

Desarrollo de una proceso integral para el transporte de crudos pesados. Estudio para la formación y ruptura de emulsiones O/W mediante bietensoactivos

Dr. Rafael Martínez Palou
Dr. Ricardo Cerón
Dra. Alba Adriana Vallejo Cardona
Jesús Reyes Ávila
Benjamín Chávez Gómez
Graciela García Coloca
Dr. Mario Ramírez de Santiago
César Bernal Huicochea
Juan de la Cruz Clavel
Dr. Jorge Aburto

Coordinación de Investigación y Posgrado
Instituto Mexicano del Petróleo

Información del artículo: recibido: enero 2013-aceptado: abril de 2014

Resumen

Se describe una tecnología integral para el transporte de crudo pesados mediante la formación de una emulsión de aceite en agua (O/W) con el empleo de un biotensoactivo y la evaluación de las condiciones para la ruptura de la emulsión. El biotensoactivo requerido para formar la emulsión y desemulsificante empleado para romper la emulsión fueron sintetizados en los laboratorios del IMP y son biodegradables y de bajo costo.

Palabras claves: Aceite crudo pesado, transporte, emulsión, tensoactivos, desemulsificantes.

Integrated process development for heavy crudes transport. Study for the formation and rupture of O / W by biosurfactants

Abstract

An integrated technology for the transport of heavy crude oil by means the formation of a oil-in-water emulsion(O/W) using a surfactant is described. The conditions for emulsion breaking were also evaluated. The surfactants required forming the emulsion and the demulsifiers used for breaking them were synthesized in the IMP's laboratory and are cheap and biodegradable.

Keywords: Heavy crude oil, transportation, emulsion, surfactants, demulsifiers.

Introducción

En la actualidad la mayor parte del petróleo crudo extraído de pozos en México y en muchos otros países es crudo pesado (densidad igual o inferior a 20 ° API). La compleja

composición de estos crudos los hace difíciles y caros de producir y transportar a través de tubería por su baja movilidad y capacidad de flujo debido a una alta viscosidad y gravedad específica.

Se han desarrollado diferentes estrategias para facilitar el transporte de los crudos pesados tales como, la dilución con disolventes orgánicos o aceites más ligeros, el uso de mejoradores de flujo, reducción de arrastre mediante aditivos, y la formación de emulsiones de aceite en agua (O/W), conocidas como emulsiones inversas, para aumentar la fluidez del crudo.¹

La formación de emulsiones O/W, proceso industrialmente conocido como orimulsión,²⁻⁵ ha demostrado ser un método muy eficaz porque es barato y relativamente fácil de aplicar, sin embargo, este método tiene la desventaja de que después del transporte del petróleo crudo, éste queda emulsionado por lo general en más de un 20%, por lo que, se requiere un método de desemulsificación y deshidratación antes de su procesamiento y refinación.

La desemulsificación de emulsiones directas (W/O) ha sido ampliamente estudiada, ya que es el tipo de emulsiones que se forman naturalmente en el petróleo crudo,⁶⁻⁸ sin embargo, algunos pocos trabajos se han centrado en el proceso de desemulsificación de emulsiones inversas O/W.⁹⁻¹³

Las microondas han ganado una gran popularidad en la investigación científica en los últimos años, ya que han demostrado una alta eficacia para acelerar la mayoría de las reacciones químicas,¹⁴ pero hasta ahora todavía hay controversias sobre el mecanismo de acción de calentamiento dieléctrico de las microondas para explicar las razones exactas de por qué la irradiación por microondas es capaz de acelerar las reacciones químicas.

Algunos autores atribuyen la aceleración considerable de las reacciones y procesos bajo calentamiento dieléctrico por microondas al fenómeno conocido como “efecto de microondas específico”, que es un efecto no térmico producido por la radiación de microondas generalmente asociado con la absorción selectiva de la energía de microondas por moléculas polares,¹⁵⁻¹⁷ mientras que otros han tratado de demostrar que el efecto es meramente térmico,^{18,19} pero aun cuando los fenómenos han sido objeto de estudio en el caso de las reacciones químicas, estos efectos no se han evaluado cuidadosamente en el proceso de desemulsificación y, hasta ahora no se ha investigado cómo acelerar el proceso de desemulsificación de emulsiones O/W,²⁰ es por esta razón que se ha decidido estudiar la desemulsificación de una emulsión de aceite en agua (O/W), obtenida a partir de un crudo pesado mexicano por medio del uso de microondas.

En este trabajo se llevó a cabo un estudio para la formación y análisis de la estabilidad de emulsiones O/W con el objetivo de facilitar el transporte de crudos pesados y se establecieron las condiciones para la ruptura de estas emulsiones con el empleo de un agente desemulsificante en combinación con el calentamiento convencional y con el empleo de las microondas. También fue estudiado el efecto de la adición de un desemulsificante y el contenido de sal en la eficiencia del proceso de desemulsificación.

La optimización de todos los parámetros de este proceso de formación y ruptura de emulsiones O/W hacen viable el desarrollo de una tecnología para facilitar el transporte de crudos pesados y extrapesados empleando un procedimiento económico, fácil de implementar y en el que se emplean un biotensoactivo y un agente desemulsificante amigables al ambiente y que fueron desarrollados en el Instituto Mexicano del Petróleo.

Desarrollo del tema

Equipos y procedimientos de análisis

Los experimentos en microondas se realizaron usando un reactor de microondas CEM Discover Synthesis Unit (Monomode system) operándolo a 2450 MHz y monitoreado por una computadora. La calorimetría diferencial de barrido (DSC) se llevó a cabo utilizando un Shimadzu model DSC-60A. Las pruebas de contenido de agua se efectuaron en un titulador Karl Fisher (model Orion AF-8) equipado con un electrodo de platino doble. Las micrografías fueron tomadas en un microscopio óptico Nikon Eclipse E800. Los espectros de resonancia magnética nuclear de protón (RMN de ¹H) de carbono-13 (RMN ¹³C) se obtuvieron en un espectrofotómetro Jeol-Eclipse (300MHz) y empleando tetrametilsilano (TMS) como estándar interno. Los valores de los desplazamientos químicos se presentan en partes por millón (ppm), empleando diferentes disolventes deuterados que serán especificados en cada caso.

