferente, probablemente diferenciado por su polaridad o grado de solvencia con los disolventes utilizados en este estudio.

Otro aspecto a considerar es que la reducción en la actividad precipitante que presenta la nafta ligera se debe a que no todos sus componentes participan en la separación de asfaltenos. Si bien la nafta ligera contiene una cantidad importante de parafinas, también contiene otros componentes (olefinas, naftenos y aromáticos) que funcionan como inertes en el proceso de precipitación de asfaltenos. Estos últimos tienen un mayor grado de solvencia con los asfaltenos del aceite crudo en comparación con las parafinas lineales (pentanos, hexanos, heptanos, etc.).

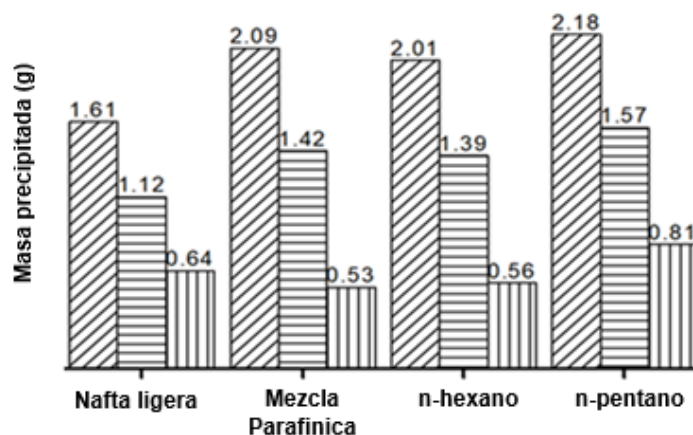


Fig. 2: Masa precipitada durante el proceso SDA utilizando diferentes solventes (contenedor 1 [▨], contenedor 2 [▧] y contenedor 3 [▩]).

La Figura 3 muestra el comportamiento de la gravedad API y el contenido de azufre elemental del aceite crudo original y desasfaltado utilizando diferentes solventes. Como se mencionó anteriormente, el n-pentano presenta la mayor capacidad de precipitación de asfaltenos, lo que permite obtener un petróleo tratado más ligero ($34,1^\circ \text{API}$) con un menor contenido de azufre ($0,34\%$ en peso). Por lo tanto, la precipitación de asfaltenos se relaciona directamente con el aumento de la gravedad API del aceite crudo y la disminución de su contenido de azufre. Estudios previos (Zhang *et al.*, 2013; Shi & Wu, 2021) revelan que la fracción de asfaltenos es la más densa de la composición SARA, además de que contiene una mayor presencia de azufre. El valor de la gravedad API fue superior a 30°API , lo que indica que el proceso de desasfaltado permite mejorar el aceite crudo, pasando de un crudo pesado a uno ligero, mientras que el contenido de azufre se reduce significativamente, alcanzando porcentajes de desulfuración del orden del $93,2\%$, $87,8\%$, $84,8\%$ y $69,2\%$ para n-pentano, n-hexano, mezcla de parafinas y nafta ligera, respectivamente.

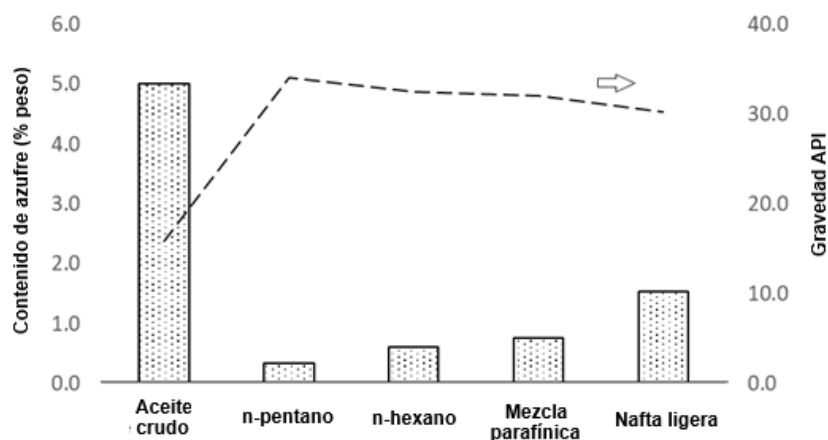


Fig. 3: Gravedad API y contenido de azufre del aceite crudo desasfaltado con diferentes solventes.

