

A cuentagotas: Un vistazo a la distribución del tamaño de gotas y su influencia en las propiedades de emulsiones

Janett Montaña-Salazar, Rosa María Mariscal-Romero, Ana Paulina Gómora-Figueroa, Adrián Peralta-Jarquín

Departamento de Ingeniería Petrolera, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM
rosa.m.mariscal@comunidad.unam.mx

Resumen

Las emulsiones se encuentran en muchos productos de nuestra vida cotidiana, algunos ejemplos están presentes en cosméticos, detergentes, alimentos, medicamentos... También tienen aplicaciones variadas en la industria petrolera, ya que se utilizan en lodos de perforación, para la reducción de viscosidad del aceite, recuperación mejorada de aceite (Enhanced Oil Recovery, EOR, por sus siglas en inglés) y en la fabricación de fluidos para la terminación de pozos, por mencionar algunos ejemplos. Las emulsiones se definen como sistemas coloidales termodinámicamente inestables compuestos por dos fases líquidas inmiscibles entre sí, una fase es continua y otra dispersa (en forma de gotas). El tamaño, forma y distribución de dichas gotas tienen implicaciones significativas en las propiedades físicas, químicas y reológicas de las emulsiones.

La descripción de una emulsión a través de su distribución de tamaño de gota puede llegar a ser compleja, debido a que la morfología de las gotas es variable. En este sentido, la caracterización de estas últimas permite obtener un inventario estadístico de su tamaño para analizar la estabilidad y la viscosidad de las emulsiones.

La descripción de una emulsión a través de su distribución de tamaño de gota puede llegar a ser compleja, debido a que la morfología de las gotas es variable. En este sentido, la caracterización de estas últimas permite obtener un inventario estadístico de su tamaño para analizar la estabilidad y la viscosidad de las emulsiones.

En este estudio se exploran factores cruciales que determinan la formación y estabilidad de emulsiones, tales como la viscosidad,

el tipo de emulsión y las dimensiones de las gotas. Para profundizar en el análisis del tamaño de las gotas, se ha creado un programa computacional en Python nombrado ROJA_LIRFFF, el cual se apoya en las capacidades de la biblioteca skimage en el dominio de la visión artificial. ROJA_LIRFFF tiene la capacidad de analizar micrografías de emulsiones, identificando y diferenciando claramente las gotas de las impurezas o ruido ambiental. Skimage, reconocida como una biblioteca líder en el procesamiento de imágenes, proporciona herramientas robustas para la manipulación y análisis de imágenes con alta precisión. Al integrar y aprovechar sus submódulos especializados, ROJA_LIRFFF optimiza el proceso, permitiendo una cuantificación automatizada del número y tamaño de las gotas a partir de extensas micrografías, representando así un ahorro significativo en tiempo y esfuerzo. Para este trabajo, se analizaron 145 imágenes correspondientes a 18 emulsiones, donde cada imagen era de 2592 x 1944 píxeles. En total se analizaron 20 933 gotas con un promedio de 1 162 gotas por imagen, el radio de gota oscila entre los 0.00371 y 4.98485 mm con un radio promedio de 0.034433 mm. También, se obtuvieron las distribuciones de tamaño de gota. Después de caracterizar a las emulsiones y analizar los resultados, se encontró que el tamaño de gota aumenta conforme incrementa la salinidad y se observa la misma tendencia con respecto al tiempo, esto es, del día 0 y al día 7. Posteriormente, el tamaño de gota disminuye para las emulsiones con salinidad de 8 000 a 25 000 ppm, lo cual puede relacionarse con mayor estabilidad de las emulsiones con el paso del tiempo. También se observó un aumento ligero de la viscosidad (cerca de 11 cP) para los sistemas que mostraron mayor reducción de tamaño

de gota con el tiempo. Las emulsiones se mantuvieron en observación por más de 30 días, sin embargo, comenzaron a romperse desde el día 7.

Palabras clave

Emulsiones, industria petrolera, tamaño de gota, viscosidad, surfactante, inteligencia artificial, python, visión artificial

Introducción

En la actualidad, muchos campos maduros de aceite presentan problemas de producción debido a la presencia de agua. Algunas de estas problemáticas incluyen la formación de emulsiones agua en aceite (W/O), la corrosión, la generación de incrustaciones y la precipitación de sólidos orgánicos. Estos problemas pueden presentarse tanto en el sistema de producción como en líneas de descarga en superficie. A pesar de que la generación de emulsiones es un problema durante la producción de aceite, estas pueden funcionar como una alternativa para el transporte de hidrocarburos en la industria petrolera, mejorando los tiempos de producción, el manejo y el acondicionamiento de hidrocarburos, resultando en un mejor aprovechamiento de estos (Khalil de Oliveira et al., 2014; Langevin et al., 2004; Maaref & Ayatollahi, 2017; Salager, 2000; Zhou et al., 2017). Una emulsión es una mezcla homogénea que se compone de dos fases líquidas, normalmente inmiscibles, una continua (externa) y otra dispersa (o interna), en forma de gotas (Figura 1); dichas mezclas son estabilizadas por un surfactante o agente emulsificante. Las emulsiones pueden clasificarse de la forma siguiente (Fullerton Cook & W. Martin, 1953; Sanz Olmos, 2017):

- Emulsión aceite en agua (O/W): la fase externa es acuosa (agua) y la interna es oleosa (aceite).

- Emulsión agua en aceite (W/O): la fase externa es oleosa (aceite) y la interna es acuosa (agua).
- Emulsiones múltiples: son sistemas polifásicos y termodinámicamente inestables y pueden ser: agua en aceite en agua (W/O/W) o aceite en agua en aceite (O/W/O).

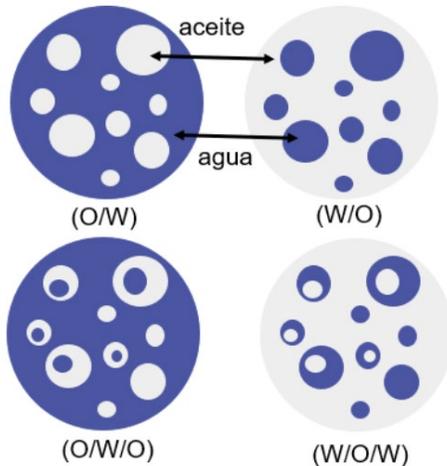


Figura 1. Clasificación de emulsiones por fases: sencillas y múltiples (elaboración propia)

Las emulsiones también se clasifican por su tamaño de gota, el cual tiene un impacto significativo en la estabilidad de la emulsión. Las emulsiones con gotas más pequeñas tienden a ser más estables y menos propensas a la coalescencia¹. La Tabla 1 muestra algunas características de las emulsiones con base en su tamaño de gota (McClements, 2011).

