

7. Inhibidores de la precipitación de asfaltenos

DOI: [cc.443.07](https://doi.org/10.4437/07)

RAFAEL MARTÍNEZ PALOU*

Resumen

Los asfaltenos son conocidos como el colesterol del petróleo y esto se debe a que los asfaltenos son macromoléculas que, bajo ciertas condiciones, tienden a precipitar sobre los ductos durante el proceso de transporte del petróleo. Como resultado de esto, se reduce el diámetro de los ductos por donde se conduce el petróleo, de manera similar a lo que sucede en las arterias y las venas de nuestro cuerpo cuando tenemos altos niveles de colesterol. Debido a esta situación se dificulta el transporte del crudo, llegando a casos extremos en los que se obstruye completamente el proceso de transporte.

Ésta es una problemática de gran importancia para los investigadores del área que se han enfrascado en el desarrollo de productos químicos capaces de inhibir la precipitación de asfaltenos. En este capítulo se estudian los asfaltenos, su estructura química y las causas que favorecen su precipitación en los ductos. También se examinan los inhibidores químicos utilizados para prevenir la precipitación y floculación de asfaltenos en la industria petrolera, que es un problema crucial que afecta la producción, el transporte y el procesamiento del crudo, especialmente en crudos pesados y extrapesados. Se describe la naturaleza de los inhibidores, los cuales actúan como agentes dispersantes, evitando la aglomeración y precipitación de los asfaltenos al modificar su interacción en el medio del crudo. Se destacan también otras sustancias utilizadas, como los ácidos orgánicos y aceites vegetales, que han mostrado una capacidad para solubilizar o estabilizar asfaltenos.

* Doctor en Ciencias. Investigador y profesor en el Instituto Mexicano del Petróleo, México. ORCID: 0000-0003-3598-7207; Scopus: 9639930800; correo electrónico: rpalou@imp.mx

Palabras clave: *asfaltenos, precipitación, inhibidores, macromoléculas.*

Introducción

Los asfaltenos son componentes del petróleo crudo que se caracterizan por su alto peso molecular y su estructura compleja. El contenido de estos compuestos en el crudo depende significativamente de su naturaleza y tiene un alto impacto en la calidad del crudo. Los asfaltenos, como comentamos en el capítulo previo, son grandes macromoléculas con tendencia a ser planas debido a la aglomeración de compuestos aromáticos (sistemas policíclicos) que caracterizan su estructura. Estos compuestos, además, presentan heteroátomos como oxígeno, nitrógeno y azufre distribuidos a lo largo de toda su estructura. También se ha detectado en ellos la presencia de metales como hierro, vanadio y níquel en muy bajas concentraciones (ppm), pero suficientes para evitar su biodegradación. Los asfaltenos se presentan en altas concentraciones en los crudos pesados y extrapesados y son los principales responsables de la elevada viscosidad de estos crudos (Alimohammadi *et al.*, 2019).

Los asfaltenos se consideran la fracción pesada del petróleo y éstos tienden a formar agregados debido a las interacciones π - π entre las capas poliaromáticas y los grupos polares que lo componen. Estos se definen comúnmente por su solubilidad, se caracterizan por ser insolubles en hidrocarburos parafínicos lineales de bajo peso molecular como el n-heptano, y son solubles en compuestos aromáticos como el tolueno.

Los asfaltenos han cobrado mayor relevancia en las últimas décadas, debido al incremento en la explotación de crudos pesados y al uso más extendido de técnicas de recuperación mejorada de petróleo. En este contexto, los fenómenos de precipitación y deposición de asfaltenos se han vuelto más frecuentes y severos, generando importantes problemas en los procesos de extracción, transporte y procesamiento del crudo.

Los inhibidores de la precipitación de asfaltenos son una herramienta esencial para mitigar estos problemas y garantizar la eficiencia y seguridad de las operaciones petroleras. Los inhibidores de la precipitación de asfaltenos son cruciales en la industria petrolera para garantizar la fluidez del petróleo y evitar problemas de obstrucción en las tuberías y equipos. Su uso se centra

en prevenir la formación de depósitos sólidos que pueden afectar el flujo y la eficiencia de la producción, transporte y procesamiento del petróleo (Tavakkoli *et al.*, 2014).

Una vez más, los productos químicos —en este caso, los inhibidores de la precipitación de asfaltenos— contribuyen a la solución de un problema característico de la industria petrolera. En este capítulo se analizarán los asfaltenos, las problemáticas asociadas a su precipitación y el papel de los inhibidores químicos en su mitigación.

La problemática de los asfaltenos en la industria petrolera

Los asfaltenos se mantienen dispersos en el crudo y pueden mantenerse estables con el apoyo de las resinas con las que forman una estructura micelar, pero, en ciertas condiciones, pueden desestabilizarse debido a cambios de temperatura, de presión, composición o tasa de corte, por inyección de gases, por estimulación ácida, por mezclas de crudos, etc. Como resultado, esto puede provocar que se agreguen, precipiten y se depositen en el interior de los ductos al ser transportados (Mohammed *et al.*, 2021a).

Los metales presentes en la estructura de los asfaltenos pueden formar complejos organometálicos con compuestos heterocíclicos, lo que genera cargas eléctricas y desestabiliza los asfaltenos por repulsión electrostática entre las cabezas polares de sus micelas, favoreciendo su precipitación. (Kar *et al.*, 2015).

Por su parte, las resinas se clasifican como fracciones polares ricas en compuestos aromáticos, solubles en hidrocarburos ligeros como el n-heptano. Estas actúan como agentes dispersantes (peptizantes) naturales, ya que mantienen a los asfaltenos dispersos en el crudo mediante interacciones fisicoquímicas que favorecen la formación de un sistema coloidal estable (Cheshkova *et al.*, 2019).

Las investigaciones sobre la composición de los crudos, realizadas mediante el análisis SARA —que determina cuantitativamente el contenido de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos—, han demostrado que la relación entre estos componentes influye significativamente en la estabilidad del crudo y en la tendencia de los asfaltenos a precipitar (Ashoori *et al.*, 2017).