Caracterización del petróleo crudo: La muestra de petróleo crudo (BACABC3) utilizado en este estudio fue proporcionado por la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) de un pozo perforado en el sur del Golfo de México. Las muestras se caracterizaron por los siguientes procedimientos estándar: gravedad API (ASTM D-287), viscosidad cinemática (ASTM D-445), contenido de sal (ASTM-D-3230), contenido de parafina (UOP-46), contenido de agua (ASTM D-4006); y contenido de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos

(ASTM D-2007). El azufre total se determinó en un equipo Antex 9000S, empleando el procedimiento estándar ASTM D 5453-05: Método de prueba estándar para la determinación de azufre total en hidrocarburos ligeros, combustibles para motores y aceites por fluorescencia ultravioleta. La concentración de cada uno de los compuestos de azufre se analizó por cromatografía de gases utilizando un detector emisor atómico (GC-AED) Hewlett-Packard 6890 equipado con AED G2350A.

Calorimetría diferencial de barrido (DSC): Estos ensayos se llevaron a cabo en atmósfera de nitrógeno. Cada emulsión preparada se pesó con precisión (aproximadamente 10 mg) en un recipiente de muestra de aluminio que fue herméticamente cerrado. La muestra fue sometida a tres ciclos de enfriamiento-calentamiento entre 50 y - 60°C con una velocidad de flujo de calor de 10°C/min. Las emulsiones caracterizadas por DSC fueron preparadas y analizadas el mismo día; el análisis por DSC se llevó a cabo por duplicado.

Procedimiento para la síntesis del biotensoactivo IMP-H4:

En un reactor de doble pared con recirculación de agua a 90°C y provisto con agitación mecánica se coloca D-glucosa 3g (16.5 mmol), 1-dodecanol 9.2 g (49.5 mmol) y se añade lentamente 1.5 mL (28.2 mmol) de H₂SO₄. Luego de ese tiempo se neutraliza la reacción con NaOH 2.2 g (56.4 mmol) en 40 mL de agua. La mezcla se transfiere a un embudo de separación y se colecta la fase acuosa que es lavada con acetato de etilo (2 x 25 mL) y la fase orgánica se lava con agua (2 x 20 mL). Se reúnen los extractos acuosos y se seca con aire para dar un sólido.

Procedimiento para la síntesis del desemulsificante GlyC12:

En un balón de reacción provisto con condensador de reflujo y agitación magnética se añadieron 5 mmol de dodecanol, los cuales se colocaron en la cavidad del microondas y se irradiaron a 70°C durante 30 segundos, posteriormente se añadieron 2.5 mmol de glicina y 6 mmol de ácido metánsulfónico y la mezcla se irradió en el microondas por 20 minutos a 70°C con una potencia máxima de irradiación de 70 W. El producto final se lavó con etanol (10 mL) y éter etílico (20 mL) para obtener un sólido blanco. La estructura y adecuada pureza de los compuestos se determinó por

espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón y de carbono-13.

Pruebas de desemulsificación por microondas: Las pruebas de desemulsificación por medio de irradiación de microondas se llevaron a cabo utilizando recipientes cerrados (10 ml) que contienen 3 g de emulsión. Las emulsiones se irradiaron en recipientes sellados desde dos hasta 60 minutos bajo irradiación por microondas (un tubo para cada tiempo de irradiación) sin agitación a 60 °C. Las temperaturas de reacción fueron monitoreadas por una fibra óptica interna, la cual se protegió mediante una cubierta de boro-silicato, todo este sistema fue insertado directamente en las mezclas de reacción. La velocidad de calentamiento fue controlada por la potencia de salida del magnetron. La detección de la presión se consigue mediante un sensor hidráulico integrado en la tapa de giro del instrumento. El contenido de agua separada (AS) se determinó de acuerdo con la ecuación (1).

$$AS \text{ (vol\%)} = \frac{V^o - V_{KF}}{V^o} \times 100 \quad (1)$$

Donde V^o es el volumen original de agua y V_{KF} es el volumen de agua en la emulsión determinado por Karl Fischer después de cada dos minutos de irradiación por microondas. La repetición de las pruebas de desemulsificación utilizando irradiación por microondas se evaluó a través de la corrida de tres de cada uno de los experimentos en las mismas condiciones.

Pruebas de desemulsificación en baño de aceite:

Las pruebas de desemulsificación con calentamiento convencional se llevaron a cabo en un baño de aceite con la misma temperatura, la misma cantidad de emulsión (3.0 g) en tubos sellados de 10 mL. La temperatura interna de la emulsión del mismo dispositivo utilizado en el horno de microondas mediante un sensor fibra óptica. Los experimentos se llevaron a cabo simultáneamente para evitar diferencias por envejecimiento de la emulsión, **Figura 1.** El contenido de agua segregada por la emulsión se determinó siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente para la desemulsificación en microondas.



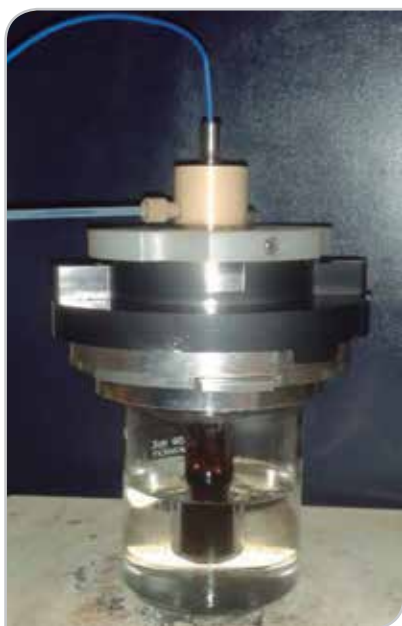


Figura 1. Fotografía del experimento desemulsificación con calentamiento en baño de aceite con la temperatura interna controlada con sensor de fibra óptica.

Discusión e Interpretación de datos

Caracterización del crudo

La caracterización fisicoquímica del petróleo crudo utilizado para preparar las emulsiones O/W presentadas en este trabajo se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Caracterización de la muestra de petróleo crudo utilizado en este estudio.