Evaluación económica: La Figura 4 presenta el costo de los diferentes solventes utilizados en este estudio. Las n-parafinas puras se obtuvieron de Sigma-Aldrich, con una pureza superior al 99,0 % en peso. Por lo tanto, su costo se considera similar al de un reactivo químico. Posteriormente, la mezcla de parafinas se obtuvo utilizando compuestos puros, por lo tanto, su costo es similar al de los compuestos de n-parafina. Finalmente, la nafta ligera se obtuvo en un complejo procesador de gases, en donde dicha nafta en fase líquida es separada de los gases mediante su punto de ebullición. En general, los resultados muestran un valor menor para la nafta ligera en comparación con el precio de los otros disolventes. El valor de la nafta ligera es del orden de 0.5 USD/litro, mientras que los otros disolventes presentan valores mayores a 5.0 USD/litro. Consecuentemente, el valor de la nafta ligera es 10 veces menor al valor de n-pentano, n-hexano y mezcla de parafinas.

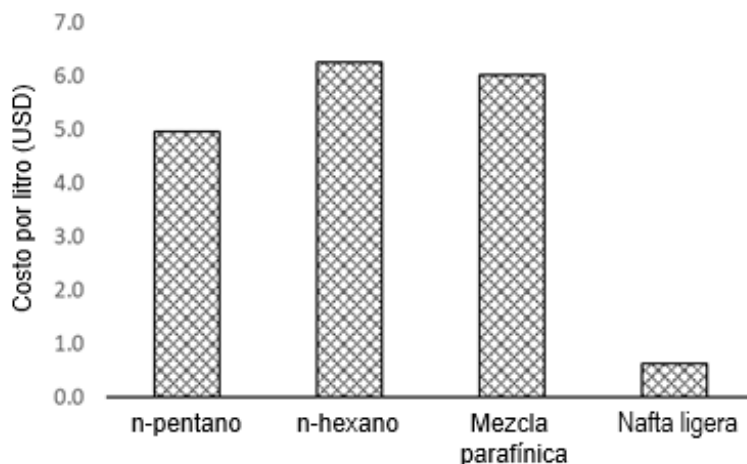


Fig. 4: Costo por litro de los diferentes solventes utilizados en el estudio.

Posteriormente, la comparación entre la actividad y la economía de los disolventes permite establecer una evaluación más completa del proceso de desasfaltado. En primera instancia, podemos comparar al disolvente con mayor actividad precipitante de asfaltenos, el n-pentano, el cual logró precipitar alrededor del 78 % de asfaltenos y eliminar el 93 % de azufre. Si su costo es de 5.0 USD por litro, su relación de eliminación de asfaltenos y azufre es del orden de 0.064 USD/asfalteno y 0.054 USD/azufre. En contraste, la nafta solo precipito el 58 % de asfaltenos y elimino un 69 % de azufre, sin embargo, su relación de eliminación es de 0.009 USD/asfalteno y 0.007 USD/azufre. Por lo tanto, la nafta ligera al tener la menor relación de ambos componentes se considera el ideal como disolvente precipitante.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se utilizó un aceite crudo pesado para evaluar la actividad precipitante de diferentes disolventes que hay en el mercado. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Si bien los compuestos parafínicos lineales, como el n-pentano, presentan una mayor actividad en la precipitación de asfaltenos, el uso de nafta ligera puede ser de gran utilidad debido a que al relacionar su actividad con su valor económico este disolvente presentó un valor varias veces menor en comparación con el de n-pentano, por lo tanto, se puede utilizar como una alternativa viable para mejorar aceites crudos pesados mediante el proceso de desasfaltado.
- Los disolventes utilizados en este estudio tienen una actividad bifuncional, ya que además de precipitar asfaltenos pueden ayudar a reducir la presencia de azufre en los productos. En este sentido, la nafta ligera es la que presenta una menor relación costo/contaminante, por tanto, es el mejor disolvente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Instituto Politécnico Nacional para la realización del presente trabajo (SIP20232037 y SIP20240751).