El efecto de los factores que influyen en la desestabilización de los asfaltenos puede explicarse como consecuencia de factores tanto internos como externos, como se describe a continuación:

- *Efectos de la temperatura:* cuando la temperatura del crudo disminuye, la solubilidad de sus componentes también disminuye. Esto ocasiona que algunas micelas resinas-asfaltenos se desestabilicen, se agregen y precipiten, formando depósitos. También se ha demostrado que la solubilidad de los asfaltenos incrementa con el incremento de la temperatura, pero sólo hasta cierto límite en el que la tensión superficial del agente precipitante disminuye y, con ello, su poder de solvatación hacia las moléculas de asfalto, por lo cual éstas precipitan (Li *et al.*, 2022).
- *Efectos de la presión:* a una temperatura constante (condiciones isotérmicas), la disminución de la presión del crudo favorece la disminución de la densidad del flujo y, por consiguiente, ocurre una disminución de la solubilidad (Zendehboudi *et al.*, 2014). Esto provoca que algunas micelas resina-asfalto se agregen y precipiten. Sin embargo, este efecto puede revertirse a partir de cierto valor de presión, de manera similar a lo que ocurre con la temperatura. Este comportamiento puede explicarse por el incremento del peso molecular promedio del fluido al disminuir la presión (Wang *et al.*, 2017).
- *Factores químicos:* este factor se encuentra asociado a los casos de contacto del crudo con sustancias no involucradas en el proceso natural de producción. Por ejemplo, en ciertos procesos de estimulación, el crudo se pone en contacto con aditivos de estimulación que afectan el factor de solubilidad del crudo, como la acetona e isopropílico, o el glicol, que pueden causar la floculación de los asfaltenos. Estos aditivos también alteran el pH, perturbando el equilibrio del medio, lo que desencadena la depositación de los asfaltenos (Ali *et al.*, 2023).
- *Efecto de la inyección de CO₂:* otro factor que ha favorecido la precipitación de asfaltenos es el CO₂. El uso de CO₂ como estrategia de recuperación mejorada de petróleo (EOR) en pozos maduros es cada vez más común, debido a su alta eficacia para incrementar la extracción de crudo y su potencial contribución a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, se ha demostrado que la adición de CO₂ a los pozos puede favorecer significativamente la precipitación de asfaltenos y ello, a su vez, da lugar a la

inversión de la mojabilidad y daños en la formación (Zanganeh *et al.*, 2015). El CO₂ se emplea muy comúnmente en procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos al favorecer la miscibilidad; sin embargo, el CO₂ representa una de las causas más comunes de floculación de los asfaltenos en pozos productores, ya que provoca cambios en las propiedades del crudo y altera la proporción C/H (Chen *et al.*, 2018). El efecto puede manifestarse de manera diferente según las características del crudo (Wei *et al.*, 2020).

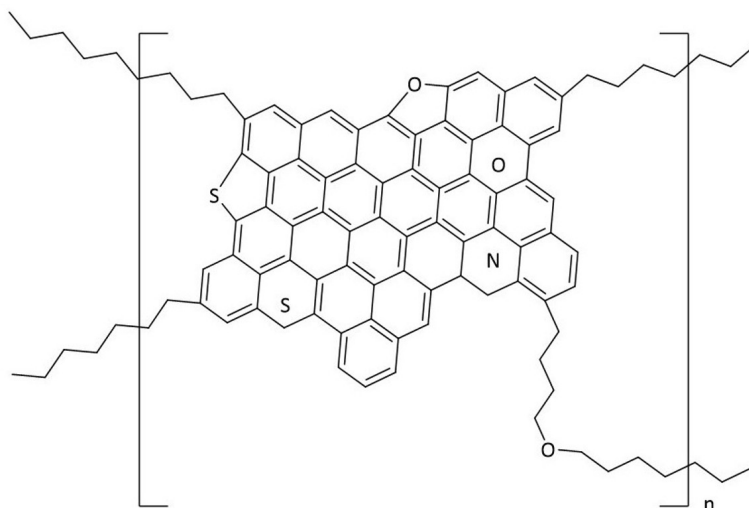
- *Mezclado y dilución del crudo:* en la industria petrolera es común la mezcla de diferentes crudos, por ejemplo, el petróleo pesado suele mezclarse con el ligero para reducir la viscosidad durante el transporte por oleoducto y también antes del refinado del petróleo se mezclan crudos con diferentes composiciones para facilitar su procesamiento. Estas mezclas alteran el equilibrio estable de los asfaltenos y suelen provocar su precipitación (Lei *et al.*, 2021). La adición de n-alcenos, como disolventes parafinicos, a la mezcla de asfalto y tolueno provoca el colapso de la capa lateral de la cadena de alcanos y una reducción de la repulsión estérica. En consecuencia, los nanoagregados de asfaltenos aumentan de tamaño y se manifiestan como precipitados o agregados (Meng *et al.*, 2023).
- *Efecto de factores eléctricos:* estudios recientes han identificado que la precipitación de asfaltenos en medios porosos se origina, principalmente, por la desestabilización de sus micelas debido a campos eléctricos inducidos por el flujo de fluidos en estos sistemas. Se ha establecido que los asfaltenos poseen una carga eléctrica intrínseca, factor clave en la estabilidad de las micelas según el modelo coloidal, donde la repulsión entre cargas del mismo signo en los núcleos de las micelas (asfaltenos) y resinas mantiene el equilibrio de fuerzas. La generación de un potencial de corriente durante el flujo en el medio poroso, o la aplicación de un campo eléctrico externo intenso, neutraliza estas cargas, altera el equilibrio intermolecular y provoca la floculación de las micelas (Farooq, Lædre, *et al.*, 2021).

Estructura de los asfaltenos

Los asfaltenos tienen una estructura muy compleja, son diferentes de un crudo a otro y puede sufrir variaciones considerables dependiendo de la

zona geográfica. De manera general, hay dos propuestas de modelos estructurales ampliamente difundidas en la literatura. Una de las representaciones estructurales más aceptadas para los asfaltenos es el modelo de isla, también conocido como modelo continental. Este propone que los asfaltenos están constituidos por un núcleo formado por anillos aromáticos y heterocíclicos condensados, rodeado por cadenas alifáticas de diferentes longitudes que pueden contener heteroátomos o diversos grupos funcionales (figura 7.1) (Pomerantz *et al.*, 2009).