Parámetro	Unidad	Value Valor
Gravedad API	° API	16.4
Viscosidad Cinemática (50°C)	cm ² /s	505.1
Contenido de sal	lb/1000 bbl	3.9
Contenido de Parafinas	%	20.17
Contenido de agua	% Vol.	0.05
Azufre total	%	4.4
Nitrógeno total	%	0.29
Saturados	%	32.5
Aromáticos	%	21.8
Resinas	%	31.3
Asfaltenos	%	14.3

Como se puede observar en la **Tabla 1**, la gravedad API del crudo en estudio es de 16.4, por lo que se encuentra dentro del rango que caracteriza a los crudos pesados (10.0 - 21.9°API). Además es un crudo que presenta una viscosidad elevada y un considerable contenido de asfalteno, todo lo cual dificulta su transporte.

Síntesis del biotensoactivo IMP H-4^{21, 22}

Se sintetizaron diferentes tensoactivos para emplearlos como agentes emulsificantes que permitieran la formación y adecuada estabilidad de las emulsiones O/W. Todos

los tensoactivos se evaluaron comparativamente con el mismo crudo y a la misma concentración y como resultado de este estudio (datos no mostrados) se seleccionó el biotensoactivo IMP-H4 obtenido a partir de la glucosa y un alcohol con una cadena lineal de 12 carbonos (dodecanol). Este tensoactivo derivado de un carbohidrato natural es “amigable al ambiente” (biodegradable) y permite la formación de emulsiones estables de tipo O/W con el crudo empleado en este estudio. Los parámetros de la síntesis de este compuesto se resumieron a escala de banco y se desarrolló una metodología para el escalamiento y la producción industrial de este compuesto, **Figura 1**.²³

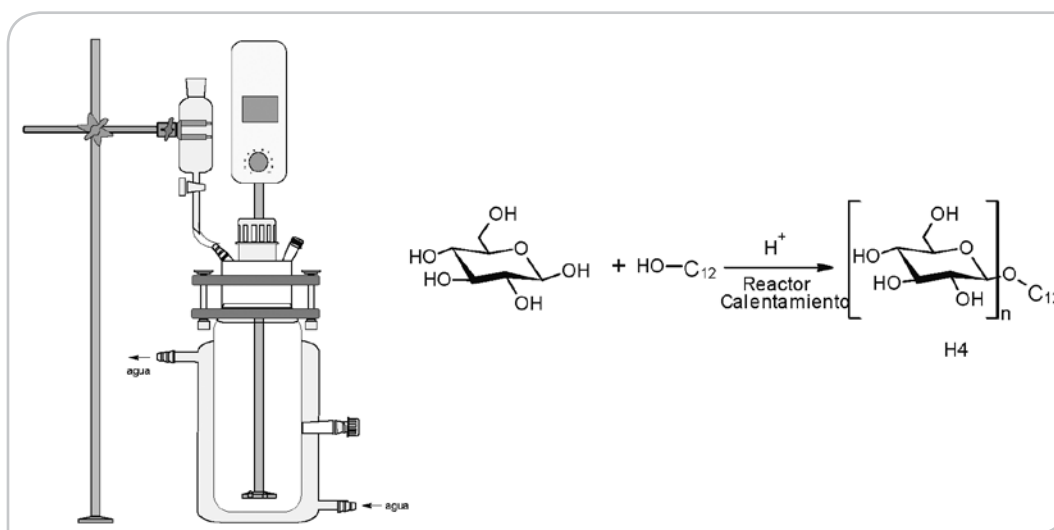


Figura 2. Esquema del reactor usado para la síntesis del biotensoactivo IMP-H4.

Síntesis de agentes desemulsificantes

De la misma manera, se sintetizaron y evaluaron una serie de compuestos desemulsificantes, con el objetivo de contar con un producto químico capaz de acelerar el proceso de ruptura de la emulsión O/W una vez que el crudo ha sido transportado hasta la refinería y como parte de la etapa de deshidratado y desalado del crudo. Todos los tensoactivos se evaluaron comparativamente con el mismo crudo y a la misma concentración (1000 ppm) y como resultado de este estudio (datos no mostrados) se seleccionó el desemulsificante iónico GlyC12 obtenido a partir de la reacción entre el aminoácido glicina y el dodecanol, con el siguiente procedimiento:

La síntesis del tensoactivo que se empleó como desemulsificante se llevó a cabo a través de la reacción entre el aminoácido glicina (**1**), el dodecanol (**2**) y el ácido metansulfónico (MeSO₃H), que a su vez que actúa como catalizador participa en la reacción conformando el anión (metánsulfonilo) del tensoactivo iónico obtenido. La síntesis se llevó a cabo por calentamiento en un horno de microondas de manera que el producto se obtuvo muy rápidamente (20 minutos de irradiación a 70 W de potencia a 70°C), **Figura 3**.²⁴

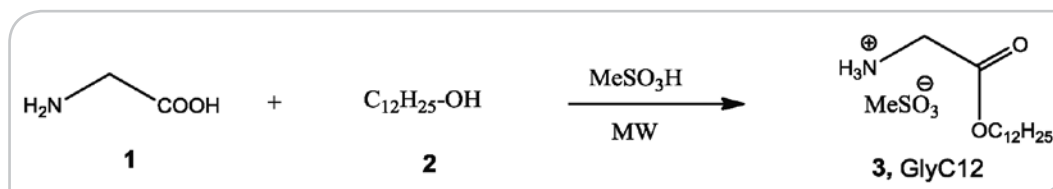


Figura 3. Síntesis del biotensoactivo GlyC12.

El compuesto desemulsificante GlyC12 corresponde a un tensoactivo iónico análogo a la familia de los lípidos iónicos conteniendo el catión amonio. El hecho de provenir de un aminoácido de origen natural y por las propiedades fisicoquímicas de los lípidos iónicos discutidas anteriormente, también puede designarse al compuesto GlyC12 como un desemulsificante “amigable al ambiente”. El producto se obtuvo puro como un sólido blanco en un rendimiento del 79% y su estructura se confirmó por RMN.

Estudios para la preparación de emulsiones O/W

De acuerdo al parámetro estudiado fue como se prepararon las emulsiones, se estudiaron variables como la concentración del tensoactivo, temperatura de preparación, velocidad de agitación, tiempo de agitación y efecto de la concentración de sales. A todas las emulsiones se les siguió una cinética de segregación de agua para determinar cuál es la emulsión que presenta mayor estabilidad y por consecuencia es la que se propuso para ruptura por medio de microondas y calentamiento convencional. Todas las emulsiones fueron incubadas a 45°C para seguir una cinética de segregación de agua.