REFERENCIAS

- Abbasi, A., Malayeri, M. R. & Mohammadzadeh-Shirazi, M. (2024), La formación de emulsiones y lodos inducida por HCl y afectada por el tipo de asfalteno. *Geoenergy Science and Engineering*, 242, 213267. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213267>
- Aburto, J., Martínez-Palou, R., Mosqueira, M.L., Zapata-Rendon, B., Mar-Juárez, E., Bernal-Huicochea C., et al. (2011). Transporte de crudo pesado y extrapesado por ducto: Una revisión. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 75, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>
- Carrillo, J.A. & Corredor, L.M. (2013). Mejoramiento de crudos pesados: Castilla. *Fuel Processing Technology*, 109, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.059>
- Gray, M.R. (2019). Fundamentos del mejoramiento parcial de bitumen. *Energy and Fuels*. 33, 6843-6856. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01622>
- Ilyin, S.O., Yadykova, A.Y. & Gorbacheva, S.N. (2023). El desasfaltado de crudo pesado con aceite de silicona es un método ecológico para eliminar compuestos pesados y producir betún. *Geo. Sci. and Eng.*, 227, 211940. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211940>
- Kumar, R., Chebrolu, S., Kumar-Voolapalli, R. & Upadhyayula, S. (2022). Un proceso de desaromatización por desasfaltado con solventes (SD-A2) para el mejoramiento de crudo pesado. *Fuel*, 307, 121923. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121923>
- Li, Y., Wang, Z., Hu, Z., Xu, B., Li, Y., Pu, W., et al. (2021). Una revisión de la tecnología de mejoramiento in situ de crudo pesado. *Petroleum*, 7 (2), 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.09.004>
- Nguyen, N.T., Kang, K.H., Seo, P.W., Kang, N., Pham, D.V., Kim, G.T., Park S. (2021). Hidrocraqueo de petróleo desasfaltado C5: Efectos del H₂ y catalizadores dispersos. *Química del Petróleo*, 61, 172-182. <https://doi.org/10.1134/S0965544121020171>
- Rana, M.S., Marafi, A. & Albazzaz, H. (2019). Hidroprocesamiento de petróleo residual pesado: oportunidades y desafíos. *Catalysis Today*, 329, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.10.067>
- Sánchez, S., Silva-Oliver, G., Ramírez-Jiménez, E., Sánchez-Minero, F., Valdés-Pastrana, H., Méndez, F., et al. (2020). Evaluación teórica de los procesos de dilución frente a los efectos térmicos inducidos en el transporte de petróleo pesado. *Revista de Ciencia e Ingeniería del Petróleo*, 192, 107246. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107246>
- Shi, Q. & Wu, J. (2021) Repaso sobre compuestos de azufre en el petróleo crudo y sus productos: Estado del arte y perspectivas. *Energy and Fuel*, 35, 14445. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02229>
- Shin, S., Lee J. M., Hwang, J.W., Jung, H.W., Nho, N.S. & Lee K.B. (2014). Propiedades físicas y reológicas del petróleo desasfaltado producido mediante desasfaltado con solventes. *Chemical Engineering Journal*, 257, 242-247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.037>
- Song, F., Zheng. H., Li, T., Fu, X., Feng, Ch., Ma, Ch., et al. (2024). The influence of asphaltene and resin on the stability of crude oil emulsion and its demulsification mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 413, 125924. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125924>

- Sorrell, S., Miller, R., Bentley, R. & Speirs, J. (2010). Futuros del petróleo: Una comparación de las previsiones de suministro global. *Energy Policy*, 38, 4990-5003. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.020>
- Speight, J.G. (2019). Capítulo 12. *Mejoramiento por tratamiento con solventes*. Recuperación y mejoramiento de petróleo pesado. *Petróleo desasfaltado: una visión general*.
- Tannous, J.H. & de Klerk, A. (2019). Formación de asfaltenos durante la conversión térmica del petróleo desasfaltado. *Fuel*, 225, 115786. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115786>
- Yeletsky, P.M., Zaiquina, O.O., Sosnin, G.A., Kukushkin, R.G., Yakovlek, V.A. (2020). Craqueo de petróleo pesado en presencia de vapor y catalizadores nanodispersos basados en diferentes metales. *Tecnología de Procesamiento de Combustibles*, 199, 106239. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106239>
- Zhang, L.L., Wang, C.L., Zhao, Y.S., Yang, G.H., Su, M. & Yang C. H. (2013). Especiación y cuantificación de compuestos de azufre en asfaltenos del petróleo mediante espectros XANES derivados. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 41, 1328. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(14\)60002-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(14)60002-5)