



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de estabilidad, tamaño
y distribución de gotas para
emulsiones con surfactante y
nanopartículas**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

César Alejandro Villagómez Pérez

DIRECTORA DE TESINA

Dra. Ana Paulina Gómora Figueroa



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANÁLISIS DE ESTABILIDAD, TAMAÑO Y DISTRIBUCION DE GOTAS PARA EMULSIONES CON SURFACTANTE Y NANOPARTICULAS que presenté para obtener el título de INGENIERO PETROLERO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

CESAR ALEJANDRO VILLAGOMEZ PEREZ
Número de cuenta: 110005287

El presente trabajo fue posible gracias al financiamiento otorgado que permitió el desarrollo, aprendizaje y capacitación de los alumnos e investigadores de los siguientes proyectos.

- SENER-CONACYT 280816 “Plataforma yacimiento miniatura para estudios EOR mediante nanofluidos inteligentes en campos maduros y no convencionales de México”.
- PAPIIT IN109524 “Valoración de las interacciones entre fluidos, medios porosos y surfactantes con nanopartículas y sus implicaciones en la recuperación de hidrocarburos”.

Agradecimientos

Al equipo del Laboratorio de Interacción Roca – Fluido y Fluido – Fluido (LIRFFF) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

- Omar Luna Flores, que proporcionó la información relacionada con las emulsiones de aceite mineral.
- Adrián Peralta Jarquín, que proporcionó la información relacionada con las emulsiones de petróleo crudo.
- Abigali Hernández Medrano, con quien se realizaron mediciones y pruebas complementarias para este trabajo.

Así como al resto de compañeros que me acompañaron en el proceso de aprendizaje, Janet Montaña y Josué Almazán.

Con especial cariño y estima a la Dra. Paulina Gómora Figueroa, por su paciencia, atención y apoyo brindados durante mi estancia en la Facultad de Ingeniería y realización de este trabajo, así como ser una figura de admiración por su dedicación, trayectoria profesional y compromiso hacia los estudiantes de esta casa de estudios.

Al Dr. Samuel Tehuacanero del Instituto de Física de la UNAM, por facilitar el uso del microscopio SEM necesario para la obtención de las micrografías de nanopartículas.

Para mis hermanos Oscar y Luis, que han estado para mí siendo una guía de mi desarrollo personal desde que nací. Mis compañeros de vida a quien estimo y aprecio mucho.

A mis padres Fernando y Lilia por sus esfuerzos y sacrificios en darme lo mejor y formar un hombre de bien, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis tíos Juan Ramón y Celia, así como mis primos Mabel Anaid y Juan Manuel que también han estado siempre presentes, brindándome un espacio de confianza y de apoyo cuando lo he necesitado, siendo figuras de admiración que guardan un lugar especial en mi vida.

A mi madrina Mónica que estuviera a cargo de mis cuidados en gran parte de mi infancia, así como a la profesora Raquel quien siempre confió en mis habilidades para progresar en mis estudios profesionales.

Finalmente, a cada una de las personas que han sido parte de mi vida y contribuido en alcanzar este logro personal, pero con especial detalle a la clase trabajadora y estudiantes conscientes que han dedicado parte de su vida en la lucha por preservar una educación pública, gratuita, científica y popular como la recibida en esta casa de estudios. Que las próximas generaciones mantengan ese carácter imprescindible para el desarrollo social y mejoramiento de las condiciones de vida de nuestra clase.

«El modo de producción de la vida material condiciona el proceso de la vida social política y espiritual en general. No es la conciencia del hombre la que determina su ser sino, por el contrario, el ser social es lo que determina su conciencia.»

**– Karl Marx, Contribución a la Crítica de la
Economía Política, 1859.**

Tabla de Contenido

Lista de Figuras.....	6
Lista de Tablas	9
1 Introducción	11
1.1 Justificación	11
1.2 Objetivo general	12
1.3 Objetivos específicos	12
2 Antecedentes	13
2.1 Nanopartículas	13
2.1.1 ¿Qué es la nanotecnología?	13
2.1.2 ¿Dónde se utiliza la nanotecnología?	14
2.1.3 Clasificación de las nanopartículas	14
2.1.4 Nanopartículas de sílice (SiO ₂)	15
2.2 Emulsiones	18
2.2.1 Surfactantes	18
2.2.2 Estabilidad de una emulsión	18
2.2.3 Emulsiones en la Industria Petrolera	20
2.3 Análisis Exploratorio de Datos	20
2.3.1 Análisis Exploratorio de Datos y Estadística Aplicada	21
2.3.2 Tipos de datos	21
2.3.3 Medidas descriptivas [□]	22
2.3.4 Visualización de datos (Univariados)	23
2.3.5 Resumen Estadístico	24
3 Materiales y Métodos	26
3.1 Premisas	26
3.2 Materiales	26
3.2.1 Surfactante	26
3.2.2 Nanopartículas	27
3.2.3 Salmueras	29
3.2.4 Aceite Mineral	31

3.2.5	Petróleo Crudo.....	31
3.3	Equipos y Software	31
3.3.1	Microscopio Electrónico de Barrido de Ultra-Alta Resolución <i>JSM-7800F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope</i>	32
3.3.2	Microscopio óptico trinocular OMAX Series 40X-1000X M837L ..	33
3.3.3	Tensiómetro SITA DynoTester+	34
3.3.4	Image J	35
3.3.5	R.....	36
3.4	Metodología	37
3.4.1	Caracterización de nanopartículas de sílice (SiO ₂)	38
3.4.2	Suspensión en salmueras	39
3.4.3	Efectos en la tensión superficial e interfacial	40
3.4.4	Preparación de Emulsiones.....	42
3.4.5	Diámetro de gotas de emulsión.....	44
4	Resultados	46
4.1	Caracterización de nanopartículas	46
4.2	Suspensión en salmueras	49
4.3	Efectos en la Tensión Superficial e Interfacial	51
4.4	Diámetro del tamaño de gotas de emulsión	54
4.4.1	Emulsiones con aceite mineral	54
4.4.2	Emulsiones con petróleo crudo	62
4.5	Planteamiento de Aplicación en Recuperación Mejorada (EOR)	66
5	Conclusiones	69
	Anexos	71
	Bibliografía.....	86