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos en relación al efecto del contenido de sales en la estabilidad

de la emulsión. Se estudió la estabilidad en rango de 25-100 % de contenido de agua salada. La emulsión más inestable fue la que se preparó con pura agua de mar segregando un 23% del total de agua contenida. La estabilidad mejoró significativamente al preparar una emulsión con 75% de agua de mar, sólo segregó un 15% del total de agua contenida. La emulsión preparada a un 50% de agua de mar segregó un 10% del total del agua contenida. La que presentó mayor estabilidad fue la que se preparó con 25% de agua de mar, ya que sólo segregó un 5% del total de agua contenida. Estos resultados muestran claramente que el rendimiento emulsionante de TQA se mejora significativamente cuando el contenido de sales es menor. Por otra parte, la adición de NaCl aumenta significativamente la tensión interfacial (IFT) entre el petróleo crudo y agua, lo que conduce a una disminución en la estabilidad de la emulsión O/W.

El aumento de la fuerza iónica puede incrementar la atracción electrostática entre las gotitas de agua y por lo tanto favorece ligeramente la floculación y la coalescencia de estas gotitas, por lo que el incremento en el contenido de sales disminuye notablemente la estabilidad de la emulsión O/W.

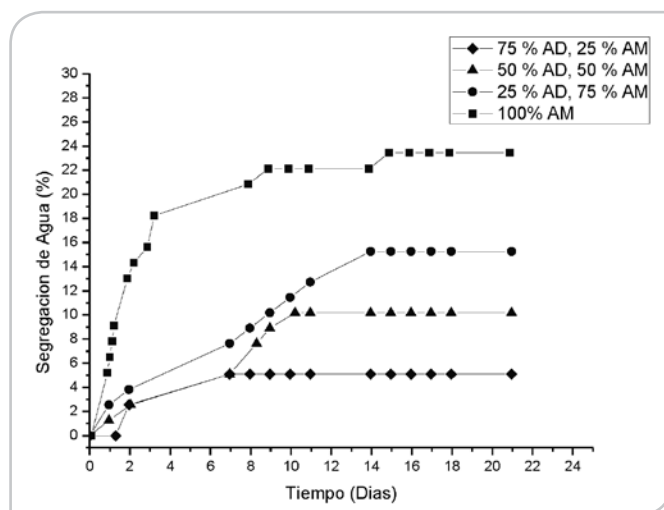


Figura 4. Cinética de segregación para emulsiones con diferentes concentraciones de sal (AD: agua destilada; AM: agua de mar).

Con el empleo de este biotensoactivo IMP H-4 y el estudio de los parámetros que afectan la estabilidad de las emulsiones, se desarrolló una metodología optimizada para la producción de emulsiones O/W a partir del crudo

caracterizado previamente. Los parámetros establecidos para la preparación de las emulsiones O/W se describen en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Condiciones empleadas para la preparación de la emulsión O/W.

Tipo de emulsión	Aceite en agua (O/W)
Porcentaje de crudo en la emulsión	70%
Tipo de agua	Agua de mar
Porcentaje de agua en la emulsión	30%
Concentración de tensoactivo	1500 ppm
Temperatura de preparación	65°C
Velocidad de agitación	8000 rpm
Tiempo de agitación	5 minutos

Las emulsiones y su estabilidad fueron mediante fluorescencia UV, calorimetría diferencial de barrido, determinación del tamaño de partícula y microscopía óptica, **Figura 5**.²⁵

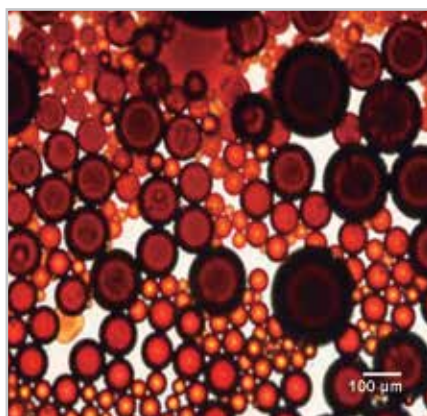


Figura 5. Micrografía óptica de la emulsión O/W.

El tamaño medio de partícula de esta emulsión fue de 24,3 μm y el tamaño de éste es de acuerdo a las observaciones de microscopía. El potencial zeta promedio de la emulsión fue de - 57.7 mV. La emulsión inversa de O/W preparado de esta manera fue estable durante una semana sin aparente separación de fases.

Desemulsificación por calentamiento térmico convencional en comparación con irradiación por microondas

Una vez concluido el estudio de estabilidad de las emulsiones inversas y seleccionadas, las condiciones para la preparación de una emulsión estable de O/W, se llevó a cabo el estudio para la ruptura de esta emulsión, a modo de conformar una metodología completa de formación-transporte y ruptura de la emulsión.

De modo convencional la forma de romper aceleradamente una emulsión O/W es mediante la aplicación de un agente desemulsificante. El calentamiento simultáneo de la emulsión ayuda a su ruptura.

Se estudió el efecto de la adición del desemulsificante GlyC12 y el efecto de calentamiento, tanto del calentamiento térmico convencional, como del calentamiento promovido por las microondas.

El estudio comparativo de desemulsificación de una emulsión O/W entre el calentamiento convencional y microondas se llevó a cabo en idénticas condiciones (temperatura, volumen y geometría del recipiente), con un estricto control de temperatura interna, utilizando un sensor de fibra óptica (FO). El sensor de FO es una forma

más precisa de control de la temperatura interna en el recipiente de reacción de microondas respecto al típico termómetro de infrarrojos externo.

Las pruebas de desemulsificación se realizaron utilizando recipientes sellados (10 ml), especialmente diseñados para la irradiación de microondas que contienen la misma cantidad de emulsión (3.0 g), a la misma temperatura y tiempo de calentamiento. Los experimentos se llevaron a cabo simultáneamente en el microondas y en el baño de aceite para evitar diferencias entre los experimentos debido al envejecimiento de la emulsión. En el caso de las microondas se trabajó a una potencia de 50 W, luego de un estudio previo para la optimización de la potencia más adecuada para llevar a cabo estas irradiaciones, **Figura 6**.