Tabla 1. Propiedades que presentan las emulsiones dependiendo de su tamaño de gota (McClements, 2011)

Tipo de emulsión	Radio de la gota	Estabilidad termodinámica	Área superficial (m ² /g)	Cantidad de surfactante
Emulsión (macroemulsión)	0.1–100 μm	Metaestable	0.007–70	Moderado de bajo a medio
Nanoemulsión	10–100 nm	Metaestable	70 – 330	Bajo a medio (<10 %)
Microemulsión	2–50 nm	Estable	130–1300	Moderadamente alto (>10–20 %)

¹ La coalescencia se produce cuando las gotas dispersas entran en contacto y se unen para formar gotas de mayor tamaño.

La estabilidad de una emulsión depende de factores múltiples, como los constituyentes que la conforman. Su estabilidad cinética es una consecuencia del tamaño de las gotas y la presencia de una película interfacial alrededor de estas, la cual es generada por agentes emulsificantes (o surfactantes), los cuales suprimen la floculación y la coalescencia de las emulsiones (Kokal, 2006; Ortega R., 2018). Entre las principales propiedades de las emulsiones que se estudian se encuentran la conductividad, la viscosidad, la dispersión y el tamaño de gota, entre otras. A continuación, se describen dichas propiedades:

Conductividad: Depende esencialmente de la naturaleza de la fase continua (o externa), puesto que se determinan las cargas eléctricas presentes en esta fase, mientras que la fase dispersa no tiene continuidad. La conductividad de una emulsión suele variar en función de la proporción volumétrica de la fase externa. La variación de la conductividad es proporcional al volumen de agua presente en emulsiones O/W y se considera nula para una emulsión W/O, puesto que la fase acuosa usualmente contiene electrolitos disueltos, ya que la conductividad del aceite suele ser 100 o 1000 veces menor que la conductividad del agua (también conocida como salmuera) (Salager, 2000).

Viscosidad: Depende de las interacciones a nivel molecular y de las propiedades físico-químicas de los fluidos que constituyen a la interfase agua-aceite. La viscosidad de la emulsión puede ser sustancialmente mayor que la viscosidad del aceite o del agua que forman a las emulsiones mostrando un comportamiento no-newtoniano² (Kokal, 2006; Salager, 2000).

² Un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y el esfuerzo de corte que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido ni constante.

Dispersión y tamaño de gota: La distribución del tamaño de gota de una emulsión depende de varios factores, incluyendo la tensión interfacial (TIF), la concentración de surfactante, la presencia de sólidos y las relaciones volumétricas del aceite y el agua. La **Figura 2**, muestra los diferentes tipos de distribución que se encuentran en las emulsiones: (**Figura 2.A**) unimodal, (**Figura 2.B**) tipo log normal producida por una agitación turbulenta homogénea; emulsiones con una distribución de tamaño angosta o muy polidispersa; (**Figura 2.C**) emulsiones bimodales resultantes de una mezcla de dos emulsiones, las cuales pueden formarse intencionadamente para alcanzar una baja viscosidad. La viscosidad de una emulsión es función de la forma y tamaño de gota, ya que, a medida que aumenta la polidispersidad del tamaño de gota, la viscosidad disminuye (**Figura 2.E**). Cuando se mezclan dos emulsiones con la misma fase interna, pero tamaños de gota muy diferentes, la distribución resultante presenta una distribución bimodal. Si las modas están lo suficientemente separadas se puede obtener una reducción considerable de la viscosidad (**Figura 2.F**). Lo anterior se debe a la forma en que se acomodan las gotas en el seno del fluido, esto es, las gotas más pequeñas pueden colocarse entre los intersticios de

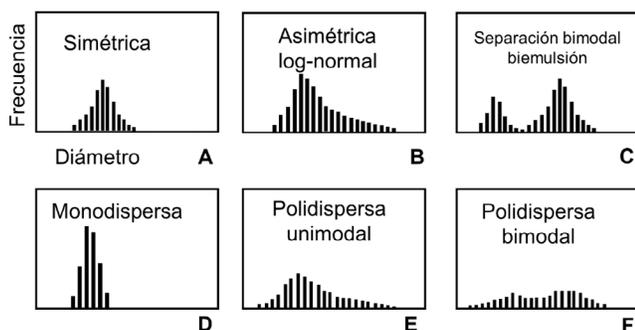


Figura 2. Distribución de diferentes formas del tamaño de gota (modificada de Ortega R., 2018)

las gotas más grandes, reduciendo así las interacciones y, por consiguiente, la viscosidad (Kokal, 2006; Ortega R., 2018).

En la industria del petróleo y el gas muchos campos de aceite se encuentran en una etapa madura y presentan problemas de producción debido a la presencia de agua; como se mencionó antes, estos problemas pueden presentarse tanto en el sistema de producción como en la superficie. Estas problemáticas también pueden presentarse en campos no convencionales, es decir, en campos productores de aceite extra-pesado³, donde la movilidad del agua es mucho mayor que la del aceite, debido a que la viscosidad de este último es significativamente mayor que la del agua, dificultando la producción del aceite. Por lo tanto, las emulsiones O/W pueden funcionar como una alternativa para el transporte de hidrocarburos en la industria petrolera, ya que el aceite se dispersa en el agua en forma de gotas produciendo una emulsión estable con viscosidad baja, mejorando la fluidez del aceite y reduciendo los tiempos de producción, manejo y acondicionamiento de hidrocarburos (Khalil de Oliveira et al., 2014; Langevin et al., 2004; Maaref & Ayatollahi, 2017; Salager, 2000; Zhou et al., 2017).