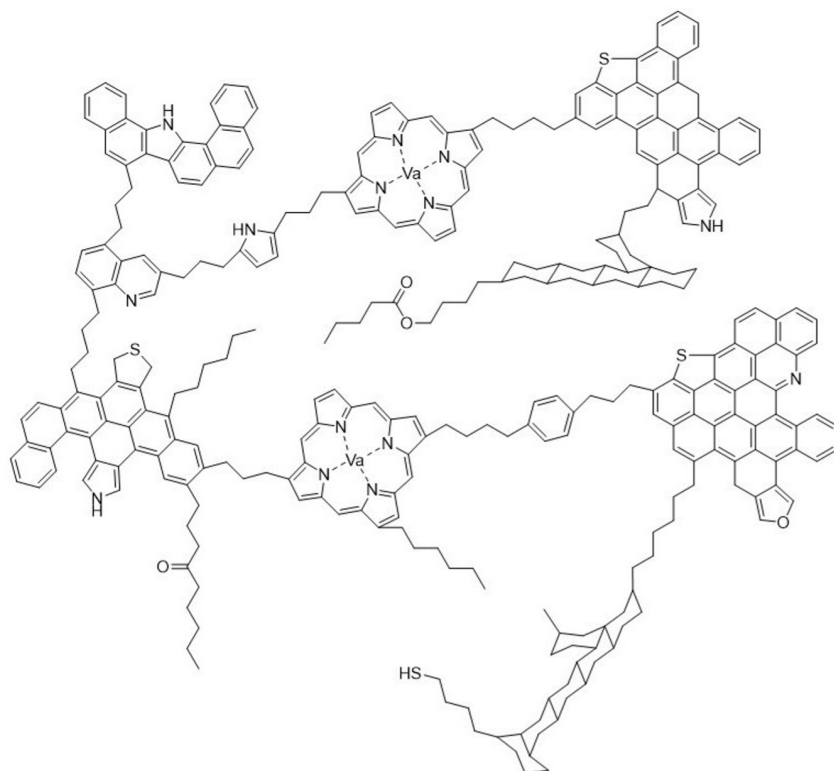
Figura 7.1. Estructura hipotética de los asfaltenos representativa del modelo de isla



Fuente: elaboración propia.

El otro tipo de estructura se conoce como el modelo de archipiélago, que aclama que los monómeros de asfaltenos están formados por clústers de sistemas aromáticos policondensados de entre 5 y 10 sistemas aromáticos, incluyendo sistemas porfirínicos, conectados por cadenas alifáticas que pueden contener o no heteroátomos (figura 7.2) (Ali *et al.*, 2023).

Figura 7.2. Estructura hipotética de los asfaltenos representativa del modelo de archipiélago



Fuente: elaboración propia.

Investigadores del Instituto Mexicano del Petróleo, en 2013, investigaron ambos tipos de estructuras a través de cálculos teóricos con orbitales moleculares y encontraron que los dímeros apilados (modelo de isla) son más estables en la mayoría de los casos que los dímeros archipiélagos. La variación notablemente amplia de la brecha energética (0.9 eV) entre las arquitecturas de isla y archipiélago depende, en gran medida, del tamaño del dímero y de la disposición de apilamiento. En el modelo de isla, las interacciones π - π desempeñan un papel de mayor importancia que en el modelo de archipiélago, y se comprobó, además, que los dímeros obtenidos a partir de dos monómeros

“grandes” son más abundantes en un 20.6% en la arquitectura isla, y en un 17.9% en la arquitectura archipiélago (Álvarez-Ramírez y Ruíz-Morales, 2013).

Estudios más recientes que utilizan diferentes técnicas (espectrometría de masas, separación selectiva de fracciones, ionización y solubilización selectiva) han demostrado que la estructura de los asfaltenos en realidad contiene ambos tipos de estructura (isla y archipiélago) y la estructura dominante depende, principalmente, de la muestra de asfaltenos estudiada (Chacón-Patiño *et al.*, 2017, 2018a, 2018b, 2020).

Los asfaltenos se consideran una fracción pesada del petróleo que se halla dispersa en el crudo, gracias a la presencia de resinas, conformando así una estructura micelar. La precipitación de estos hidrocarburos es un fenómeno ocasionado por la inestabilidad del sistema, la cual se debe a un cambio en su equilibrio de fases.

La precipitación de asfaltenos puede causar taponamiento en tuberías y equipos, deposición en líneas, una reducción de la producción de productos destilables en la refinación del aceite crudo, y contaminar y envenenar los catalizadores, disminuyendo su vida útil. Por otra parte, los depósitos de asfaltenos en los yacimientos pueden obstruir los poros de la roca productora, reduciendo su permeabilidad y su mojabilidad, lo que altera la productividad del pozo (Mohammed *et al.*, 2021b).

Cuando se extraen crudos poco estables, o las condiciones de trabajo afectan su estabilidad, los asfaltenos dispersos empiezan a precipitarse, se aglomeran y se depositan en la tubería de producción, lo que reduce su diámetro efectivo y restringe el flujo de petróleo. También pueden provocar taponamientos en los equipos de superficie (Primerano *et al.*, 2024).

La precipitación de asfaltenos también ocurre durante la nucleación y el crecimiento de cristales en los yacimientos y equipos, lo que provoca una disminución del flujo y problemas en el proceso productivo (Bemani *et al.*, 2017).

Es importante precisar que la desestabilización de los asfaltenos se refiere al crecimiento de partículas de asfaltenos que se presenta a nivel de nanoescala, mientras que la agregación se refiere a partículas de asfaltenos a nivel microescala. La etapa final del proceso se considera la precipitación, que implica la transición de partículas estables a nanoescala a partículas inestables a microescala (Chaisoontornyotin *et al.*, 2016)

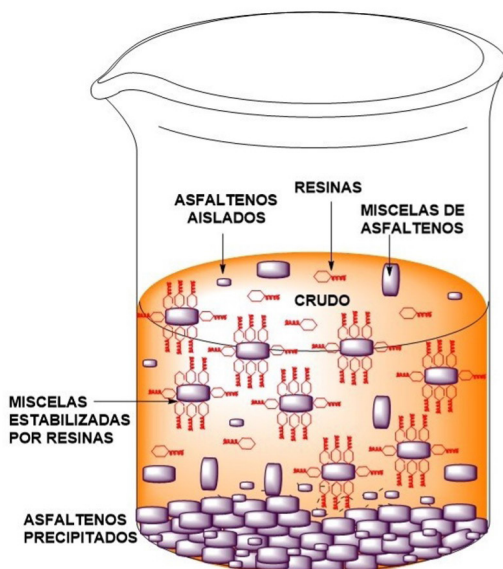
Modelos de inteligencia artificial para la predicción de la precipitación de asfaltenos

Los modelos para predecir las causas y condiciones de la precipitación de asfaltenos se basan principalmente en dos teorías: la teoría de la solubilidad y la teoría coloidal (Subramanian *et al.*, 2016a). El enfoque de la solubilidad supone que los asfaltenos están disueltos en el petróleo crudo y que la precipitación se produce si la solubilidad cae por debajo de cierto valor umbral (Hernández *et al.*, 2023).