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso de desestabilización de una emulsión. Recuperada de: https://www.pharmacy180.com/article/stability-2814/	19
Figura 2. Salmueras utilizadas en los experimentos. Imagen tomada en el Laboratorio de Interacción Roca-Fluido y Fluido-Fluido, FI, UNAM.	31
Figura 3. Diagrama de flujo de los equipos utilizados. Diseño propio.	32
Figura 4. SEM JSM-7800F Schottky Field Emission del Instituto de Física, UNAM. Recuperada de: http://laboratorios.fisica.unam.mx/technology?id=12	32
Figura 5. Componentes de un SEM, destaca un detector de rayos X "EDS" (de dispersión de energía). Recuperada de: https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido	33
Figura 6. Microscopio Óptico Trinocular OMAX Series 40X-1000X M837L. Foto derecha tomada en el Laboratorio de Interacción Roca-Fluido y Fluido-Fluido, UNAM.....	34
Figura 7. Tensiómetro SITA DynoTester+. Imagen derecha tomada en el Laboratorio de Interacción Roca-Fluido y Fluido-Fluido, UNAM. Imagen izquierda recuperada de: https://www.sita-lab.com/products/sita-tensiometer/sita-dynotester/	34
Figura 8. Menú de inicio del software Image J. Captura de pantalla.	36
Figura 9. Interfaz gráfica de R Studio. Captura de pantalla.....	36
Figura 10. Secuencia del proceso o método experimental llevado a cabo. Diseño propio.	37
Figura 11. Micrografías de nanopartículas obtenidas por el microscopio electrónico de barrido SEM JSM-7800F.....	38
Figura 12. Medición del diámetro de las nanopartículas con Image J. Captura de pantalla.....	39
Figura 13. Diseño experimental para evaluar el tiempo de suspensión de nanopartículas. Esquema propio.....	40
Figura 14. Esquema del principio de la burbuja para la estimación de la tensión superficial dinámica en fluidos. Adaptada de SITA Lab Solution Inc.....	42
Figura 15. Medición del tamaño de gotas de emulsión con Image J. Izquierda – emulsión de aceite mineral. Derecha – emulsión con petróleo crudo, al tiempo de 0 días. Captura de pantalla.	45
Figura 16. Micrografías reportadas por el fabricante de las nanopartículas de sílice, A y C tipos 1 y 2 respectivamente. Micrografías B y D tipos 1 y 2 respectivamente, obtenidas por el microscopio SEM JSM-7800F.....	46
Figura 17. Distribución del tamaño de nanopartículas tipo I. Gráficas generadas con R.....	47
Figura 18. Distribución del tamaño de nanopartículas tipo II. Gráficas generadas con R.....	48

Figura 19. Comparación de la distribución del tamaño para ambos tipos de nanopartículas. Gráficas generadas con R.	48
Figura 20. Grupos de nanofluidos para observar aquellos en los que las nanopartículas se mantienen suspendidas por mayor tiempo. Salinidad [ppm]: 1 = 0, 2 = 1,738, 3 = 19,427 y 4 = 37,117. Fotografías tomadas en el LIRFFF al minuto 0.	49
Figura 21. Comparación de nanofluidos. 60 – 120 [min] aproximadamente. Fotografía tomada en el LIRFFF.	50
Figura 22. Comparación de nanofluidos. 120 – 180 [min] aproximadamente. Fotografía tomada en el LIRFFF.	50
Figura 23. Comparación de nanofluidos. Más de 20 horas aproximadamente. Fotografía tomada en el LIRFFF.	51
Figura 24. Tensión superficial medida a 50 [ms]. Gráfico generado en Excel.	52
Figura 25. Comparación de tensión superficial a 50 [ms]. Gráfico generado en Excel.	52
Figura 26. Tensión interfacial calculada, medición a 50 [ms]. Gráfico generado en Excel.	53
Figura 27. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 15,000 [ppm], diferentes iones. Gráficas generadas con R.	55
Figura 28. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 15,000 [ppm], diferentes iones. Gráficas generadas con R.	56
Figura 29. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50:50 y 70:30, 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.	57
Figura 30. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50:50 y 70:30, 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.	58
Figura 31. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 50:50, salinidad de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.	59
Figura 32. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 50:50, salinidad de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.	60
Figura 33. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, salinidad de 15,000 [ppm] con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.	61
Figura 34. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, salinidad de 15,000 [ppm] con y sin nanopartículas. Gráficas generadas con R.	62
Figura 35. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50:50 y 70:30, salinidad de 37,117.34 [ppm]. Gráficas generadas con R.	63
Figura 36. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50-50-,1 y 70:30, salinidad de 37,117.34 [ppm]. Gráficas generadas con R.	64

Figura 37. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 50:50 con y sin nanopartículas añadidas, salinidades de 1,738.61, 10,583.29, 19,427.97, 28,272.66 y 37,117.34 [ppm]. Graficas generadas con R.	65
Figura 38. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 50:50 con y sin nanopartículas añadidas, salinidades desde 1,738.61 (M1) hasta 37,117.34 [ppm] (M2). Graficas generadas con R.	66
Figura 39. Tensión superficial medida a 30 [ms]. Gráfico generado en Excel.	72
Figura 40. Variación porcentual de la tensión superficial debido al exceso de nanopartículas. Gráfico generado en Excel.....	72
Figura 41. Comparación de tensión superficial a 30 [ms]. Gráfico generado en Excel.	73
Figura 42. Tensión interfacial calculada, medición a 30 [ms]. Gráfico generado en Excel.	73

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de las nanopartículas de SiO ₂ comercializadas por el fabricante.....	17
Tabla 2. Técnicas de análisis exploratorio en función del tipo de datos.	23
Tabla 3. Técnicas más utilizadas para el análisis exploratorio de datos. □	24
Tabla 4. Parámetros que componen un resumen estadístico para datos univariados. □	25
Tabla 5. Características del surfactante utilizado para la preparación de emulsiones. □	27
Tabla 6. Comparación técnica de las nanopartículas utilizadas. Especificaciones del proveedor Skysprings Nanomaterials Inc.	29
Tabla 7. Salmueras utilizadas para emulsiones con aceite mineral (región azul). 30	
Tabla 8. Salmueras utilizadas para emulsiones con aceite crudo. La tabla presenta las distintas mezclas de agua, total cinco muestras usadas.	30
Tabla 9. Propiedades físicas del aceite mineral.....	31
Tabla 10. Propiedades físicas del petróleo crudo.	31
Tabla 11. Ficha técnica del dispositivo SITA DynoTester +. □	35
Tabla 12. Clasificación de los fluidos para la evaluación de la tensión superficial e interfacial.	41
Tabla 13. Condiciones físicas para medir los efectos en la tensión superficial e interfacial. Temperatura empleada, 25 °C.	42
Tabla 14. Clasificación de las emulsiones preparadas con aceite mineral. En azul las que se prepararon con distintos tipos de iones (ver Tabla 7). Surfactante de NFE 1%.	43
Tabla 15. Clasificación de las emulsiones preparadas con petróleo crudo. Surfactante de NFE 1%.	44
Tabla 16. Clasificación de las muestras para evaluación de la suspensión de nanopartículas.	71
Tabla 17. Composición química de las muestras de fluidos.	71
Tabla 18. Cálculo de la tensión interfacial mediante la correlación de Antonov....	74
Tabla 19. Resumen estadístico del tamaño de nanopartículas.....	75
Tabla 20. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral, salinidad de 15,000 ppm y corte 30:70.	75
Tabla 21. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral, salinidad de 35,000 ppm, cortes 30:70, 50:50, y 70:30 con y sin nanopartículas tipo I.	76
Tabla 22. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral de corte 50:50, con y sin nanopartículas de tipo I. Salinidades de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 ppm.	76