Las emulsiones de aceite se forman naturalmente cuando el aceite y la salmuera entran en contacto entre sí en presencia de un agente emulsionante o surfactante bajo algún estímulo mecánico, como la agitación. La relación agua/aceite y la presencia de surfactantes son críticas para la formación

³ Los aceites extra-pesados se caracterizan por tener una densidad relativa menor a 0.9895 ($^{\circ}\text{API} < 11.5$), su composición promedio en % mol es: $C_1 < 25$, $C_2 - C_6 < 15$ y $C_7 + > 55$, relación gas-aceite (RGA) $< 25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y su viscosidad es mayor a 25 cP a condiciones de yacimiento (Reyes Ruiz et al., 2017).

de una emulsión. Durante la producción de petróleo crudo hay varias fuentes de mezcla, a las que a menudo se hace referencia al cizallamiento, incluido el flujo a través de la roca del yacimiento, la perforación en fondo de pozo, bombas, el flujo a través de tuberías y cabezales de producción, válvulas, estranguladores, entre otros (Kokal, 2006). En la **Tabla 2** se muestran algunas aplicaciones para diferentes tipos de emulsiones de acuerdo con su tamaño de gota. (Montaño Salazar, 2021).

Tabla 2. Aplicaciones de emulsiones en la industria petrolera y otras industrias (L. Schramm, 2006; Lárez Velásquez et al., 2015; McClements, 2011)

Tipo de emulsión	Radio	Aplicaciones en la industria petrolera	Otras aplicaciones
Emulsión (macroemulsión)	0.1–100 μm	Se usan a nivel yacimiento para bloquear o desviar el control de la movilidad de los fluidos (inyección de vapor).	Pavimentación, alimentos (estabilización de lípidos).
Nanoemulsión	10 – 100 nm	Control de movilidad y alteración de la mojabilidad de la roca o medio poroso.	Alimentos, cosméticos, industria farmacéutica.
Microemulsión	2 – 50 nm	EOR, limpieza de pozos productores, limpieza de la zona productora.	Aceite metalúrgico, detergentes, textiles y papel.

El estudio de la relación de la estructura de las gotas y las propiedades de las emulsiones es crucial para entender su comportamiento y el desarrollo de sistemas más eficientes con propiedades mejoradas. Sin embargo, la evaluación de estos sistemas es bastante compleja, ya que durante la experimentación para la formación de emulsiones, la modificación de parámetros es fundamental para cubrir la mayor cantidad de variables. Lo anterior puede implicar la obtención de numerosos resultados experimentales que demandan un análisis detallado, lo que a su vez exige tiempo y una buena organización.

Para abordar esta complejidad se desarrolló la herramienta ROJA_LIRFFF, que emplea la aplicación de la inteligencia artificial con el propósito de adquirir, analizar, integrar,

modelar, visualizar e interactuar con los resultados experimentales provenientes de 145 microfotografías, correspondientes a 18 emulsiones, las cuales fueron monitoreadas durante aproximadamente 30 días. Esta metodología facilitó un análisis más profundo de los datos y su transformación, almacenamiento y procesamiento mediante el uso de la biblioteca *skimage*. Además, se implementó inteligencia artificial con el fin de diseñar y evaluar patrones que permitieran identificar tendencias significativas en los resultados obtenidos.

La IA es una técnica que permite imitar el comportamiento humano (Marr 2018). La velocidad de cómputo, la capacidad de almacenamiento, la confiabilidad y la interconectividad de las computadoras que, combinadas con los patrones de razonamiento humano, brindan a la IA la capacidad de resolver problemas complejos y de gran escala, como muchos problemas en la vida cotidiana. Hasta ahora, las tecnologías de IA se han aplicado en el reconocimiento de patrones de imágenes con éxito (Unnikrishnan et al. 2021, Morishima y Nakano 2010). Otros ámbitos en los que las IA también se utilizan ampliamente son en la fabricación, desarrollo y producción, debido a su capacidad para simular, optimizar y automatizar procesos complejos (Li et al. 2017, Arinez et al. 2020). Sin embargo, existen diferencias fundamentales en las aplicaciones de las tecnologías de IA en estos dos campos. En primer lugar, el resultado de una aplicación de tecnología de IA en la fabricación puede llevarse a cabo sin intervención humana directa y tienen por objetivo la optimización del rendimiento. Por el contrario, el resultado de una aplicación de tecnología de IA para el reconocimiento de patrones requiere la

aprobación humana y su objetivo es alcanzar un rendimiento aceptable de identificación de elementos.

Python es uno de los lenguajes de programación más utilizados en el campo de la IA, debido a su facilidad de uso y su amplia gama de bibliotecas. Python es un lenguaje de programación de código abierto que se distribuye bajo la Licencia Python de Código Abierto (Python Software Foundation License), lo cual ha contribuido a su crecimiento y popularidad, debido a que la comunidad activa ha creado una gran cantidad de bibliotecas y marcos de trabajo que complementan y amplían las capacidades de Python en diversas áreas (Anaconda Software Distribution 2020). Python destaca por su sintaxis clara y legible, ya que, al ser de código abierto, tiene una biblioteca estándar amplia con módulos y paquetes para una gama de tareas muy variada, lo que facilita el desarrollo de diversas aplicaciones.

Actualmente, existe software de procesamiento de imágenes de código abierto como ImageJ, el cual es una plataforma de análisis de imágenes y se utiliza ampliamente para el procesamiento de estas; sin embargo, presenta limitaciones para el manejo de condiciones de ruido. En este trabajo se ha explorado la aplicación de IA por medio de Python como medio de solución al procesamiento de imágenes y se hace una comparación con ImageJ. Por ejemplo, algunas ventajas que ofrece Python respecto a ImageJ son:

Python no solo se limita al procesamiento de imágenes, sino que ofrece herramientas estadísticas, de ciencia de datos e inteligencia artificial.

- Python cuenta con una gama amplia de bibliotecas para el procesamiento de imágenes, como OpenCV y scikit-image, que

brindan flexibilidad y funcionalidad para la manipulación y análisis de imágenes.

- Python permite el desarrollo eficiente de tareas complejas que requieren el uso de algoritmos específicos.