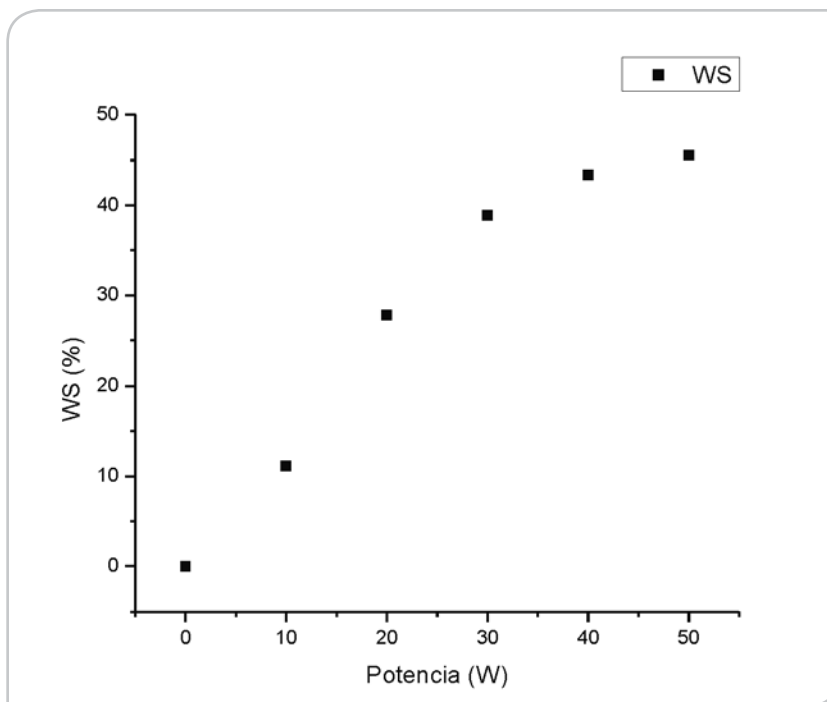


Figura 6. Porcentaje de agua separada (WS), de la emulsión a diferentes potencias máximas de microondas después de diez minutos de irradiación.

De acuerdo con la **Figura 4.13**, los mejores resultados de desemulsificación están claramente relacionados con la energía intensa irradiada al comienzo de cada prueba. Un incremento de la potencia máxima aplicada a la emulsión conduce a una mayor desemulsificación aun cuando los experimentos se llevaron a cabo al mismo tiempo y a la misma temperatura de calentamiento.

Una posible explicación del efecto térmico de las microondas puede ser, por ejemplo, el calentamiento selectivo de agua (polar) en la presencia del aceite (no polar) que generan la presencia de puntos calientes o sobrecalentamiento del agua. Un posible efecto no térmico o específico de las microondas es difícil de probar debido a las diferencias en la historia térmica de la emulsión.

En el caso del calentamiento convencional el recipiente sellado que contiene la emulsión se introdujo en un baño de aceite precalentado a 60°C. El calentamiento de la emulsión de 25 a 60°C tomó 12 minutos en el baño de aceite para alcanzar un equilibrio térmico, a partir de entonces se encuentra en las mismas condiciones térmicas que el microondas después de este momento, el agua separada se midió cada dos minutos hasta diez minutos.

En los experimentos con microondas a una potencia máxima de 50 W, la emulsión alcanzó 60°C en sólo 30 segundos y consecuentemente el tiempo total del experimento fue menor respecto a la de calentamiento térmico, sin embargo el agua separada a cada tiempo fue significativamente mayor para el experimento en microondas respecto al mismo tiempo con calentamiento convencional con baño de aceite, **Figura 7**.

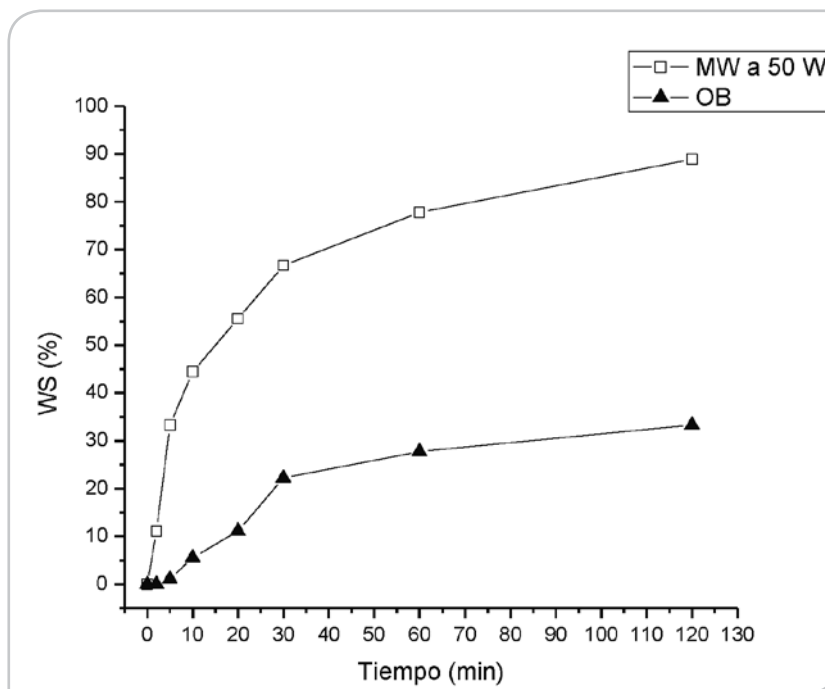


Figura 7. Porcentaje de agua separada (AS) con microondas (MW) a 50 W (y) y con baño de aceite(OB) durante diez minutos a 60 °C (Δ).

La micrografía de la emulsión después de un tiempo de 120 segundos de irradiación a 50 W confirma que la emulsión se rompe totalmente, mostrando que la irradiación por

microondas es una energía muy eficiente para romper este tipo de emulsión, incluso sin utilizar desemulsificantes químicos, **Figura 8**.