Tabla 23. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral de corte 30:70 y salinidad de 15,000 ppm a 0, 7 y 30 días.....	77
Tabla 24. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de petróleo crudo con salinidad de 37,117.34 ppm (100M2) y corte de agua de 30:70, 50:50 y 70:30.	78
Tabla 25. Resumen estadístico de tamaño de gota para emulsiones de petróleo crudo, corte 50:50 y diferente salinidad.....	79

1 Introducción

1.1 Justificación

La gestión de datos es una serie de prácticas que permiten recopilar, organizar, proteger y almacenar datos para analizar, desarrollar y ejecutar diferentes procedimientos y arquitecturas dentro de una organización, como por ejemplo un laboratorio experimental.

La organización de datos garantiza que estos sean precisos y coherentes, que las personas tengan fácil acceso para utilizarlos, y además, se puedan proteger de forma adecuada. La gestión de datos también elimina los duplicados, los estandariza y funciona como base para el análisis de estos.

En la actualidad, el mundo se mueve a base de datos, analizándolos, desarrollándolos e inclusive vendiéndolos.^[1]

En ese sentido es sumamente importante ordenar los resultados obtenidos de los diferentes experimentos en un proyecto de investigación en el laboratorio, ya que permite realizar un análisis general, evaluando los cambios en las propiedades y variables de interés para el cumplimiento de los objetivos sobre lo que se esté estudiando, para que al final, puedan tomarse decisiones considerando los hallazgos, tendencias, patrones entre otra información relevante que conduzca a posibles implementaciones tecnológicas para la industria.

En este trabajo se realiza la recopilación, el ordenamiento y análisis de datos de fluidos (con nanopartículas y surfactante) y emulsiones que se formaron bajo distintas condiciones experimentales. El trabajo se realiza en dos partes que describen el proceso experimental. La primera corresponde a la caracterización de nanopartículas de sílice (SiO_2), su efecto en los cambios de la tensión superficial y el tiempo que permanecen suspendidas cuando son combinadas con salmueras. La segunda parte corresponde a la evaluación de la estabilidad de las emulsiones preparadas con diversas combinaciones de los fluidos salmuera + surfactante + nanopartículas, siendo el tamaño de las gotas de emulsión el parámetro a considerar. En la sección de Materiales y Métodos, se describen los procedimientos, metodologías aplicadas y herramientas analíticas usadas como R, la cual funciona como instrumento estadístico descriptivo para el procesamiento de la información y la identificación de cambios significativos cuando se combinan nanopartículas con surfactante en la formación de emulsiones bajo distintos criterios; además, se proponen alternativas a emplear cuando algunos métodos no son de utilidad para una adecuada interpretación.

En los trabajos previamente reportados por nuestro grupo de trabajo, se han analizado los cambios de propiedades relevantes como la viscosidad o la mojabilidad que se complementan para el estudio e interpretación más robusta sobre la interacción roca-fluido y fluido-fluido de salmueras, hidrocarburos y rocas, lo que permitiría responder a otras preguntas, algunos de estos se citan más adelante.

1.2 Objetivo general

Organizar y analizar algunos resultados obtenidos sobre emulsiones y nanofluidos en el proyecto de investigación *“Plataforma yacimiento en miniatura para estudios de EOR mediante nanofluidos inteligentes en campos maduros y no convencionales en México”* para conocer si hubo cambios significativos y/o efectos combinados en la estabilidad de dichas emulsiones.

1.3 Objetivos específicos

- I. Caracterizar las nanopartículas para validar la información proporcionada por el fabricante mediante el análisis exploratorio de datos.
- II. Organizar y analizar los resultados experimentales de emulsiones preparadas con y sin nanopartículas de sílice (SiO_2).
- III. Identificar patrones en el cambio de las propiedades físicas como la tensión superficial e interfacial con la suspensión de nanopartículas en salmueras.
- IV. Generar gráficos y un resumen estadístico utilizando R y Excel, y discutir sobre los límites, así como los alcances del método.

2 Antecedentes

2.1 Nanopartículas

Los antecedentes de este trabajo constan de una breve explicación, primero sobre las nanopartículas y las emulsiones, cuyos conceptos son clave para entender la sección experimental, además de la relación que existe entre éstas y cómo se aplican en la industria petrolera para la recuperación mejorada de hidrocarburos; seguido se explicará en qué consiste el análisis exploratorio de datos y cómo se utiliza para la interpretación de los resultados experimentales.

Para comprender mejor el concepto de nanopartículas, es necesario definir conceptos básicos relacionados con las propiedades físicas y químicas de la materia, así como de los procesos asociados al manejo de ésta, por lo que se plantean algunas preguntas al respecto.

2.1.1 ¿Qué es la nanotecnología?

La nanotecnología se define como *el estudio, diseño, creación y manipulación de materiales a un nivel molecular. Esta nueva tecnología permite la creación de materiales de tamaños que oscilan entre 1 y 100 nanómetros (1 nanómetro es 1 mil millonésimas parte de un metro).*^[2] Estas estructuras son conocidas como nanomateriales, los cuales son productos principales de la nanotecnología.

Las propiedades de los nanomateriales no siempre se conocen con precisión, ya que el comportamiento de las sustancias no es igual cuando se manipulan a nivel nano que macroscópico; por esta razón es importante evaluar los posibles riesgos que se deriven tanto del proceso de fabricación o síntesis como de la exposición y manipulación de estos materiales.^[3]

A continuación, se mencionan algunas propiedades de las nanopartículas de interés en su caracterización.