En este sentido, el reconocimiento de patrones de imágenes mediante inteligencia artificial (IA) puede auxiliar en la evaluación de la uniformidad y estabilidad de las gotas de emulsiones. La herramienta ROJA_LIRFFF permite la cuantificación y la valoración automatizada de las gotas, favoreciendo el análisis de la distribución de tamaño de estas, debido a que el conteo y medición de las gotas puede ser una actividad larga y tediosa, o bien, los programas disponibles no reconocen las gotas de forma clara por diferentes factores como la resolución de la imagen, la interferencia de otros objetos, sólidos suspendidos, una morfología distinta, entre otros. ROJA_LIRFFF aprovecha librerías libres de Python para el tratamiento de imágenes, las cuales generan una máscara sobre la cual (por medio de filtros) es posible identificar objetos más allá de la presencia de las impurezas suspendidas en la imagen, una vez identificadas las imágenes es posible cuantificar su extensión en píxeles y relacionar esta estimación con un tamaño de objeto.

Sección experimental

Preparación y caracterización de emulsiones
Se elaboraron 18 emulsiones, la relación aceite-agua empleada para preparar las emulsiones fue: 70 % aceite ($\rho=0.918$ g/mL, $\mu=72.7$ cP) y 30 % agua (salmueras), el volumen total fue de 100 mL. Las salmueras se prepararon con CaCl_2 y MgCl_2 a concentraciones desde 1000 a 25 000 ppm. El surfactante usado es de tipo aniónico ($\rho=0.923$ g/mL), la concentración de surfactante (H) osciló entre 0.5 % y 5 % v/v. Para conocer el tipo de

emulsión se utilizó la prueba de la gota, colocando agua destilada y se agregó una gota de emulsión, si esta se disuelve, se deduce que se trata de una emulsión O/W, en caso contrario, si la gota permanece suspendida en el agua, se tiene una emulsión W/O. Se monitoreó la estabilidad de las emulsiones por medio de la prueba de la botella por más de 30 días, las cuales comenzaron a separarse desde el día 7.

Los fluidos se mezclaron con un homogeneizador (IKA) a 700 rpm por 15 minutos. Al término de la agitación (día 0) se determinó la viscosidad, el tipo de emulsión y el tamaño de gota. Las emulsiones se observaron durante 7 días para determinar su estabilidad por el método de la botella. Pasado este tiempo, se obtiene nuevamente la viscosidad, tipo de emulsión y tamaño de gota con el microscopio. Una vez que se adquieren los resultados para los días 0 y 7, se determinó la distribución del tamaño de gota y se compararon los resultados de la viscosidad y el tamaño de gota. La medición de la viscosidad se realiza con el viscosímetro DVNext Brookfield, el cual se programó para realizar las mediciones a 30, 60, 120, 240 y 250 revoluciones por minuto (rpm) durante 20 segundos para cada rapidez de corte.

Para medir el tamaño de gota se coloca una alícuota de la emulsión sobre un portaobjetos y se coloca un cubreobjetos, se utilizó el microscopio OMAX para capturar micrografías de las gotas de las emulsiones elaboradas. Se tomaron micrografías con un aumento de 10x (0.25). Después, de forma paralela se obtuvo el tamaño de las gotas con la aplicación ImageJ⁴ y ROJA-LIRFFF

para realizar una comparación. A continuación, se describe el procesamiento de las imágenes con la herramienta desarrollada.

Desarrollo de herramienta ROJA_LIRFFF

Se utilizó Python 3.7 y los paquetes cv2, numpy, matplotlib, imageio, statistics, pandas, math, ipyml, skimage, random y glob (Figura 3). En conjunto, estas bibliotecas proporcionan una suite completa para el análisis avanzado de imágenes y datos. Las bibliotecas importadas en el fragmento de código mostrado en la Figura 3 tienen diferentes propósitos y funciones para el procesamiento, análisis de imágenes y datos en Python dentro del contexto de uso en ROJA_LIRFFF. Por ejemplo, %matplotlib widget permite la visualización interactiva de gráficos en Jupyter Notebooks. El comando `ii.imread` se utiliza para la carga de las imágenes; cv2 (OpenCV) para la visión por computadora y el procesamiento de imágenes. Cuando se adjunta la imagen, esta se carga como un arreglo, que en escala de grises toma valores entre 0 (negro) y 255 (blanco) por lo que se ocupa numpy para la manipulación de matrices; matplotlib.pyplot facilita la visualización de las imágenes. imageio.v3 se usa para leer y escribir los archivos de las imágenes; statistics proporciona funciones estadísticas básicas usadas en los análisis estadísticos de los píxeles y objetos en las imágenes. Pandas se aplica para el análisis y manipulación de datos estructurados que es donde se vacía la información estadística y después se escribe en un archivo de salida excel. Para medir el área de las gotas se usaron (de la biblioteca math) las funciones de `raw`, `pow` y `pi`; ipyml se usó para la integración de Matplotlib con widgets interactivos en Jupyter. Las bibliotecas skimage y sus sub-

⁴ En el siguiente enlace se puede descargar la aplicación <https://imagej.net/ij/download.html>

módulos (color, transform, util, draw, filters, measure) ofrecen diversas funciones para el procesamiento y análisis de imágenes. Por ejemplo, por medio del comando `skimage.measure.label` se aplica morfometría a la máscara de la imagen para contar el número de objetos en una imagen y con `skimage.measure.regionprops` se analiza el tamaño en píxeles de los objetos en la imagen. Finalmente, `glob` se usó para buscar archivos o directorios que coincidieran con un patrón específico, de esa manera se hacía la carga de las micrografías de las emulsiones.

```

▶ %matplotlib widget
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import imageio.v3 as iio
import statistics as st
import pandas as pd
import math as mt
import ipyml
import skimage
import skimage.color
import skimage.transform
import skimage.util
import skimage.draw
import skimage.filters
import skimage.measure
import random
import glob

[ ] def Gotas(archivo, factor):

```

Figura 3. Detalle de las paqueterías utilizadas para el desarrollo de ROJA_LIRFFF

El programa ROJA_LIRFFF está diseñado para identificar gotas en imágenes mediante una serie de módulos y filtros especializados. En la **Figura 4** se muestra un ejemplo del proceso de identificación de gotas. En la