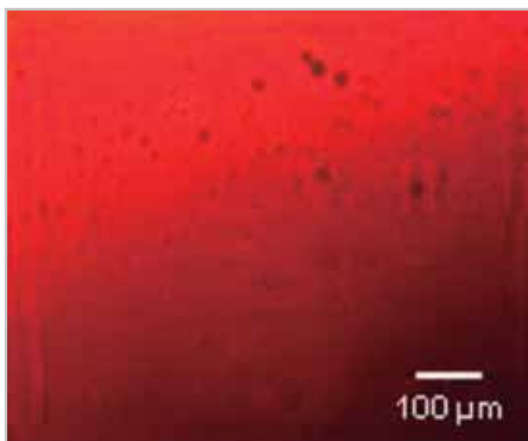


Figura 8. Micrografía de la emulsión rota después de 10 minutos de irradiación con microondas a 50 W.

La observación de la emulsión que se calentó en baño de aceite a la misma temperatura y durante el mismo tiempo mostró que el proceso de desemulsificación se encuentra aún en su fase inicial, **Figura 9**.

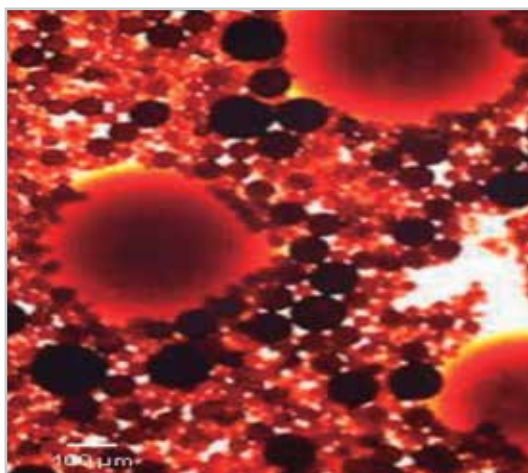


Figura 9. Micrografía del calentamiento de la emulsión O/W en baño de aceite a 60 ° C durante 120 minutos.

La micrografía muestra la presencia de las zonas que contienen petróleo crudo debido a la coalescencia de algunas gotas, mientras que el resto de las gotas permanecen todavía estables.

Efecto de la adición de un desemulsificante en la ruptura de la emulsión.

Comparativo de calentamiento convencional y por microondas.

Teniendo en cuenta la sinergia observada entre el calentamiento por microondas y desemulsificantes químicos

iónicos para romper emulsiones O/W,⁶ también se estudió el efecto de un desemulsificante GlyC₁₂ en conjunción con calentamiento térmico (baño de aceite) y calentamiento dieléctrico, (microondas).

El efecto de la adición de GlyC₁₂ (1000 ppm), en el porcentaje de agua separada después de 120 minutos de calentamiento en baño de aceite y microondas a 50 W se representaron gráficamente en comparación con los experimentos análogos sin demulsificantes y se muestran en la **Figura 10**.

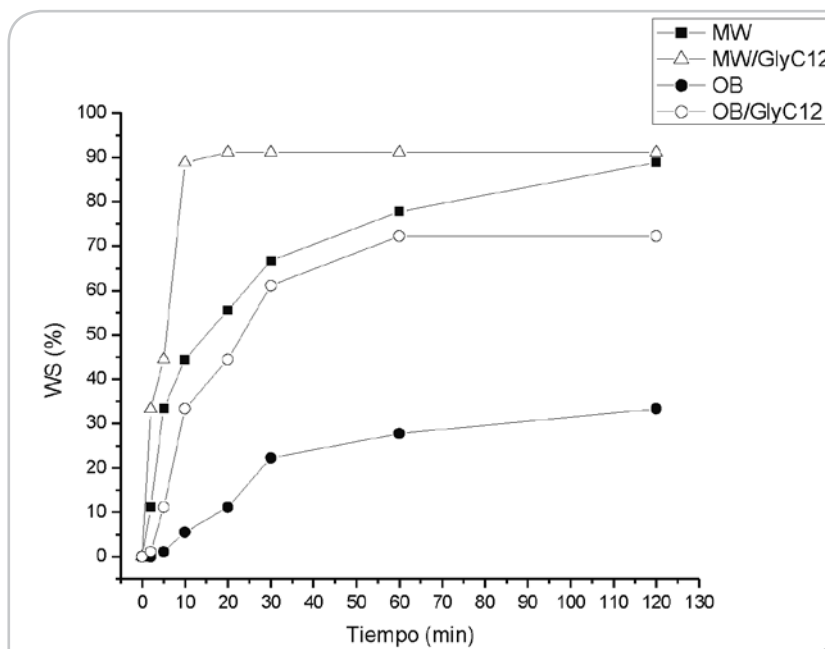


Figure 10. Porcentaje de separación de agua en la emulsión que contiene GlyC12 (1000 ppm) después de diferentes tiempos de calentamiento con OB (○) y MW (△) y OB sin desemulsificante (●) y MW sin desemulsificante (■).

Como se observa, en términos de velocidad desemulsificación, el calentamiento por microondas fue más eficaz que el calentamiento térmico convencional, ya que, en tan sólo 10 minutos alcanza el 88% de agua separada frente al 33% con baño de aceite. Sin lugar a dudas, los dos experimentos alcanzan un buen porcentaje de agua separada después de 60 minutos de calentamiento.

El efecto del desemulsificante bajo calentamiento por microondas es mínima, ya que con la emulsión que contiene GlyC₁₂ alcanza el 91% de agua separada respecto al 88% sin

desemulsificante después de 12 minutos, sin embargo, en el caso de calentamiento en baño de aceite, la adición del desemulsificante crea un impacto significativo en el proceso de desemulsificación, ya que luego de 12 minutos el porcentaje de agua separada aumentó de 33% (sin desemulsificante) a 88% (con desemulsificante).

La apariencia de la emulsión rota después de los experimentos con microondas a 50 W se presenta en la **Figura 11**.



Figura 11. Agua separada de la emulsión que contiene GlyC₁₂ (1000 ppm) a 50 W, 60 °C. Emulsión antes de la irradiación (A), emulsión después de la irradiación durante diez minutos (B), 30 minutos (C), 60 minutos (D), 120 minutos (E).