Propiedades Físicas:

- Distribución de tamaño y proporcionalidad (ancho x alto)
- Adherencia
- Rugosidad de la superficie
- Estructura geométrica
- Solubilidad

Propiedades Químicas

- Estructura molecular
- Composición, pureza y aditivos
- Estado (sólido, líquido o gas)
- Fisicoquímica de superficie (interacción en la interfase de fluidos)
- Lipofílicas o Hidrofílicas

2.1.2 ¿Dónde se utiliza la nanotecnología?

Recientemente, la nanotecnología se ha implementado para fines de investigación que permitan mejorar los procesos industriales. En este caso, la importancia de su aplicación y estudio para la industria petrolera, en parte consiste en la alteración de las propiedades fisicoquímicas del petróleo, lo cual ha sido implementado a gran escala, facilitando de este modo el flujo de fluidos en medios porosos y ductos, permitiendo la recuperación de un mayor volumen de hidrocarburos desde el subsuelo hasta la superficie o la reducción de costos asociados a su transporte. Otras aplicaciones de la nanotecnología y los nanomateriales se encuentran en diversas áreas como el sector salud, la electrónica, informática, cosméticos, la industria textil, protección al medio ambiente, entre otras, lo que despierta cada vez más el interés por su estudio.^[4]

2.1.3 Clasificación de las nanopartículas

De acuerdo con su composición química, Khan, S. *et al.* (2022)^[5] proponen la siguiente clasificación de las nanopartículas:

Metálicas: las nanopartículas de metal puro son unas de las más utilizadas desde hace tiempo por los científicos con aplicaciones principalmente en el sector biomédico, ya que funcionan como vehículo de diferentes sustancias. Las más comunes son de oro, plata, cobre, hierro, cadmio, plomo, cobalto y platino.

Semiconductoras: tienen la capacidad de conducir electricidad entre los conductores y los aislantes. Tienen amplio uso en la industria para producir circuitos integrados, tecnología láser, sensores biológicos, entre otros. Principalmente se componen de: sulfuro de zinc, óxido de zinc, sulfuro de cadmio, seleniuro de cadmio, telurio de cadmio, nitruro de galio, fosfuro de galio, fosfuro de indio y arseniuro de galio y arseniuro de indio.

Carbonos: por su composición atómica, el carbono tiene la capacidad de formar múltiples alótropos que presenten distintas estructuras. Esto permite utilizar nanoestructuras basadas en el carbono; tales como el diamante, grafeno, fullereno, nanotubos de carbón, entre otras.

Cerámicas: se componen principalmente de sólidos inorgánicos como óxidos, fosfatos, carbonatos y carburos. Presentan características de porosidad que permiten brindar protección a la degradación física y son populares gracias a la resistencia a temperaturas elevadas debido a sus propiedades mecánicas. ^[1]

Lipídicas: según sea su base lipídica se pueden clasificar en lipoproteínas, liposomas, nanopartículas de lípidos sólidos, entre otras. Tienen la capacidad de transportar moléculas hidrófobas, hidrófilas y anfifílicas. Estas nanopartículas tienen gran atención en el ámbito médico y representan una de las formas más avanzadas de sustancias nano-portadoras debido a su amplia aplicación y formulación de tratamientos para enfermedades como el cáncer.

Polímeros: se refiere a estructuras coloidales que comprenden componentes activos atrapados dentro o en la superficie de un núcleo de polímeros con la capacidad de transportarlos debido a su biocompatibilidad. Presentan formas de nano-cápsulas o nano-esferas.

2.1.4 Nanopartículas de sílice (SiO₂)

El óxido de silicio o sílice es una molécula que se encuentra en abundancia en la naturaleza, como constituyente principal de distintos minerales, además, por sus propiedades químicas, tiene usos y aplicaciones muy diversas. El interés de los investigadores por trabajar con nanopartículas de sílice se debe a que presentan características únicas de calidad, tamaños, formas y distribución, además de su simplicidad, estabilidad, baja toxicidad y la capacidad de interactuar con una amplia variedad de polímeros y moléculas, además de ser un material de bajo costo.^[6] Por lo tanto, el dióxido de silicio ha sido considerado como una buena opción para utilizarse en la investigación y preparación de emulsiones aceite-agua en la industria petrolera.

Algunas características de las nanopartículas y la manera en cómo interactúan con el medio podrán variar en función del método y técnica utilizada para su síntesis, las

^[1] Las nanopartículas de sílice que se utilizaron, pertenecen a esta categoría y se seleccionaron pensando en una posible aplicación para condiciones de presión y temperatura en los yacimientos de hidrocarburos.

propiedades que pueden sufrir cambios dependiendo el método de síntesis empleado son el tamaño y la forma, lo que de alguna manera repercute en los mecanismos de acción según sean los fines para los cuales se utilicen estos materiales. Por ejemplo, aquellas que se desee emplear para el transporte de otras moléculas, ya sea por encapsulamiento o adsorción.

Los usos que tienen las diferentes presentaciones de nanopartículas de sílice son muy diversos y dependen de objetivos muy específicos, abarcando áreas que van desde aplicaciones médicas, materiales compuestos y magnéticos, pinturas, cosméticos y procesos de catálisis entre otros. Por esa razón, es importante considerar el proceso de síntesis que se siguió a la hora de seleccionar un producto de nanopartículas, ya que podrían tener formas o tamaños no deseados para los fines que se persiguen en la industria petrolera.^[7]

Para los experimentos presentados en este trabajo se utilizaron dos tipos de nanopartículas, que denominaremos de tipo I (no porosa) y de tipo II (dispersable), ambas suministradas por el fabricante Sky Springs Nanomaterials, Inc.

En la **Tabla 1** se muestra una lista publicada por el proveedor donde se comparan y visualizan algunas diferencias técnicas que existen entre sus productos de sílice, se resaltan en rojo las seleccionadas para este trabajo, detallando sus diferencias en el apartado **3.2.2**.

Tabla 1. Características de las nanopartículas de SiO₂ comercializadas por el fabricante.