Figura 4.A se exhibe la visualización y carga de la imagen a trabajar, en la **Figura 4.B** se observa la imagen en escala de grises y además se pasa por un filtro de suavizado gaussiano de `skimage` para reducir el ruido en la imagen, lo que ayuda a mejorar la segmentación posterior. En la **Figura 4.C** se presenta cómo queda la primera máscara de objetos identificados en la imagen y un método de umbralización (`skimage.filters.threshold`) para convertir la imagen en una imagen binaria, donde los objetos de interés están en primer plano (generalmente blanco) y el fondo está en segundo plano (generalmente negro), también se realiza una primera estadística de los objetos que conforman la imagen, que en este primer paso incluyen ruido. Posteriormente, se realiza una umbralización estadística de tamaños de objetos, además se aplica un filtro de visión artificial de `skimage` llamado `filters` para resaltar los bordes de objetos característicos y se usa la función `skimage.measure.find_contours` para detectar y extraer los contornos de los objetos en la

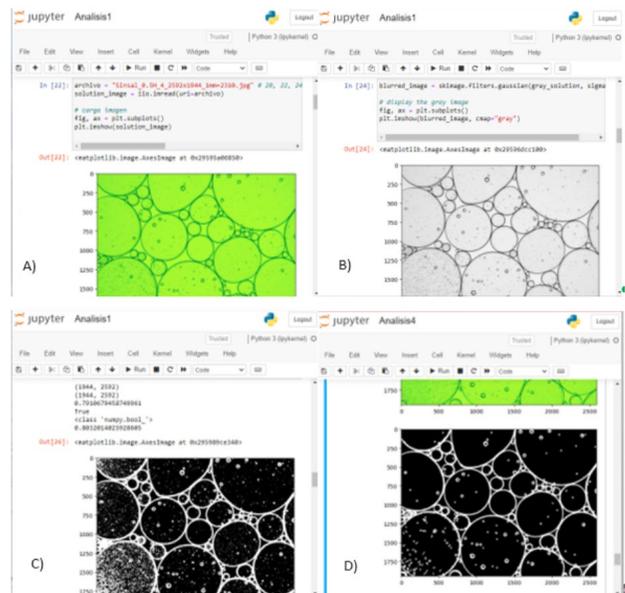


Figura 4. Aplicación de los filtros A a D para el conteo de gotas en ROJA_LIRFFF

imagen, ver **Figura 4.D**. A continuación, se enlistan los objetos (gotas) y se realiza el conteo y estadística sobre estos.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las emulsiones O/W obtenidas con salmueras $MgCl_2$ desde 1000 a 15 000 ppm y la emulsión W/O obtenida con salmuera $MgCl_2$ de 25 000 ppm y una concentración de surfactante (H) de 0.5% v/v. Las **Figuras 5 a 7 y 10** exhiben los resultados de viscosidad, tamaño y la distribución del tamaño de gota para los días 0 y 7 a salinidad variable. De forma general se observa que la viscosidad (106.40 cP) de la emulsión preparada con la salmuera de 1000 ppm no cambia significativamente con respecto al tiempo (día 7; 116.90 cP). Además, el tamaño de gota tiende a ser menor a salinidad baja (1000 ppm) y aumenta con el incremento de salinidad (25 000 ppm), ver **Figura 6**.

En la **Figura 5** se muestra la tendencia de la viscosidad con respecto al cambio de salinidad para las emulsiones preparadas con salmuera de $MgCl_2$ al día 0, la línea negra punteada muestra la viscosidad del aceite de partida (72.7 cP; 250 rpm) como punto de referencia para el resto de las

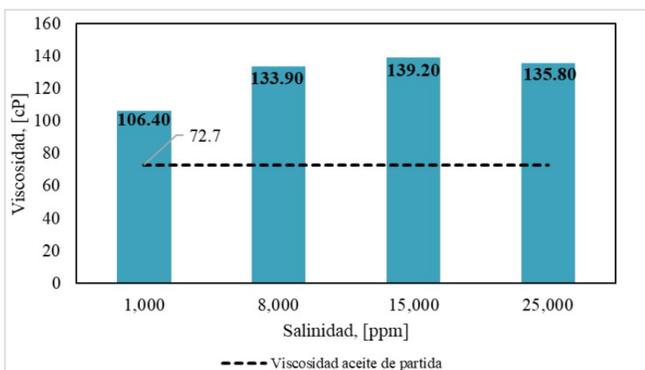


Figura 5. Emulsiones preparadas con salmuera de $MgCl_2$ al día 0, comparación entre la viscosidad a diferentes salinidades

viscosidades de las emulsiones. Se observa que la viscosidad de las emulsiones preparadas es mayor que la del aceite de partida, independientemente de la salinidad.

En la **Figura 6**, de igual forma, se muestra la tendencia de la viscosidad respecto a la salinidad de las emulsiones preparadas con salmuera de cloruro de magnesio para el día 7. Se puede observar que la viscosidad fue mayor a la del aceite de partida (72.7 cP; 250 rpm) e incluso es mayor que en el día 0, esto puede deberse a que la emulsión se volvió más estable.

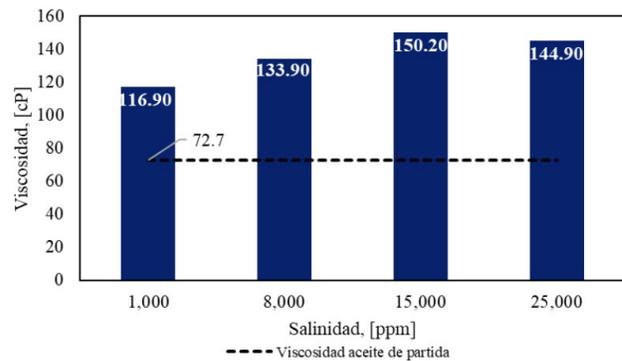


Figura 6. Emulsiones preparadas con salmuera de $MgCl_2$ al día 7, comparación entre la viscosidad y el tamaño de gota a diferentes salinidades

Todas las emulsiones resultaron ser estables al término del monitoreo (21 días y no se observó la ruptura de estas por el método de la botella.); presentando un aumento de la viscosidad con respecto al tiempo. Dicha estabilidad podría asociarse con la reducción del tamaño de gota, como se observa en la **Figura 7**, donde se muestra la tendencia que existe entre el tamaño de gota y la salinidad. Para el día 0 se observó que, al incrementar la salinidad, aumenta el tamaño de gota, también se observan los tamaños de gota más grandes (1000 ppm con 17.26 μm) a 25 000 ppm con 96.22 μm], lo cual puede asociarse a que las emulsiones no se habían estabilizado. Para el día

7 se observó que el tamaño de gota de las emulsiones disminuyó para los sistemas preparados con salmueras de 8 000 ($r=17.89$ [μm]) a 25 000 ppm ($r=39.03$ [μm]), lo cual puede asociarse con una mayor estabilidad para las emulsiones. Cabe mencionar que para la emulsión de 1000 ppm hubo un aumento de tamaño de gota del día 0 de 17.26 [μm] al día 7 con 17.89 [μm], y aunque es muy pequeño, sugiere que la estabilidad de este sistema no se ve afectada.