Es bien conocido que los asfaltenos tienen una tendencia innata a autoasociarse, tanto en ciertos disolventes orgánicos como en el propio petróleo crudo. Algunos de los modelos más difundidos y estudiados para explicar esta autoasociación incluyen el modelo de peptización, que proclama que los agregados de asfaltenos se estabilizan mediante el ambiente rico en resinas que rodean los agregados y que inducen la autoasociación; el modelo fractal, que describe las estructuras autoasociadas a través de la geometría fractal, donde los agregados presentan relaciones de escala de ley de potencia entre tamaño y masa, es decir, éste modelo está enfocado en la morfología y no en la estabilización; y los modelos de Yen y de Yen modificado, que se basan en el apilamiento jerárquico de moléculas planas de los asfaltenos como el factor preponderante respecto a la estabilidad mediada por resina.

Recientemente, Shadman *et al.* propusieron un nuevo modelo de micelización termodinámica para predecir el inicio y la cantidad de precipitación de asfaltenos tras la titulación con n-heptano. En este modelo se considera la formación de partículas coloidales estabilizadas por una capa protectora de moléculas de resina adsorbidas. Asimismo, se calcula la energía libre de Gibbs del proceso de micelización, la cual incluye el calor de adsorción de la resina, el efecto liofóbico asociado a la autoasociación de los asfaltenos y la reducción de la tensión interfacial (IFT) debido a la fijación de la resina en el núcleo de los agregados de asfaltenos. En este modelo se incorporaron, por primera vez, los datos experimentales del diámetro medio de los agregados de asfalto junto con la densidad intrínseca del asfalto puro (figura 7.3) (Subramanian *et al.*, 2016b).

Figura 7.3. Representación del fenómeno de coexistencia de asfaltenos aislados, micelas de asfaltenos estabilizadas por resinas y asfaltenos precipitados y depositados



Fuente: elaboración propia.

Más recientemente, se ha propuesto una nueva hipótesis basada en las interacciones entre radicales libres presentes en la estructura de los asfaltenos, conocida como “apilamiento tipo hot cakes”, como un factor adicional relevante en la formación de agregados. Esta propuesta es consistente con hallazgos experimentales recientes obtenidos mediante espectrometría de masas por resonancia ciclotrónica iónica con transformada de Fourier y técnicas de microscopía de fuerza atómica sin contacto (Zhang *et al.*, 2020).

Dispersantes e inhibidores de la precipitación de los asfaltenos

Existen dos clases bien definidas de productos químicos que previenen la deposición de los asfaltenos. Estos se clasifican como dispersantes de asfaltenos (DAs) e inhibidores de la precipitación de asfaltenos (IPAs) (Kelland, 2014).

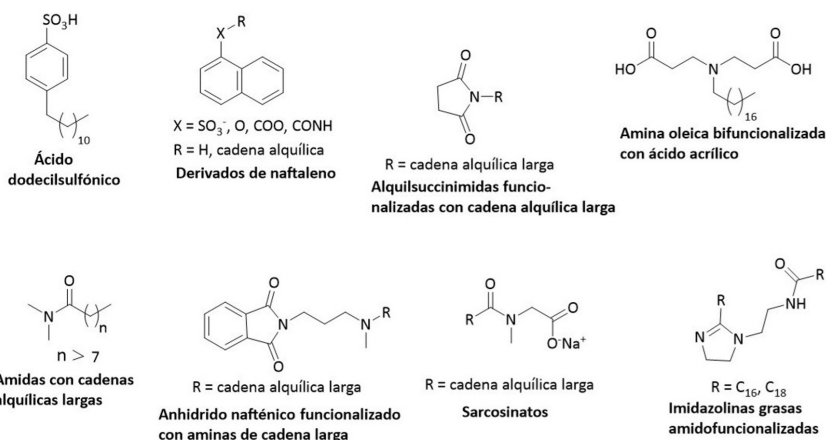
Adicionalmente a los DAs y los IPAs, se han empleado métodos de disolución de los asfaltenos, empleando disolventes orgánicos de asfaltenos. Por ejemplo, el tolueno y los xilenos son disolventes aromáticos que resultan efectivos para la disolución de los asfaltenos. Estos disolventes ayudan a mantener los asfaltenos en solución, evitando su floculación y deposición, lo cual es crucial para la producción y refinación de crudos pesados (Centeno *et al.*, 2004). También algunos ácidos grasos, como el aceite de coco, pueden actuar como disolventes y dispersantes de los asfaltenos (Alrashidi *et al.*, 2019) y etiléster oleato/etanol, una mezclas de disolventes amigables con el ambiente (Elochukwu y Mahmud, 2015).

Dispersantes de asfaltenos

Los DAs inhiben la sedimentación de estas partículas al reducir el tamaño de sus agregados y estabilizar su suspensión en el crudo. Estos aditivos suelen ser compuestos anfipáticos, caracterizados por una cabeza polar (con átomos como N, O o P) y una cadena hidrocarbonada alifática. La cabeza polar se adsorbe sobre los agregados de asfaltenos, mientras que la cadena alquílica modifica la polaridad superficial, generando una capa hidrofóbica externa. Esto permite que los agregados adquieran propiedades fisicoquímicas compatibles con el medio oleoso circundante, lo que favorece su dispersabilidad y evita la floculación.

La dosis aplicada de un DA influye significativamente en su desempeño (Meléndez-Álvarez *et al.*, 2016). Este comportamiento también puede variar según se trate de un crudo vivo o muerto (Firoozinia *et al.*, 2016) y depende en gran medida de las características específicas del crudo. En consecuencia, un inhibidor o dispersante puede ser altamente eficiente en un tipo de crudo y presentar un desempeño deficiente en otro.