Nanopartículas de óxido de silicio Nanopolvos de óxido de silicio						
Clave	Pureza [%]	APS ^[III] [nm]	Tratamiento de superficie	Área superficial específica [m ² /g]	Carácter superficial	Dispersabilidad primaria
6807NM	99.5	10-20	Ninguno	180-600	Hidrofílica	Agua
6808NM	99.5	10-20	Ninguno	140-180	Hidrofílica	Agua
6809NM	98.7	10-20	Ninguno	140-180	Hidrofílica	Agua
6811DL	99	10-20	Tratada con SCA *	140-180	Variable	Solventes orgánicos
6851HN	99.8	10-20	Modificada con grupo amino	90-130	Oleofílica	Solventes (Tolueno, alcohol)
6852HN	99.8	10-20	Modificada con grupo epoxy	90-130	Oleofílica	Solventes orgánicos
6853HN	99.8	10-20	Modificada con doble enlace	90-130	Oleofílica	Solventes orgánicos
6861HN	99.8	10-20	Modificada con doble capa	90-130	Hidrofóbica y oleofílica	Solventes orgánicos
6862HN	99.8	10-20	Modificada con una capa de cadena orgánica	90-130	Súper hidrofóbica y oleofílica	Solventes orgánicos
6863HN	99.8	5-15	Modificada con una capa de cadena orgánica	140-180	Hidrofóbica y oleofílica	Solventes orgánicos
6864HN	99.8	10-20	Modificada con grupo amino	90-130	Super hidrofóbica	Solventes orgánicos
SCA* ^[III]	Silane Coupling Agents					

^[III] APS (Average Particle Size), por sus siglas en inglés, es el rango del tamaño promedio de nanopartículas reportadas por el proveedor en sus productos.

^[III] SCA (Silane Coupling Agents): son componentes cuyas moléculas contienen grupos funcionales que une tanto materiales orgánicos como inorgánicos.

2.2 Emulsiones

Una emulsión es una mezcla coloidal, la cual es la combinación de dos o más sustancias de diferente composición; se considera que es homogénea cuando no es posible distinguir diferencias entre sus componentes, mientras que una mezcla es heterogénea cuando sí es posible distinguir sus componentes a simple vista. De este modo, se define que los coloides constituyen una forma particular de las mezclas heterogéneas que están en proceso de separación de sus componentes en fases. En otras palabras, se podría decir que *un coloide es una dispersión de partículas de una sustancia (la fase dispersa) entre un medio dispersor, formado por otra sustancia*.^[8]

Cuando un coloide está constituido por dos líquidos, donde uno funge como medio de dispersión y el otro como fase dispersa, recibe el nombre de emulsión, la cual siempre se presentará como un líquido. Es importante mencionar que el comportamiento físico de la emulsión resultante generalmente es más complejo de evaluar en comparación con los constituyentes que conforman dicha emulsión. A este tipo de fluidos complejos (y dado sus propiedades reológicas), se les conoce como no newtonianos.

2.2.1 Surfactantes

Una cualidad o característica de las emulsiones es que los líquidos involucrados son inmiscibles entre sí, por lo que requieren de una sustancia “vehículo” que ayude a mantener la mezcla estable por un periodo de tiempo mayor al que se tendría si se tratara de combinarlos por sí solos. Estas sustancias químicas son reductoras de la tensión interfacial y reciben el nombre de surfactantes o tensoactivos, se caracterizan por poseer una sección molecular hidrofílica (polar) y otra lipofílica (no polar). No obstante, estos surfactantes tienden a ser inestables a condiciones extremas de presión y temperatura como las de un yacimiento de petróleo.^[9]

Los surfactantes se clasifican en aniónicos, no iónicos, anfóteros y catiónicos dependiendo la composición y características moleculares. Para las emulsiones que se analizan en este trabajo, se utilizó un surfactante no iónico de nonil fenol etoxilado (NFE).

2.2.2 Estabilidad de una emulsión

Algunos reportes mencionan que es posible formar emulsiones únicamente con partículas sólidas, dichas emulsiones se denominan tipo “Pickering”, en alusión a

Percival Spencer Umfreville Pickering, quien se dio cuenta que, al agregar partículas sólidas en la mezcla de agua y aceite, se evitaba la coalescencia de las gotas del aceite, volviendo más estable la emulsión; pues las nanopartículas realizarían una función similar a la del surfactante.^[10]

Adicionalmente, se ha visto que el empleo de nanopartículas y surfactante producen un efecto combinado en la reducción de la tensión interfacial, de tal forma que la emulsión presenta una estabilidad mayor, así como otros cambios en sus propiedades físicas que resultan de interés para su estudio a profundidad. Esto se debe a que las nanopartículas se adsorben en la interfase aceite-agua, resultando en mayor estabilidad bajo condiciones adversas de presión y temperatura, así como cambios en la mojabilidad de su superficie. No obstante, es importante realizar pruebas en laboratorio para identificar aquellas que reaccionen de mejor forma con el medio, ya que podrían provocar un efecto indeseable como la obstrucción de los poros en yacimiento.^[11]

Una emulsión se considera estable mientras prevalecen sus propiedades físicas, tales como: olor, color, sabor, apariencia, opacidad o viscosidad, entre otras hasta que se rompe siguiendo el proceso de floculación, batimiento, coalescencia y rompimiento, **Figura 1**.^[12] Este proceso se analiza más adelante considerando el tamaño de gota de las emulsiones.

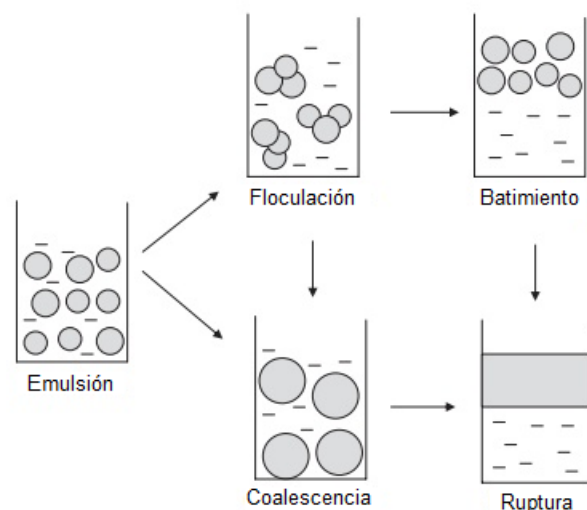


Figura 1. Proceso de desestabilización de una emulsión.
Recuperada de: <https://www.pharmacy180.com/article/stability-2814/>

2.2.3 Emulsiones en la Industria Petrolera

Se pueden formar distintos tipos de emulsiones, donde la fase continua es el agua y la dispersa el aceite (W/O), viceversa (O/W) y múltiples (W/O/W) o (O/W/O). El resultado de éstas dependerá de múltiples factores, como el tipo de cargas que tengan las moléculas del surfactante empleado y la salinidad o minerales presentes en el agua.

Las emulsiones han sido objeto de estudio en la industria petrolera por las implicaciones que tienen en la reducción de la viscosidad y tensión superficial e interfacial del fluido, lo cual impacta en el transporte de hidrocarburos por el medio poroso y ductos facilitando su recuperación; además, puede ser una oportunidad para reducir el consumo energético asociado a dicha actividad.