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se demuestra la factibilidad de emplear la tecnología de formación de emulsiones O/W para facilitar el transporte y garantizar el flujo de crudos pesados y extrapesados mexicanos, el cual ha sido patentado por el IMP.²⁶ De igual manera, el procedimiento para el escalamiento del biotensoactivo IMP H-4 se encuentra protegido a través de un derecho de autor.²³

Conclusiones

Se desarrolló un proceso integral para el transporte de crudos pesados a través de la formación de una emulsión O/W. Este proceso involucra la etapa de formación de la emulsión con el empleo de un tenso activo biodegradable derivado de la glucosa desarrollado en nuestro laboratorio, así como una etapa posterior de ruptura de la emulsión luego de que el crudo ha sido transportado para lo cual se emplea un desemulsificante iónico biodegradable también sintetizado en nuestro laboratorio. Esta tecnología está en fase de una prueba industrial para su validación por Pemex.

Referencias

1. Aburto, J., Cerón-Camacho, R. y Martínez-Palou, R. 2013. Manual para el Escalamiento de la Síntesis de Biotensoactivo H4 A Base de Alquilpoliglucósidos. Registro No.: 03-2012-121811020400-01 (enero 10, 2013).
2. Aburto Anell, J.A., Zapata Rendón, B., Mosqueira Mondragón, M.L.A, et al. 2011. Process of Preparing Improved Heavy and Extraheavy Crude Oil Emulsion by Use of Biosurfactants in Water and Products Thereof. US Pat. 20110139262 A1.
3. Cerón-Camacho, R., Aburto, J., Montiel, L.E., et al. 2011. Efficient Microwave-Assisted Synthesis of Ionic Esterified Amino Acids. *Molecules* **16** (10): 8733-8744. [10.3390/molecules16108733](http://dx.doi.org/10.3390/molecules16108733).
4. Cerón-Camacho, R., Aburto, J., Montiel, L.E., et al. 2013. Microwave-Assisted Organic Synthesis Versus Conventional Heating: A Comparative Study for Fisher Glycosidation of Monosaccharides. *Comptes Rendus Chimie* **16** (5): 427-432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crci.2012.12.011>.
5. Cerón-Camacho, R., Martínez-Palou, R., Chávez-Gómez, B., et al. 2013. Synergistic Effect of

Alkyl-O-Glucoside and -Cellobioside Biosurfactants as Effective Emulsifiers of Crude Oil in Water: A proposal for the Transport of Heavy Crude Oil by Pipeline. *Fuel* **110**: 310-317.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.023>.

6. De la Hoz, A., Diaz-Ortiz, A. y Moreno, A. 2005. Microwaves in Organic Synthesis. Thermal and Non-Thermal Microwave Effects. *Chem. Soc. Rev.* **34**: 164-178. <http://dx.doi.org/10.1039/B411438H>.
7. Fang, C.S., Bruce, K.L., Chang, B.K.L., et al. Microwave Demulsification. *Chem. Eng. Commun.* **73**(1):227-239. <http://dx.doi.org/10.1080/00986448808940444>.
8. Fang, C.S., Lai, D.M.C., Chang, B.K.L., et al. 1989. Oil Recovery and Waste Reduction by Microwave Radiation. *Environ. Prog.* **8** (4): 235-238. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.3300080416>.
9. Guerrero, S., Parra, L.J., Abreu, E., et al. 2004. Orimulsión. *Interciencia* **29** (4): 180-181.
10. Guzmán-Lucero, D., Flores, P., Rojo, T. et al. 2010. Ionic Liquids as Desemulsifier of Water-in-Crude Oil Emulsions: Study of Microwave Effect. *Energy&Fuels* **24** (6): 3610-3615. <http://dx.doi.org/10.1021/ef100232f>.
11. Herrero, M.A., Kreamsner, J.M. y Kappe, C.O. 2008. Nonthermal Microwave Effects Revisited: On the Importance of Internal Temperature Monitoring and Agitation in Microwave Chemistry. *J. Org. Chem.* **73** (1): 36-47. <http://dx.doi.org/10.1021/jo7022697>.
12. Hosseini, M., Stiasni, N., Barbieri, V., et al. 2007. Microwave-Assisted Asymmetric Organocatalysis: A Probe for Nonthermal Microwave Effects and the Concept of Simultaneous Cooling. *J. Org. Chem.* **72** (4): 1417-1424. <http://dx.doi.org/10.1021/jo0624187>.
13. Hudgins, R.L. y Wolf, N.O. 1989. Microwave Emulsion Treater With Oily Water Recycle for Water Load. US Appl. Pat. 4810375.
14. Kim, J.H., Lee, J.G., Choi, Y.C., et al. 2001. An Experimental Study on the Fuel Properties of Orimulsión. *Journal of the Korean Solid Waste Engineering Society* **18** (2): 172-179.
15. Martínez-Palou, R. 2006. *Química en Microondas*. Mattews, North Carolina: CEM Publishing.

16. Martínez-Palou, R., Cerón-Camacho, R., Chávez, B., et al. 2013. Demulsification of Heavy Crude Oil-in-Water Emulsions: A Comparative Study Between Microwave and Thermal Heating. *Fuel* **113**: 407-414. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.094>.
17. Martínez-Palou, R., Mosqueira, M.L., Zapata-Rendón, B., et al. 2011. Transportation of Heavy and Extra-Heavy Crude Oil by Pipelines: A Review. *J. Petr. Sci. Eng.* **75** (3-4): 274-282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>.
18. Miller, C. A. y Srivastava, R.K. 2000. The Combustion of Orimulsion and its Generation of Air Pollutants. *Prog. Energy Comb. Sci.* **26** (2): 131-160. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00014-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00014-3).
19. Mirvakili, A., Rahimpour, M.R. y Jahanmiri, A. 2012. Effect of a Cationic Surfactant as a Chemical Destabilization of Crude Oil Based Emulsions and Asphaltene Stabilized. *J. Chem. Eng. Data* **57** (6): 1689-1699. <http://dx.doi.org/10.1021/je2013268>.
20. Mutyala, S., Fairbridge, C., Paré, J.R.J., et al. 2010. Microwave Applications to Oil Sands and Petroleum: A Review. *Fuel Proc. Technol.* **91** (2): 127-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.09.009>.
21. Perreux, L. y Loupy, A. 2001. A Tentative Rationalization of Microwave Effects in Organic Synthesis According to the Reaction Medium, and Mechanistic Considerations. *Tetrahedron* **57** (45): 9199-9223. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)00905-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-4020(01)00905-X).
22. Perreux, L. y Loupy, A. 2006. Nonthermal Effects of Microwaves in Organic Synthesis. En *Microwaves in Organic Synthesis*, second edition, ed. A. Loupy, Cap. 4, 134-218. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527619559.ch4>.
23. Redman, J. 1990. Orimulsion - A New World Fuel. *Chem. Eng.-London* (472): 12-13.
24. Wolf, N.O. 1986. Demulsification, Enhanced Oil Recovery. US Appl. Pat. 4582629.
25. Xu, X.R., Yang, J.Y., Zhang, B.L., et al. 2007. Demulsification of Extra Heavy Crude Oil. *Petrol. Sci. Technol.* **25** (11): 1375-1390. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460600803694>.
26. Zhou, Y.B., Chen, L., Hu, X.M., et al. 2009. Modified Resin Coalescer for Oil-in-Water Emulsion Treatment: Effect of Operating Conditions on Oil Removal Performance. *Ind. Eng. Chem. Res.* **48** (3): 1660-1664. <http://dx.doi.org/10.1021/ie8012242>.