Por lo general, los DAs son tensoactivos no poliméricos, mientras que los IPAs son tensoactivos poliméricos que también pueden actuar como DAs. Dentro de los DAs destacan compuestos con grupos aromáticos, ácidos alquilsulfónicos, sarcosinatos, ésteres fosfóricos, ésteres de cadenas alquílicas largas, ácidos carboxílicos y sus derivados etoxilados, tensoactivos anfotéricos, alquilfenoles etoxilados, imidazolininas y líquidos iónicos (figura 7.4).

Figura 7.4. Estructura de algunos dispersantes de asfaltenos

Fuente: elaboración propia.

Estudios recientes han demostrado que los productos químicos con buena dispersión de asfaltenos no siempre reducen su deposición (Gon y Fouchard, 2016).

Inhibidores de la precipitación de asfaltenos

Los inhibidores de la precipitación de asfaltenos son compuestos químicos que previenen la deposición de estos componentes orgánicos en el petróleo crudo. Estos inhibidores interactúan con las partículas de asfaltenos, retrasando su floculación, precipitación y deposición.

Los inhibidores de la precipitación de asfaltenos son compuestos químicos diseñados para prevenir o retrasar la agregación y deposición de estos componentes en sistemas petroleros. Su uso es crucial para evitar problemas operativos, como taponamientos en tuberías, la reducción de la permeabilidad en yacimientos y daños a catalizadores en refinerías.

Entre los inhibidores de la precipitación de asfaltenos destacan los tensoactivos iónicos, tal como el ácido dodecylbenzeno sulfónico y los no iónicos,

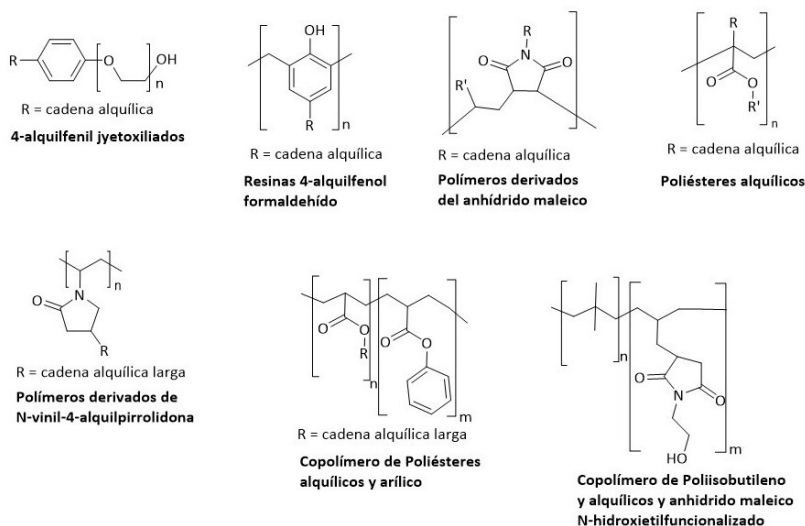
como el octilfenol poli(etilenglicoleter), comercialmente conocido como el TX-100 (Faraoun *et al.*, 2016).

El tratamiento convencional de inhibición de asfaltenos se realiza dosificando el inhibidor químico a través de capilares en la tubería de producción, o mediante tratamientos conocidos como “squeeze” (presionar) directamente en el yacimiento, para remediar o evitar el daño a la formación por precipitación de asfaltenos.

Recientemente, algunos disolventes eutécticos se han empleado como inhibidores de la precipitación de asfaltenos, como el cloruro de colina/etilenglicol (Jahangiri *et al.*, 2017), y los obtenidos a partir del cloruro de metiltrioctilamonio combinado con alcoholes como 1-propanol, propanodiol y glicerol (Sanati *et al.*, 2021).

Los IPAs más comunes son polímeros tales como los poliésteres y la poliamida/imina, copolímeros de succinimidas, polialquilenos poliésteramidas/acrilatos, polímeros alquílicos funcionalizados con pirrolidonas, pirridinas, oxazolidinas e imidazoles, líquidos iónicos y zwitteriónicos entre otros (figura 7.5).

Figura 7.5. Estructura de algunos inhibidores de la precipitación de asfaltenos



Fuente: elaboración propia.

Algunos productos de la nanotecnología se han aplicado con éxito en la adsorción de asfaltenos, así, ciertas nanopartículas funcionalizadas pueden adsorber asfaltenos, reduciendo su tendencia a agregarse y precipitar. Un ejemplo son las nanopartículas de óxidos metálicos con propiedades ácidas y básicas que han demostrado ser eficientes para este propósito (Farooq, Patil, *et al.*, 2021).

Se investigan nanopartículas metálicas, orgánicas e inorgánicas no metálicas, e inhibidores “inteligentes” con la capacidad de monitoreo en tiempo real y optimización de la dosificación y el desarrollo de nanoemulsiones para la liberación controlada de inhibidores, reduciendo la cantidad necesaria (Ahmadi *et al.*, 2025). También se ha demostrado que las nanopartículas pueden inhibir la precipitación de asfaltenos por adsorción, estabilización estérica y electrostática, alteraciones de la mojabilidad y la oxidación de los asfaltenos (Taha y Manshad, 2025).

Métodos analíticos para la selección de inhibidores de asfaltenos

Los investigadores han desarrollado diferentes pruebas para la evaluación del desempeño de los inhibidores para un crudo específico. Estas pruebas pueden conducirse con crudos vivos, en cuyo caso la precipitación de los asfaltenos se promueve por despresurización, o con crudos muertos, en los que la precipitación se promueve con hidrocarburos que favorecen la precipitación, como el n-pentano o el n-heptano.

Existen criterios divergentes en cuanto a las condiciones más convenientes para desarrollar las pruebas. Como criterio general, si se busca una evaluación más precisa y realista de cómo un inhibidor de asfaltenos actuará en condiciones de yacimiento, se opta por el crudo vivo, el cual es más representativo y, por tanto, más conveniente. Sin embargo, si se prioriza la facilidad de manejo y el costo, el crudo muerto puede ser una opción viable, aunque con limitaciones en la precisión de los resultados, ya que la prueba no reflejará completamente cómo el inhibidor actuará en condiciones de alta presión y temperatura. No obstante, las pruebas con crudo muerto son más convenientes para el análisis preliminar, donde se realizan estudios

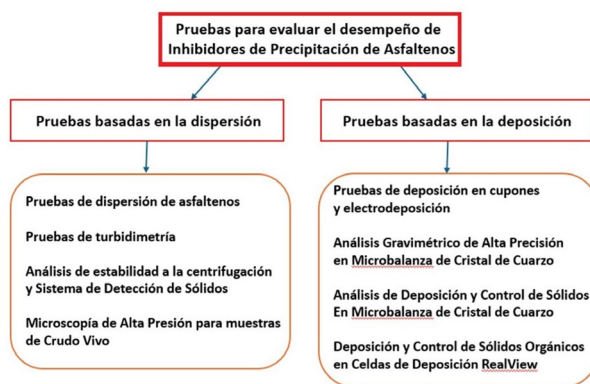
comparativos entre varios inhibidores y en los que la seguridad y el costo de las pruebas son los factores más importantes.