Es importante mencionar que al estudiar estos sistemas en el laboratorio pueden surgir una gran cantidad de resultados, a veces diferentes entre sí y aparentemente sin una correlación o patrón específico de comportamiento; esto se debe a las múltiples variables involucradas al momento de buscar realizar pruebas en laboratorio.

Montaño-Salazar (2021)^[13] señala que entre las ventajas que tiene el uso de emulsiones para el transporte de hidrocarburos, se encuentran la escasa formación de residuos orgánicos indeseables y la capacidad de soportar altos niveles de salinidad. No obstante, algunas desventajas asociadas son el alto costo del surfactante, la reacción química con el medio y tipo de hidrocarburo, así como su estabilidad, por lo que es importante hacer una correcta selección del surfactante.

2.3 Análisis Exploratorio de Datos

Una vez concluida la fase experimental, es importante almacenar los datos (resultados) obtenidos en una –base de datos– donde preferentemente estos se encuentren debidamente etiquetados y ordenados, lo cual facilitará su tratamiento y análisis que conduzcan al correcto planteamiento de estrategias y toma de decisiones, reduciendo además el margen de error. En el tratamiento de los datos para identificar patrones o relaciones, generalmente se utilizan herramientas analíticas que mejor se ajusten al significado conceptual de la información que almacena cada dato y el uso de herramientas informáticas que faciliten el proceso, esto con base en supuestos teóricos que dan sustento a las tecnologías de la información y la ciencia de datos. Se pueden emplear distintos modelos matemáticos; no obstante, para efectos de este trabajo, se limitó al estudio

estadístico y la visualización de los datos univariados de forma general (histogramas, ojiva, diagramas de caja y curvas de distribución).^[14]

2.3.1 Análisis Exploratorio de Datos y Estadística Aplicada

El análisis exploratorio de datos (*EDA por sus siglas en inglés*) y la estadística aplicada son prácticas que forman parte del paraguas de la Ciencia de Datos; en ambos casos las herramientas matemáticas que se utilizan son las mismas, con la diferencia en el enfoque. El EDA busca relaciones entre los datos considerando atributos y formas múltiples de representar dichas relaciones, de tal forma que puedan visualizarse hallazgos, patrones o tendencias sin que necesariamente sean determinantes sobre la ocurrencia de un fenómeno. Por otro lado, con la estadística aplicada se busca comparar el objeto de estudio con otro de control para identificar cambios que permitan conocer la probabilidad de que ocurra o no un evento y de este modo probar una hipótesis, por lo que el análisis se realiza de forma puntual y con atributos más específicos, ya que generalmente se desea comprobar si algo es determinante o no sobre el objeto de estudio.^[15]

En ambos casos es de gran importancia contar con una base de datos correctamente estructurada, distinguiendo grupos y subgrupos, entre otras categorías en las que se clasifique la información antes de proceder al cálculo de las variables relevantes que componen el resumen estadístico, útil en ambos procedimientos.

Generalmente, el análisis exploratorio es requerido en tareas de carácter financiero, operativo o de desempeño en una organización mediante la formulación de indicadores; mientras que la estadística descriptiva e inferencial es más utilizada en actividades de investigación científica con objetos de estudio y control.^[16]

2.3.2 Tipos de datos

“El dato puede ser visto como la unidad más pequeña de información fáctica, que puede ser empleado para el cálculo, el razonamiento, la discusión, la inferencia, la deducción, y su presentación o visualización.” ^[17]

No existe una única forma de clasificar los datos, ya que ésta depende del uso que se dará a los mismos, así como del campo de estudio que se trate, pues la información disponible puede utilizarse de para un sinnúmero de fines. Para efectos de simplicidad, sólo se detalla una clasificación básica que va acorde al objetivo de

este trabajo. Los datos son los valores que se obtienen para cada una de las variables del objeto de estudio, y estos se dividen en:

a) Categóricos o cualitativos^[18]

Son datos mutuamente excluyentes que designan atributos o categorías, los cuales pueden representarse por variables alfanuméricas o cadenas de texto que correspondan a determinados grupos. Estos a su vez se subdividen en:

- Nominales: Son aquellos que no representan una clasificación intrínseca o de jerarquía, por ejemplo: región, código postal, religión o el género de una persona.
- Ordinales: Son aquellos que representan una clasificación intrínseca con cierto orden de relevancia, por ejemplo: escalas de satisfacción, puntuaciones de una evaluación o escalas que indican cierto orden de valores.

b) Numéricos o cuantitativos^[19]

Son datos que resultan de mediciones aleatorias representadas por números de una misma magnitud, con los cuales se pueden realizar operaciones aritméticas para fines estadísticos. Estos se subdividen en:

- Discretos: Se caracterizan por tener un número limitado de valores en el dominio de los enteros ($\mathbb{Z}$) que se pueden contar y enumerar de una población. La probabilidad de que dos valores sean iguales puede ser distinta de cero.
- Continuos: Se caracterizan por adquirir una cantidad infinita de valores de una población en el dominio de los reales ($\mathbb{R}$), los cuales son medidos mediante instrumentos específicos. La probabilidad de que dos valores sean iguales es cero.

2.3.3 Medidas descriptivas^[20]

Las medidas descriptivas permiten resumir la información de un conjunto de datos y se calculan a partir de estos. Cuando los datos provienen de una población reciben el nombre de “estadístico”, pero si provienen de una muestra, se les conocerá como “parámetro”.

a) Tendencia Central: Son los valores hacia los cuales el conjunto de datos tiende a agruparse, incluyen a la media aritmética, la mediana y la moda.

b) Dispersión: Son valores que indican la variación de los datos entre sí, tomando como referencia el promedio aritmético. Si todos los datos fueran iguales, la dispersión sería cero. Incluye el rango, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

c) Posición: Son valores que dividen en dos o más partes al conjunto de datos ordenados, permitiendo identificar su ubicación. Incluyen a los cuartiles, deciles y percentiles.

d) Forma: Permite identificar la forma geométrica de una curva de frecuencias. Cuando la distribución de los datos genera una forma completamente simétrica, adquiere el nombre de distribución normal; no obstante, ésta es ideal y generalmente habrá siempre un grado de asimetría. Estas medidas incluyen al coeficiente de asimetría, la curtosis y el rango intercuartílico.

De acuerdo con el sitio de IBM, se sugieren algunas técnicas específicas para el análisis de datos dependiendo de la naturaleza de estos, tal como se define en la **Tabla 2.**^[21]

Tabla 2. Técnicas de análisis exploratorio en función del tipo de datos.