Semblanza de los autores

Dr. Rafael Martínez Palou

Licenciado en Química por la Universidad de La Habana. Estudió su maestría (1997-1999) y doctorado (1999-2001) en Química Orgánica en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional. Luego de realizar una estancia posdoctoral en el Instituto Mexicano del Petróleo (2001-2002), fue contratado como Investigador Científico. Sus áreas de interés son el desarrollo de productos químicos con aplicación en la Industria Petrolera y el desarrollo de metodologías no convencionales de síntesis química con el empleo de microondas, ultrasonido y Q-tube. Desde el año 2002 es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II.

Dr. Ricardo Cerón Camacho

Se graduó en 2005 de la carrera de Química en la Facultad de Química de la UNAM. Obtuvo los grados de Maestro en Ciencias Químicas (2007) y Doctor en Ciencias Químicas (2010), en el Instituto de Química de la UNAM.

En 2009 realizó una estancia de Investigación en Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Estados Unidos. A finales de 2010 ingresó al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y aquí realizó una estancia posdoctoral, actualmente sigue en el IMP como investigador.

Ha impartido cursos a nivel posgrado sobre química organometálica aplicada a síntesis orgánica y sensores químicos. Entre sus áreas de interés se encuentra la química organometálica, química orgánica y química verde.

Ha participado en proyectos de ciencia básica y aplicada a la síntesis de compuestos organometálicos con aplicaciones catalíticas y como agentes mediadores en sensores y biosensores. Ha sintetizado moléculas de base biológica con aplicaciones en el transporte de crudos pesados y extrapesados, así como en el escalamiento en la producción de compuestos químicos de interés para la industria petrolera.

Actualmente participa en un proyecto para la conversión de biomasa a bioetanol mediante pretratamientos químicos. Desde el año 2011 es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 1.

Dra. Alba Adriana Vallejo Cardona

Es Ingeniera Química Industrial por la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del IPN, (ESIQIE-IPN), obtuvo sus posgrados de maestría y doctorado en ciencias en el área de Bioquímica en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-IPN) y realizó una estancia posdoctoral en el Departamento de Química en el área de electroquímica en el CINVESTAV-IPN.

Ha colaborado en proyectos para el Instituto Mexicano del Petróleo en caracterización fisicoquímica de interfaces en sistemas micelares e identificación lipídica en bacterias termófilas. También colabora con la Universidad de Nayarit en el diseño de bio-membranas utilizadas en la bioremediación y en la caracterización enzimática por espectrometría de masas para valorar procesos de fitoremediación.

Actualmente trabaja en el laboratorio de espectrometría de masas en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del IPN. Sus áreas de interés se enfocan en estudios fisicoquímicos de interfaces heterogéneas utilizando métodos biofotónicos, y espectroscópicos. Así como en el diseño de membranas sintéticas y cápsidesliposomales.

Dr. Mario Ramírez de Santiago

Es Ingeniero Mecánico en Térmica por el Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Tamaulipas. Realizó una Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en Energética en el Instituto Politécnico Nacional de México, obtuvo el Diploma de Estudios Avanzados (DEA) en Ingeniería Mecánica en el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia, y el Doctorado en Ingeniería Mecánica en la Universidad Joseph Fourier de Grenoble, Francia. Realizó una estancia Posdoctoral en Sistemas de Emulsificación en el Laboratorio de Ingeniería Química del Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, Francia.

Laboró en el Instituto de Investigaciones Eléctricas de 1985 a 1987 y de 1991 a 1999. De 1987 a 1991 realizó una estancia de investigación (tesis de DEA y Doctorado) en el Centro de Estudios Nucleares de Grenoble perteneciente al Comisariado a la Energía Atómica de Francia. Es investigador del IMP desde 1999.

Sus investigaciones son del tipo teórico-experimental en flujo multifásico, fisicoquímica y preparación de emulsiones, combustión y aseguramiento de flujo de crudos pesados y extra-pesados. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I.

Dr. Jorge Aburto

Cursó la carrera de Química de Alimentos en la Facultad de Química de la UNAM; así como la Maestría y el Doctorado en Ciencias Químicas con Especialidad en Ciencia de los Agrorecursos en la Escuela Nacional Superior de Química del Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, Francia.

Realizó una estancia postdoctoral en el Departamento de Materiales Naturales del Instituto de Biotecnología de Tulln de la Universidad de Agricultura de Viena, Austria.

Labora en el Instituto Mexicano del Petróleo desde el año 2000, en donde actualmente es Líder de Proyectos de Investigación.

También ha impartido clases desde 2000 a niveles licenciatura y posgrado en la FQ-UNAM y en el IMP.

Ha estado trabajando en el desarrollo y aplicación de biocatalizadores, modelos cinéticos y de bioreactores en la biorefinación del petróleo, en el diseño de procesos de producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, en la evaluación de inhibidores de precipitación de asfaltenos mediante fluorescencia, en la regeneración, reuso o disposición de catalizadores gastados, así como en el transporte por ducto de crudo pesado y extrapesado mediante emulsiones inversas.

Es autor y coautor de más de diez derechos de autor, capítulos de libro, solicitudes de patente y patente concedida, más de 35 artículos en revistas nacionales e internacionales, ha graduado estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado. Actualmente es Investigador Nacional nivel II.