La práctica ha demostrado que es muy conveniente emplear varias pruebas de selección de inhibidores a diferentes escalas para obtener resultados más confiables, ya que se ha visto que los inhibidores parecen funcionar muy bien en estudios de laboratorio, pero su desempeño resulta muy deficiente en campo (Juyal *et al.*, 2022).

De acuerdo con Enayat y colaboradores, los métodos de selección de inhibidores se pueden dividir en dos grandes grupos: los que emplean pruebas analíticas basadas en la dispersión de los asfaltenos y los basados en pruebas de deposición (Enayat *et al.*, 2020).

En la figura 7.6 se muestra un diagrama que describe algunos de los métodos incluidos en cada grupo.

Figura 7.6. Métodos de selección de inhibidores de asfaltenos



Fuente: elaboración propia.

Mecanismos de inhibición de la precipitación de los asfaltenos

Aunque existen muchas teorías y discusiones al respecto de los mecanismos de inhibición de la precipitación de los asfaltenos, todo parece indicar que los inhibidores químicos actúan basados en los siguientes enfoques:

- *Estabilización coloidal*: la estabilización coloidal de los asfaltenos es clave para evitar su precipitación y deposición en sistemas de producción de petróleo. En este enfoque, los mecanismos de inhibición buscan mantener los asfaltenos en suspensión dentro del crudo, evitando su floculación y agregación. Ciertos IPAs modifican la interfaz asfalteno-líquido para mantenerlos dispersos, aumentando el umbral de floculación.
- *Peptización*: la peptización se basa en la acción de agentes dispersantes que interactúan con los asfaltenos y los mantienen en suspensión mediante diversos mecanismos, tales como la interacción de grupos polares de los asfaltenos, la reducción de la tensión interfacial y la estabilización electrostática. Las resinas y los compuestos anfífilos (como el nonifenol etoxilado) se adsorben en la superficie de los asfaltenos, mejorando su solubilidad.
- *Efecto estérico*: los inhibidores basados en efectos estéricos actúan creando una barrera física alrededor de los asfaltenos, evitando su acercamiento y floculación. A su vez, crean una capa protectora alrededor de los asfaltenos, favoreciendo su dispersión en la fase líquida. Moléculas grandes, como los polialquilenos y las nanopartículas, tienden a actuar por este mecanismo que impide la agregación de los asfaltenos.

En la actualidad, con el apoyo de la inteligencia artificial es posible hacer estudios teóricos para identificar IPAs específicos y de alta eficiencia para ciertas regiones (Punase *et al.*, 2022).

Aplicaciones de los asfaltenos

Dadas las grandes cantidades de asfaltenos que se separan en el proceso de extracción y procesamiento de crudo, se han hecho muchas investigaciones enfocadas a su aprovechamiento para diferentes aplicaciones. Además de su conocido empleo en la carpeta asfáltica en calles y carreteras, en los últimos años se han estudiado aplicaciones más sofisticadas, como su empleo en compósitos poliméricos, electrónica y supercapacitores, y en el desarrollo de matrices para la absorción de gases, entre otras (Ok *et al.*, 2024).

Conclusiones y perspectivas futuras

Aunque existen diversas alternativas tecnológicas para abordar la precipitación de asfaltenos, el uso de productos químicos —como los inhibidores de precipitación de asfaltenos (IPAs)— desempeña un papel cada vez más relevante en la industria petrolera. Sus perspectivas son prometedoras, impulsadas por factores como el aumento en la producción de crudos pesados y bitumen, los cuales presentan mayores concentraciones de asfaltenos, incrementando así la necesidad de inhibidores eficaces para prevenir problemas de flujo y taponamientos.

Los IPAs juegan un papel crucial en el mantenimiento de la eficiencia de los pozos y la infraestructura, evitando paradas costosas y optimizando la recuperación de hidrocarburos.

Las investigaciones recientes están dando lugar al desarrollo de inhibidores más eficientes, selectivos y respetuosos con el medio ambiente, incluyendo el empleo de nanopartículas que ofrecen una gran superficie específica y una alta capacidad de adsorción, interactuando eficazmente con las moléculas de asfalto. La tendencia se dirige hacia el desarrollo de inhibidores más “verdes” y con menor impacto ambiental.

Los IPAs han encontrado aplicaciones en técnicas de recuperación mejorada, especialmente en procesos como la inyección de CO_2 , donde la precipitación de asfaltenos puede ser un problema significativo. Los inhibidores son cruciales para mitigar este riesgo y mejorar la eficiencia de la EOR. A futuro, se continuará investigando el desarrollo de IPAs inteligentes, que sean efectivos bajo una amplia gama de condiciones operacionales.

Conclusiones

Los productos químicos, una vez más, representan una alternativa valiosa para abordar uno de los problemas cruciales de la industria petrolera: la precipitación de asfaltenos en el crudo. La investigación en el desarrollo de inhibidores de alto desempeño continúa en expansión, siendo fundamental garantizar que estos sean seguros, sostenibles y aplicados en dosis adecuadas para asegurar su eficacia. Asimismo, los estudios seguirán profundizando

en la comprensión de los mecanismos de precipitación de asfaltenos y en el modo de acción de los inhibidores a nivel molecular. En este sentido, las simulaciones atomísticas y moleculares están adquiriendo un papel cada vez más relevante, junto con el análisis de aspectos como la estabilidad y los costos asociados a los inhibidores de precipitación de asfaltenos (IPAs) para su implementación a escala industrial. En conjunto, la innovación en la química de estos inhibidores, aunada a una comprensión más profunda de los fenómenos involucrados, permitirá el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles, contribuyendo a garantizar el flujo y la producción óptima de hidrocarburos.