Tipos de datos	Técnicas de análisis sugeridas
Categoricos	Descripciones estadísticas
Univariados (continuos)	Gráficos de línea, histogramas
Bivariados (continuos)	Gráficos de dispersión 2D
Arreglos 2D	Mapas de calor
Multivariados	Dispersión 3D o 2D con 3 variables de distinto color, forma o tamaño
Grupos múltiples	Boxplots lado a lado

2.3.4 Visualización de datos (Univariados)

Se identifican patrones y relaciones entre los datos de forma rápida. Además, se pueden presentar resultados o posibles hallazgos con la información que se está analizando. Existen múltiples representaciones gráficas, unas más convenientes que otras dependiendo si se tratan de datos univariados, bivariados o multivariados.^[22] En este trabajo se trata con datos univariados, por lo que las formas de representación gráfica más adecuadas son:

a) Histograma: Es un gráfico de barras que representa la frecuencia o proporción de los datos agrupados en subgrupos (categóricos) o clases (numéricos). Este tipo de gráfico puede incluir curvas de distribución, tendencia central, dispersión y datos atípicos.

b) Ojiva: Es una curva de distribución acumulada que proporciona la probabilidad de que una observación sea menor o igual a un valor $f(x)$ particular. Resulta útil para la estimación de percentiles en una distribución.

c) Boxplot: Con este gráfico es posible representar medidas de tendencia central, la asimetría y datos atípicos, incluyendo el rango intercuartílico. A diferencia del histograma y por su forma compacta, resulta de utilidad al comparar datos de otros grupos en un mismo panel de visualización.

También existen otras técnicas de visualización dependiendo el objetivo del análisis, ver **Tabla 3**.

Tabla 3. Técnicas más utilizadas para el análisis exploratorio de datos. [23]

Técnicas de visualización	Objetivo
Histogramas	Adquirir una idea de la distribución de una variable
Histogramas, dispersión y <i>boxplot</i>	Encontrar datos atípicos
Dispersión 2D, curvas de ajuste, covarianza.	Cuantificar la relación entre 2 variables (una dependiente y un solo resultado)
Mapas de calor	Visualizar la relación entre 2 variables (dos dependientes y varios resultados)
Dispersión 2D y 3D	Datos de alta dimensión

2.3.5 Resumen Estadístico

El resumen estadístico es el punto de partida para la visualización gráfica posterior, así como para el cálculo de las funciones de probabilidad que permitan aceptar o rechazar una hipótesis o bien identificar la relación existente de distintas propiedades.

El resumen estadístico se compone de las siguientes variables, **Tabla 4**.

Tabla 4. Parámetros que componen un resumen estadístico para datos univariados. [24]

Estadísticos descriptivos	Símbolo	Definición
Número de mediciones	n	Total de los datos
Medición máxima	$n_{\text{máx}}$	Valor máximo absoluto de los datos
Medición mínima	$n_{\text{mín}}$	Valor mínimo absoluto de los datos
Rango o recorrido	Rango	$Rango = n_{\text{máx}} - n_{\text{mín}}$
Media aritmética	$\bar{x}$	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Mediana	$\tilde{x}$	Si n es impar: $\tilde{x} = x_{\frac{(n+1)}{2}}$ Si n es par: $\tilde{x} = \frac{x_{(n/2)} + x_{((n/2)+1)}}{2}$
Moda	$\hat{x}$	Valor más frecuente en un conjunto de datos.
Rango intercuartil	IQR	$IQR = Q_3 - Q_1$
Desviación estándar	σ	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$
Coeficiente de variación	CV	$CV = \frac{\sigma}{ \bar{x} }$
Varianza	Var	$Var = \sigma^2$
Simetría	sk	$sk = \frac{1}{\sigma^3} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \right)$
Curtosis	k	$k = \frac{1}{\sigma^4} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \right)$
Error estándar	$\sigma_{\bar{x}}$	$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$

3 Materiales y Métodos

Es importante describir los diferentes procedimientos que se siguieron para identificar la naturaleza de los datos previo a su análisis, así como posibles errores relacionados durante el proceso experimental que influyen en las mediciones, los cuales deben considerarse para tomar alguna decisión con base en la evaluación de resultados.

En este apartado se describirán las premisas, los materiales, equipos y software utilizados, y la metodología del proyecto.

3.1 Premisas

Este trabajo considera el análisis de 56 emulsiones de aceite mineral (26) y petróleo crudo (30), en todos los casos se utilizó surfactante para su preparación y en algunos casos también se emplearon nanopartículas como agentes estabilizantes. Las condiciones a las que se realizaron los experimentos corresponden a la presión de la Ciudad de México y a temperatura ambiente (20 – 25 °C). Debido a la cantidad de experimentos y observaciones realizadas, solamente se contemplan aquellas premisas más significativas para su análisis; por practicidad, las tablas de resultados se localizan el **Anexo II**, al final del documento.

3.2 Materiales

Los materiales utilizados para la preparación de las emulsiones que se describen a continuación e incluyen; surfactante, nanopartículas de óxido de silicio, salmueras de distinta composición, aceite mineral y petróleo crudo.

3.2.1 Surfactante

El surfactante que se utilizó para la preparación de emulsiones es un surfactante no iónico conocido como nonilfenol etoxilado (NFE). Los nonilfenoles son compuestos orgánicos utilizados principalmente para la fabricación de productos de limpieza así como en otros procesos industriales, ver **Tabla 5**. [25, 26]

Tabla 5. Características del surfactante utilizado para la preparación de emulsiones. [27]

Surfactante no iónico	
Marca comercial	Droguería Cosmopolita S.A. de C.V.
Presentación	500 [mL]
Propiedades Físicas y Químicas	
Sustancia	Nonilfenol Etoxilado (NFE)
Composición Química	C ₁₅ H ₂₄ O
Punto de ebullición	295 [°C]
Punto de fusión	2 [°C]
Densidad	0.945 [$\frac{g}{cm^3}$]
Solubilidad	Ligeramente soluble en agua
Factores de Riesgo	
Nocivo en caso de ingestión, puede provocar quemaduras y riesgo a la fertilidad. Altamente tóxico para organismos acuáticos y efectos nocivos a largo plazo en caso de contaminación del agua, es bioacumulativo.	