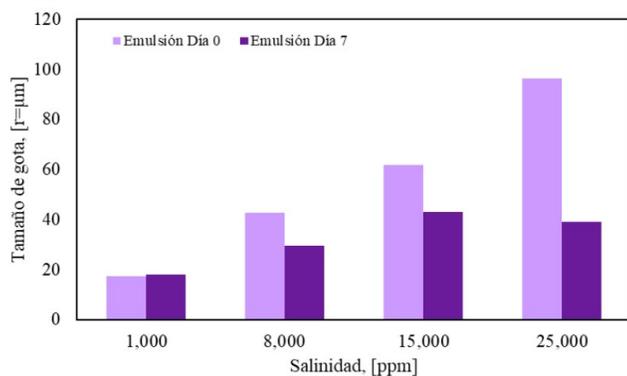


Figura 7. Tamaño de gota contra salinidad para 0 y 7 días para emulsiones elaboradas con salmueras de cloruro de magnesio (MgCl_2)

La determinación del tamaño de gota se realizó con la herramienta ROJA_LIRFFF y se utilizó el programa ImageJ, de licencia libre (utilizado en diferentes áreas como la medicina, biología y ciencia de los materiales), para comparar los resultados. A continuación, se describe con un ejemplo lo obtenido mediante ambos programas. A pesar de que ImageJ da opciones para manipular la imagen y optimizar el conteo de las gotas, el programa no reconoce muchas de las gotas, pero sí identifica espacios entre las gotas y partículas suspendidas, ver **Figura 8**. En un gran número de los casos se debe realizar la selección manual de las gotas; también, hay que remover manualmente huecos y materia suspendida. Finalmente, ImageJ arroja una tabla, con todas las “gotas” y el área de cada gota (**Tabla 3**).

Para el sistema O/W con una relación 30% agua y 70% aceite con agua destilada y una concentración de surfactante del 0.5% H, se identificaron con ImageJ 251 objetos para una sola micrografía; sin embargo, a simple vista se observa que al menos 20 gotas no fueron reconocidas y por consecuencia tampoco fueron contadas y también se puede observar que sí reconoció objetos que no son gotas y fueron contabilizados como tal, y aunque bien el programa realiza un conteo automático, este no es del todo correcto, ya que no reconoce todas las gotas y cuenta impurezas. Por lo tanto, se llevó a cabo de manera manual la depuración de las gotas y el tiempo de selección, limpieza y conteo de las gotas para esta imagen fue de 1 hora, ver **Figura 8**.

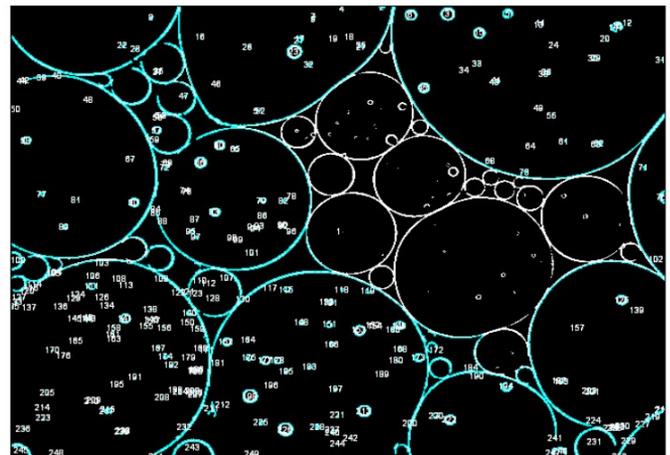


Figura 8. Máscara obtenida mediante ImageJ para el conteo de gotas. Las etiquetas con numeración representan todos los objetos identificados por ImageJ, incluyendo gotas, partículas suspendidas y espacios entre gotas. En este caso se identificaron 251 objetos

Ahora bien, empleando el programa ROJA_LIRFFF, se puede ver en la **Figura 9** que la máscara generada es mucho más limpia y se reconocen todas las gotas sin seleccionar a las impurezas. Para la misma imagen se identificaron 123 gotas. Además de que el programa desarrollado genera una imagen de mejor calidad, realiza el conteo auto-

Tabla 3. Ejemplo de tabla con datos que genera ImageJ del conteo de gotas y su tamaño

	Label	Área	Mean	StdDev	Mi n	Ma x
24 4	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	1.124E-06	255.00 0	0.000	255	255
24 5	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	1.518E-04	255.00 0	0.000	255	255
24 6	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	6.953E-05	255.00 0	0.000	255	255
24 7	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	5.922E-05	255.00 0	0.000	255	255
24 8	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	1.874E-07	255.00 0	0.000	255	255
24 9	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	7.496E-07	255.00 0	0.000	255	255
25 0	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	5.622E-07	255.00 0	0.000	255	255
25 1	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310-1.jpg	3.748E-06	255.00 0	0.000	255	255

máticamente y obtiene el tamaño y radio de las gotas. También arroja una tabla de resultados con la media, mediana, moda y desviación estándar, para las gotas en un archivo Excel, dichos resultados se pueden exportar a otro programa para manipulación posterior de los datos, ver **Tabla 4**. El tiempo de la identificación de las gotas y la obtención de la tabla con datos fue de 5 a 10 minutos. El tiempo total de tratamiento con esta herramienta nueva depende de cuántas imágenes se analizan al mismo tiempo y de la velocidad de la computadora con la que se trabaje.

ROJA_LIRFFF posee una arquitectura programática, basada en skimage, que permite una personalización y adaptación significativas en comparación con ImageJ. Esta flexibilidad inherente le brinda a ROJA_LIRFFF la capacidad de incorporar algoritmos de procesamiento de imágenes y filtros optimizados para la detección y diferenciación precisa de espacios y partículas suspendidas en emulsiones, proporcionando así una mayor precisión y eficiencia en estas tareas específicas. Sin embargo, una de las limitaciones notables de la herramienta ROJA_LIRFFF, desarrollada en Python utilizando la biblioteca skimage, es la ausencia de una función para la selección manual de datos.