Referencias

- Ahmadi, S., Khormali, A., y Kazemzadeh, Y. (2025). A Critical Review of the Phenomenon of Inhibiting Asphaltene Precipitation in the Petroleum Industry. *Processes*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/pr13010212>
- Ali, A., Cole, D. R., y Striolo, A. (2023). Understanding the Aggregation of Model Island and Archipelago Asphaltene Molecules near Kaolinite Surfaces using Molecular Dynamics. *Energy & Fuels*, 37(16), 11662-11674. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00504>
- Ali, S. I., Lalji, S. M., Awan, Z., Khan, M. A., Khan, F., Alshahrani, T., y Balobaid, A. S. (2023). Evaluation of different parameters affecting the performance of asphaltene controlling chemical additives in crude oils using multiple experimental approaches assisted with image processing technique. *Geoenergy Science and Engineering*, 225, 211676. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211676>
- Alimohammadi, S., Zendheboudi, S., y James, L. (2019). A comprehensive review of asphaltene deposition in petroleum reservoirs: Theory, challenges, and tips. *Fuel*, 252, 753-791. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.016>
- Alrashidi, H., Afra, S., y Nasr-El-Din, H. A. (2019). Application of natural fatty acids as asphaltenes solvents with inhibition and dispersion effects: A mechanistic study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172, 724-730. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.066>
- Álvarez-Ramírez, F., y Ruiz-Morales, Y. (2013). Island versus Archipelago Architecture for Asphaltenes: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Dimer Theoretical Studies. *Energy & Fuels*, 27(4), 1791-1808. <https://doi.org/10.1021/ef301522m>
- Ashoori, S., Sharifi, M., Masoumi, M., y Mohammad Salehi, M. (2017). The relationship between SARA fractions and crude oil stability. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 209-213. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.04.002>
- Bemani, A., Ashoori, Siavash, y Bahrami, M. (2017). Parametric analysis of the effect of operation parameters on asphaltene deposition: An experimental study. *Petroleum*

- Science and Technology*, 35(20), 1989-1994. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1375949>
- Centeno, G., Trejo, F., Ancheyta, J., y Carlos, A. (2004). Precipitación de asfaltenos del crudo Maya en un sistema a presión. *Revista de la Sociedad Química de México*, 48(3), 179-188.
- Chacón-Patiño, M. L., Rowland, S. M., y Rodgers, R. P. (2017). Advances in Asphaltene Petroleomics. Part 1: Asphaltenes Are Composed of Abundant Island and Archipelago Structural Motifs. *Energy & Fuels*, 31(12), 13509-13518. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02873>
- Chacón-Patiño, M. L., Rowland, S. M., y Rodgers, R. P. (2018a). Advances in Asphaltene Petroleomics. Part 2: Selective Separation Method That Reveals Fractions Enriched in Island and Archipelago Structural Motifs by Mass Spectrometry. *Energy & Fuels*, 32(1), 314-328. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03281>
- Chacón-Patiño, M. L., Rowland, S. M., y Rodgers, R. P. (2018b). Advances in Asphaltene Petroleomics. Part 3. Dominance of Island or Archipelago Structural Motif Is Sample Dependent. *Energy & Fuels*, 32(9), 9106-9120. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01765>
- Chacón-Patiño, M. L., Smith, D. F., Hendrickson, C. L., Marshall, A. G., y Rodgers, R. P. (2020). Advances in Asphaltene Petroleomics. Part 4. Compositional Trends of Solubility Subfractions Reveal that Polyfunctional Oxygen-Containing Compounds Drive Asphaltene Chemistry. *Energy & Fuels*, 34(3), 3013-3030. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04288>
- Chaisoontornyotin, W., Haji-Akbari, N., Fogler, H. S., y Hoepfner, M. P. (2016). Combined Asphaltene Aggregation and Deposition Investigation. *Energy & Fuels*, 30(3), 1979-1986. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02427>
- Chen, J., Li, Tiantai, y Wu, S. (2018). Changes in the properties of conventional crude oil before and after CO₂ flooding. *Petroleum Science and Technology*, 36(20), 1642-1648. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1496117>
- Cheshkova, T. V., Sergun, V. P., Kovalenko, E. Y., Gerasimova, N. N., Sagachenko, T. A., y Min, R. S. (2019). Resins and Asphaltenes of Light and Heavy Oils: Their Composition and Structure. *Energy & Fuels*, 33(9), 7971-7982. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00285>
- Lochukwu, O. H., y Mahmud, H. K. B. (2015). An environmentally friendly solvent mix for asphaltene deposit removal. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(22), 10555-10565.
- Enayat, S., Tavakkoli, M., Yen, A., Misra, S., y Vargas, F. M. (2020). Review of the Current Laboratory Methods To Select Asphaltene Inhibitors. *Energy & Fuels*, 34(12), 15488-15501. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02554>
- Faraoun, A., Daaou, Mortada, y Bounaceur, B. (2016). Use of surfactants to mitigate precipitation of nonstable asphaltenes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(19), 2830-2836. <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1017671>
- Farooq, U., Lædre, S., y Gawel, K. (2021). Review of Asphaltenes in an Electric Field. *Energy & Fuels*, 35(9), 7285-7304. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03962>

- Farooq, U., Patil, A., Panjwani, B., y Simonsen, G. (2021). Review on Application of Nanotechnology for Asphaltene Adsorption, Crude Oil Demulsification, and Produced Water Treatment. *Energy & Fuels*, 35(23), 19191-19210. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01990>
- Firoozinia, H., Fouladi Hossein Abad, K., y Varamesh, A. (2016). A comprehensive experimental evaluation of asphaltene dispersants for injection under reservoir conditions. *Petroleum Science*, 13(2), 280-291. <https://doi.org/10.1007/s12182-016-0078-5>
- Gon, S., y Fouchard, D. M. (2016). Modified Asphaltene Capillary Deposition Unit: A Novel Approach to Inhibitor Screening. *Energy & Fuels*, 30(5), 3687-3692. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02185>
- Hernández, E. A., Lira-Galeana, C., y Ancheyta, J. (2023). Analysis of Asphaltene Precipitation Models from Solubility and Thermodynamic-Colloidal Theories. *Processes*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/pr11030765>
- Jahangiri, S., Shahrabadi, Abbas, Heydari, Akbar, Javadian, Soheila, Nazemi, Ali Hekmat, y Jahangiri, S. M. (2017). Choline chloride/monoethylene glycol deep eutectic solvent as a new asphaltene precipitation inhibitor. *Petroleum Science and Technology*, 35(19), 1896-1902. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1369116>
- Juyal, P., Enayat, S., Lucente-Schultz, R., Li, Q., Karimipour, M., Tavakkoli, M., Cao, T.-B., Yen, A., Russell, C., y Vargas, F. M. (2022). Case Study: Investigation of the Performance of an Asphaltene Inhibitor in the Laboratory and the Field. *Energy & Fuels*, 36(4), 1825-1831. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c03557>
- Kar, T., Mukhametshina, A., Unal, Y., y Hascakir, B. (2015). The Effect of Clay Type on Steam-Assisted-Gravity-Drainage Performance. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 54(6), 412-423. <https://doi.org/10.2118/173795-PA>
- Kelland, M. A. (2014). Asphaltene Control. En *Production Chemicals for the Oil and Gas Industry* (2.^a ed., pp. 134-136). CRC Press.
- Lei, Y., Yu, P., Ni, W., Peng, H., Liu, Y., Lv, X., y Zhao, H. (2021). Study on the Kinetic Process of Asphaltene Precipitation during Crude Oil Mixing and Its Effect on the Wax Behavior of Crude Oil. *ACS Omega*, 6(2), 1497-1504. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05121>
- Li, M., Tian, Y., Wang, C., Jiang, C., Yang, C., y Zhang, L. (2022). Effect of Temperature on Asphaltene Precipitation in Crude Oils from Xinjiang Oilfield. *ACS Omega*, 7(41), 36244-36253. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03630>
- Melendez-Alvarez, A. A., Garcia-Bermudes, M., Tavakkoli, M., Doherty, R. H., Meng, S., Abdallah, D. S., y Vargas, F. M. (2016). On the evaluation of the performance of asphaltene dispersants. *Fuel*, 179, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.056>
- Meng, J., Kanike, C., Sontti, S. G., Atta, A., Tan, X., y Zhang, X. (2023). Asphaltene precipitation under controlled mixing conditions in a microchamber. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138873. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138873>
- Mohammed, I., Mahmoud, M., Al Shehri, D., El-Husseiny, A., y Alade, O. (2021). Asphaltene precipitation and deposition: A critical review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 197, 107956. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107956>
- Mohammed, I., Mahmoud, M., El-Husseiny, A., Al Shehri, D., Al-Garadi, K., Kamal, M. S., y Alade, O. S. (2021). Impact of Asphaltene Precipitation and Deposition on Wettability

- bility and Permeability. *ACS Omega*, 6(31), 20091-20102. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03198>
- Ok, S., Samuel, J., Bahzad, D., Safa, M. A., Hejazi, M.-A., y Trabzon, L. (2024). The Asphaltenes: State-of-the-Art Applications and Future Perspectives in Materials Science. *Energy & Fuels*, 38(12), 10421-10444. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c00060>
- Pomerantz, A. E., Hammond, M. R., Morrow, A. L., Mullins, O. C., y Zare, R. N. (2009). Asphaltene Molecular-Mass Distribution Determined by Two-Step Laser Mass Spectrometry. *Energy & Fuels*, 23(3), 1162-1168. <https://doi.org/10.1021/ef8006239>
- Primerano, K., Mirwald, J., y Hofko, B. (2024). Asphaltenes and maltenes in crude oil and bitumen: A comprehensive review of properties, separation methods, and insights into structure, reactivity and aging. *Fuel*, 368, 131616. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131616>
- Punase, A., Burnett, W., Addis, K., Robertson, A., y Wylde, J. (2022, octubre 31). *Asphaltene Inhibitor Screening of Next Generation: Automated High Throughput Experimentation Method*. ADIPEC. <https://doi.org/10.2118/211229-MS>
- Sanati, A., Malayeri, M. R., Busse, O., y Weigand, J. J. (2021). Inhibition of asphaltene precipitation using hydrophobic deep eutectic solvents and ionic liquid. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116100. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116100>
- Shadman, M. M., Badizad, M. H., Dehghanizadeh, M., y Dehaghani, A. H. S. (2020). Developing a novel colloidal model for predicting asphaltene precipitation from crude oil by alkane dilution. *Journal of Molecular Liquids*, 318, 113879. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113879>
- Subramanian, S., Simon, Sébastien, y Sjöblom, J. (2016a). Asphaltene Precipitation Models: A Review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 37(7), 1027-1049. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1065418>
- Subramanian, S., Simon, Sébastien, y Sjöblom, J. (2016b). Asphaltene Precipitation Models: A Review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 37(7), 1027-1049. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1065418>
- Taha, S. M., y Manshad, A. K. (2025). State of asphaltene in crude oil and application of nano-chemicals for aggregation inhibition: A comprehensive review. *Fuel*, 393, 135004. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135004>
- Tavakkoli, M., Panuganti, S. R., Vargas, F. M., Taghikhani, V., Pishvaie, M. R., y Chapman, W. G. (2014). Asphaltene Deposition in Different Depositing Environments: Part 1. Model Oil. *Energy & Fuels*, 28(3), 1617-1628. <https://doi.org/10.1021/ef401857t>
- Wang, Z., Xu, Jianian, Liu, Hongli, Hou, Jiadan, y Zhang, Y. (2017). Effect of pressure, temperature, and mass fraction of CO₂ on the stability of the asphaltene constituents in crude oil. *Petroleum Science and Technology*, 35(22), 2109-2114. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1384838>
- Wei, J., Li, Jiangtao, Zhou, Xiaofeng, y Zhang, X. (2020). Effect of pressure and CO₂ content on the asphaltene precipitation in the light crude oil. *Petroleum Science and Technology*, 38(2), 116-123. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1684947>
- Zanganeh, P., Dashti, H., y Ayatollahi, S. (2015). Visual investigation and modeling of

asphaltene precipitation and deposition during CO₂ miscible injection into oil reservoirs. *Fuel*, 160, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.063>

- Zendehboudi, S., Shafiei, A., Bahadori, A., James, L. A., Elkamel, A., y Lohi, A. (2014). Asphaltene precipitation and deposition in oil reservoirs – Technical aspects, experimental and hybrid neural network predictive tools. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(5), 857-875. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.08.001>
- Zhang, Y., Siskin, M., Gray, M. R., Walters, C. C., y Rodgers, R. P. (2020). Mechanisms of Asphaltene Aggregation: Puzzles and a New Hypothesis. *Energy & Fuels*, 34(8), 9094-9107. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01564>