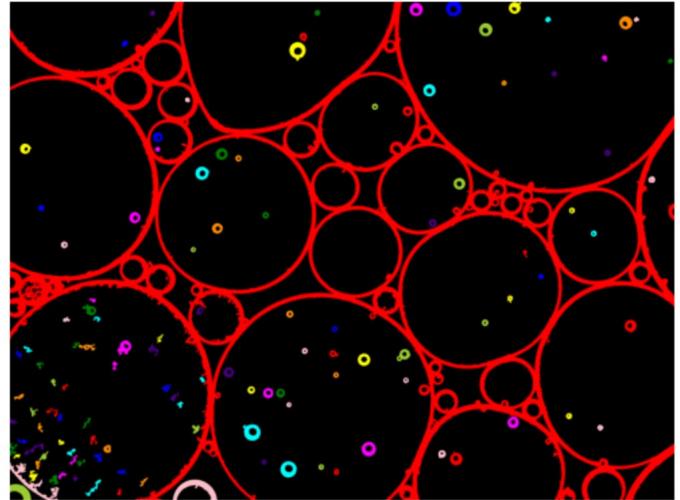


Figura 9. Máscara de ROJA_LIRFFF, donde los elementos marcados en color rojo corresponden a las gotas de interés y el resto de los colores identifican gotas de menor tamaño. El espectro de colores solo se utiliza para marcar a los objetos identificados en la imagen, sin relación con un espectro

Tabla 4. Datos de ROJA_LIRFFF del conteo de gotas y su tamaño

nombre_image n	Sinsal_0.5H_4_2592x1944_1mm=2310.jp g
got no	123
got min	0.00407226
got max	3.840338786
got mean	0.039007781
got median	0.005390617
got mode	0.004138178
got_std	46995.64851

En la **Figura 10** se presentan los histogramas obtenidos a partir de la información arrojada por ROJA_LIRFFF, la cual incluye la distribución del tamaño de las gotas para las emulsiones de 1000 y 25 000 ppm a los 0 y 7 días. Se observa que el tamaño de las gotas tiende preferentemente hacia el lado izquierdo, lo cual indica que el tamaño de gota es pequeño y que las emulsiones son estables en ese intervalo de tiempo y sin importar la salinidad, también se nota que la distribución del tamaño es asimétrica, debido a que las emulsiones se formaron por una agitación turbulenta homogénea.

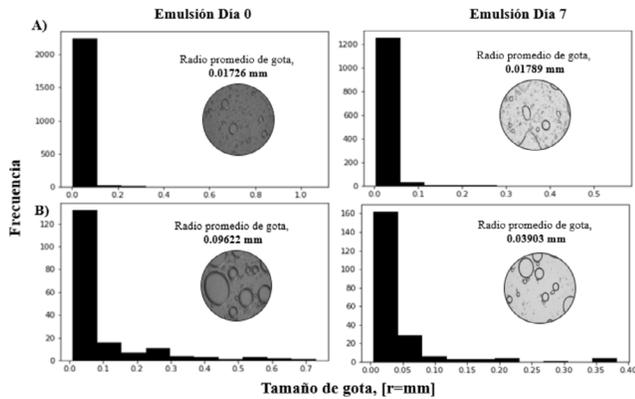


Figura 10. Distribución del tamaño de gota (respecto a su radio) de las emulsiones presentadas corresponden a con corte 70 % aceite y 30 % de agua A) 1000 ppm es una emulsión de O/W y B) 25 000 ppm es una emulsión de W/O.

Por el tamaño de gota obtenido para todas las emulsiones analizadas. Estas se clasifican como macroemulsiones, las cuales podrían servir a nivel yacimiento para bloquear, desviar o mejorar el control de la movilidad de los fluidos (inyección de vapor), pero no para transportar hidrocarburos, ya que su viscosidad es mayor a la del aceite de partida, ver **Tabla 2**. (L. Schramm, 2006; Lárez Velásquez et al., 2015, McClements, 2011). Las emulsiones preparadas con salmueras de 1000 a 15 000 ppm resultaron ser de tipo O/W y para 25 000 ppm es de tipo W/O. El tipo de emulsión no parece tener implicaciones importantes en la viscosidad de las emulsiones, ya que para 15 000 ppm presenta una viscosidad de 139.20 [cP] y para 25 000 ppm se redujo la viscosidad a 135.80 [cP]. Para el día 7, las gotas de las emulsiones preparadas con salmueras de 1000 a 15 000 ppm incrementaron. Sin embargo, para 25 000 ppm la viscosidad disminuye (144.90 [cP]) en comparación con la emulsión de 15 000 ppm. (150.20 [cP])

Conclusiones

El tamaño de gota puede relacionarse con la viscosidad y estabilidad de las emulsiones, en este caso particular se identificó

que para las emulsiones preparadas con salmuera de cloruro de magnesio y 0.5 % v/v de surfactante H el tamaño de gota está relacionado con la salinidad; es decir, con el aumento de la salinidad incrementa el tamaño de gota. En cuanto a la viscosidad, todas las emulsiones presentan un aumento de la viscosidad con el tiempo, esto podría asociarse a la reducción del tamaño de gota del día 0 al día 7 y lo que favorece la estabilidad de las emulsiones. Para el día 0 se observan los tamaños de gota más grandes (1000 ppm con 17.26 [μm] a 25 000 ppm con 96.22 [μm]), lo que indica menor estabilidad para las emulsiones recién elaboradas. Para el día 7 el tamaño de gota de las emulsiones disminuyó con el aumento de la salinidad para 8 000 ($r=17.89$ [μm]) a 25 000 ppm ($r=39.03$ [μm]), lo cual se asocia con una mayor estabilidad para las emulsiones. El cambio del tamaño de gota impactó más en la viscosidad de las emulsiones elaboradas con salmuera de 15 000 y 25 000 ppm, ya que al reducir el tamaño de gota la viscosidad incrementó 11 cP aproximadamente.

Al analizar el tamaño de gota de las emulsiones, el radio oscila entre 17.3 y 96.2 [μm], por lo que pueden clasificarse como macroemulsiones. De acuerdo con las aplicaciones descritas en la literatura, este tipo de emulsiones pueden aplicarse a nivel de yacimiento para bloquear y desviar la movilidad de fluidos. El estudio de emulsiones a nivel de laboratorio suele generar una gran cantidad de datos y su organización y análisis no es una tarea sencilla, por lo que es necesario el empleo de herramientas y programas que faciliten el tratamiento de los datos y la toma de decisiones. En este caso, la herramienta ROJA_LIRFFF desarrollada para la caracterización de las gotas y

su análisis estadístico resultó ser una opción sobresaliente para realizar el conteo y distribución del tamaño de las gotas. Una de las ventajas más notables es que no solo se requiere de menos tiempo computacional, sino que también produce resultados más precisos y limpios. Esta herramienta proporciona información estadística instantánea sobre las emulsiones analizadas, la cual puede exportarse a otros programas para un procesamiento posterior. En contraste, ImageJ puede demandar más tiempo debido a la necesidad de ajustes manuales en la selección de datos para cada imagen procesada.

Un área de mejora para la herramienta ROJA_LIRFFF radica en la optimización y eficiencia de su proceso de segmentación y análisis de imágenes. Aunque el programa ya posee una serie de módulos y filtros que facilitan la identificación de objetos, hay margen para perfeccionar la precisión y robustez de la detección, especialmente en escenarios donde existen condiciones de iluminación variables o cuando las imágenes presentan niveles elevados de ruido. Además, considerando la evolución constante de las técnicas de visión artificial y aprendizaje automático, ROJA_LIRFFF podría beneficiarse de la integración de algoritmos más avanzados y entrenados específicamente para la detección y caracterización de gotas en emulsiones, con el fin de proporcionar resultados aún más precisos y consistentes en su análisis.

Agradecimientos

R. M. Mariscal Romero reconoce el apoyo de CONAHCYT por la beca postdoctoral recibida a través del Programa de Estancias Postdoctorales por México 2022. Los auto-

res agradecen al proyecto PAPIIT IA102919 y al proyecto PAPIIT IA105621 por el financiamiento otorgado.

Referencias

- Anaconda Software Distribution. (2020). Anaconda Documentation. Anaconda Inc. Retrieved from <https://docs.anaconda.com/>
- Arinez, J. F., Chang, Q., Gao, R. X., Xu, C., & Zhang, J. (2020). Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110804. <https://doi.org/10.1115/1.4047855>
- Fullerton Cook, E., & W. Martin, E. (1953). *Farmacia Práctica de Remington*.
- ImageJ, ImageJ: Image Processing and Analysis in Java Reference, <https://imagej.net/ij/index.html>
- Khalil de Oliveira, M. C., Teixeira, A., Couto Vieira, L., & Da Fonseca Junior, R. (2014). Flow assurance challenges for long subsea pipelines. 2–11. <https://doi.org/10.13140/2.1.4090.1445>
- Kokal, S. L. (2006). Chapter 12 Crude Oil Emulsions. In *Petroleum Engineering handbook* (pp. 533–569).
- L. Schramm, L. (2006). Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications. In *Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications*. <https://doi.org/10.1002/3527606750>
- Langevin, D., Poteau, S., Hénaut, I., & Argillier, J. F. (2004). Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation. *Oil and Gas Science and Technology*, 59(5), 511–521. <https://doi.org/10.2516/ogst:2004036>
- Lárez Velásquez, C., López González, F., & Koteich Khatib, S. (2015). Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones (C. Lárez, F. López, & S. Koteich, Eds.; Issue Octubre 2015). https://www.researchgate.net/profile/Cristobal-Larez-Velasquez/publication/285356585_Nanopartículas_fundamentos_y_aplicaciones/links/5fd22371299bf188d4085adc/Nanopartículas-fundamentos-y-aplicaciones.pdf#page=167
- Li, B. H., Hou, B. C., Yu, W. T., Lu, X. B., & Yang, C. W. (2017). Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18, 86–96. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>
- Maaref, S., & Ayatollahi, S. (2017). The effect of brine salinity on water-in-oil emulsion stability through droplet size distribution analysis: A case study. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2–39. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1386569>
- Marr, B. (2018). What is artificial intelligence and how will it change our world. <https://www.bernardmarr.com/default.asp?contentID=963>
- McClements, D. J. (2011). Edible nanoemulsions: Fabrication, properties, and functional performance. *The Royal Society of Chemistry*, 7(6), 2297–2316. <https://doi.org/10.1039/c0sm00549e>

- Montaño Salazar, J. (2021). Implicaciones de los iones calcio y magnesio en las propiedades reológicas de emulsiones para transporte del hidrocarburo. [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://doi.org/10.26226/morressier.5f6c5f439b74b699bf390ad9>
- Morishima, K., & Nakano, T. (2010). Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out. *Journal of Instrumentation*, 5(04), P04011. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/04/P04011>
- Ortega R., J. D. (2018). Formulación de emulsiones de crudo con potencial aplicación como método de control de agua en pozos con problemas de conificación. Universidad Central de Venezuela.
- Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.7. Available at <http://www.python.org>
- Reyes Ruiz, M. G., León García, A., & López Bautista, G. (2017). Nueva clasificación para yacimientos de aceites pesados y extrapesados de México. 57(6), 421–436.
- Salager, J.-L. (2000). Emulsion Properties and Related Know-how to Attain Them (pp. 73–125). <https://doi.org/10.1201/b14005-4>
- Sanz Olmos, S. (2017). Emulsiones (Issue I, pp. 1–9). <https://botplusweb.portalfarma.com/documentos/2017/4/11/114468.pdf>
- Unnikrishnan, S., Donovan, J., Macpherson, R., & Tormey, D. (2021). In-process analysis of pharmaceutical emulsions using computer vision and artificial intelligence. *Chemical Engineering Research and Design*, 166, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.12.010>
- Zhou, H., Luo, Q., Gong, Q. T., Liu, Z. Y., Liu, M., Zhang, L., Zhang, L., & Zhao, S. (2017). Interfacial dilational properties of di-substituted alkyl benzene sulfonates at kerosene/water and crude oil/water interfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 520, 561–569. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.02.011>