De acuerdo con algunos investigadores citados en la tesis de Montaño–Salazar (2021), los surfactantes no iónicos se prefieren en la preparación de emulsiones con petróleo y agua, dado que soportan altos niveles de salinidad, son menos costosos y fáciles de separar, no forman residuos orgánicos que afecten las propiedades del petróleo y tampoco se disocian en el agua, ya que poseen una cabeza polar e hidrófila sin carga. [28]

3.2.2 Nanopartículas

Los dos tipos de nanopartículas de óxido de sílice (SiO₂) que se seleccionaron para la preparación de emulsiones, se diferencian por las formas que presentan en su superficie; esto permite evaluar y comparar su comportamiento en suspensión, así como los efectos que tienen una vez integradas a una mezcla coloidal.

Para la presente investigación, la selección de las nanopartículas de sílice se basó en un diseño experimental comparativo, cuyo objetivo era aislar y evaluar el efecto de la química superficial de las partículas en la estabilidad de las emulsiones. Para ello, se escogieron dos tipos de nanopartículas del proveedor SkySprings Nanomaterials Inc. que, si bien comparten características base como el material (SiO₂) y el tamaño de partícula promedio (APS de 10-20 nm), presentan una diferencia fundamental en el tratamiento de su superficie.

a) Nanopartícula de referencia (Tipo I – 6808NM): Se seleccionó la nanopartícula no porosa (6808NM) como el sistema base o de control. De acuerdo con las especificaciones del proveedor, esta partícula no posee ninguna modificación superficial. Su superficie, compuesta por grupos silanol (Si-OH), le

confiere un carácter inherentemente hidrofílico, lo que la hace dispersable en agua. Su elección fue estratégica para estudiar el comportamiento fundamental de una partícula de sílice "pura" en la interfase aceite-agua, donde se esperaba que muestre una afinidad preferencial por la fase acuosa.

b) Nanopartícula modificada (Tipo II – 6851HN): Como contraparte, se eligió la nanopartícula 6851HN. La especificación clave de este producto es que su superficie ha sido funcionalizada con grupos amino ($-NH_2$). Este tratamiento químico invierte su afinidad, transformándola en una partícula oleofílica (con afinidad por el aceite) y dispersable en solventes orgánicos como el tolueno.

La elección de este par específico (6808NM y 6851HN) permitió establecer una comparación directa y controlada. Al mantener constantes el material del núcleo y el tamaño, la única variable significativa en juego era la mojabilidad de la superficie de la nanopartícula (hidrofílica vs. oleofílica). Esta dicotomía es central para el estudio de emulsiones tipo Pickering, ya que la afinidad de las partículas por la fase oleosa o acuosa determina su posicionamiento en la interfase y, en consecuencia, la estabilidad y tipo de emulsión formada. El objetivo era, por tanto, evaluar si esta modificación superficial controlada generaba un efecto significativo en la estabilidad de emulsiones relevantes para aplicaciones en la industria petrolera. [29, 30]

En la **Tabla 6** se presentan las características de las nanopartículas utilizadas contrastando la información obtenida de la ficha técnica que proporciona el fabricante para tipo I y tipo II.

Tabla 6. Comparación técnica de las nanopartículas utilizadas. Especificaciones del proveedor Skysprings Nanomaterials Inc.

Nanopartículas	Tipo I	Tipo II
Proveedor	Skysprings Nanomaterials Inc.	
Nombre comercial	Nanopartículas de óxido de silicio / Nanopolvo (SiO ₂ , 99,5%, 10-20 nm, no poroso)	Nanopartículas de óxido de silicio / Nanopolvo modificado con grupo amino
Producto #	6808NM	6851HN
Superficie	No Porosa	Modificada (Dispersable)
Fórmula	SiO ₂	SiO ₂
Pureza [%]	99.5	99.8
APS* [nm]	20	10-20
SSA** [m ² /g]	160	90-130
Morfología	Esférica	Modificada con grupo amino
ρ bulk	0.08-0.10	0.15
Impurezas comunes [%]	Al $\leq$ 0.002	C < 0.5wt
	Fe $\leq$ 0.001	Fe < 0.05
	Ca $\leq$ 0.002	Ca < 0.1
	Mg $\leq$ 0.001	Ti < 0.05
	Cl $\leq$ 0.001	Na < 0.05
APS*	Average Particle Size	
SSA**	Specific Surface Area	

3.2.3 Salmueras

Las salmueras con las cuales se prepararon las emulsiones analizadas en este trabajo se dividen en dos grupos; las empleadas en emulsiones con aceite mineral y aquellas usadas para las emulsiones con petróleo crudo. En la **Tabla 7** se muestran las salmueras que corresponden al primer grupo de emulsiones elaboradas con aceite mineral.

Tabla 7. Salmueras utilizadas para emulsiones con aceite mineral (región azul).

Tipo de iones ^[IV]	Concentración en $\left[\frac{mg}{L}\right]$ o $[ppm]$			
	1,000	8,000	15,000	35,000
Magnesio (Mg^{2+})				
Calcio (Ca^{2+})				
Sodio (Na^{+})				
Agua de mar (sintética)				

Para las emulsiones preparadas con petróleo crudo, se utilizaron salmueras con una concentración de sales minerales diversa, agrupándose de menor a mayor salinidad. Las salmueras M1 y M2 provienen de campo, los valores intermedios son producto de mezclas entre estas dos salmueras, la composición se conoce gracias al análisis *Stiff-Davis*, ver **Tabla 8** y **Figura 2**.

Tabla 8. Salmueras utilizadas para emulsiones con aceite crudo. La tabla presenta las distintas mezclas de agua, total cinco muestras usadas.

Salmuera	M1	M1 + M2			M2
Proporción	100	75 25	50 50	25 75	100
Iones	Concentración en $\left[\frac{mg}{L}\right]$ o $[ppm]$				
Calcio	104.64	627.84	1,151.05	1,674.25	2,197.45
Magnesio	73.04	197.7	322.355	447.0125	571.67
Sodio	349	2,773.42	5,197.84	7,622.25	10,046.67
Potasio	13.93	126.055	238.18	350.31	462.43
Bario	1	5	9	13	17
Estroncio	11.28	18.865	26.45	34.04	41.62
Cloruro	542.68	6,254.14	11,965.6	17,677.06	23,388.52
Bicarbonato	95	168.23	241.46	314.69	387.92
Sulfato	548.04	412.05	276.05	140.06	4.06
Salinidad	1,738.61	10,583.29	19,427.97	28,272.66	37,117.34

^[IV] Las salmueras con iones de magnesio y agua de mar sintética, fueron las principales para este grupo de emulsiones. La salmuera de cloruro de calcio o sodio a 15,000 $[ppm]$ se utilizó para identificar cambios provocados por el tipo de iones.

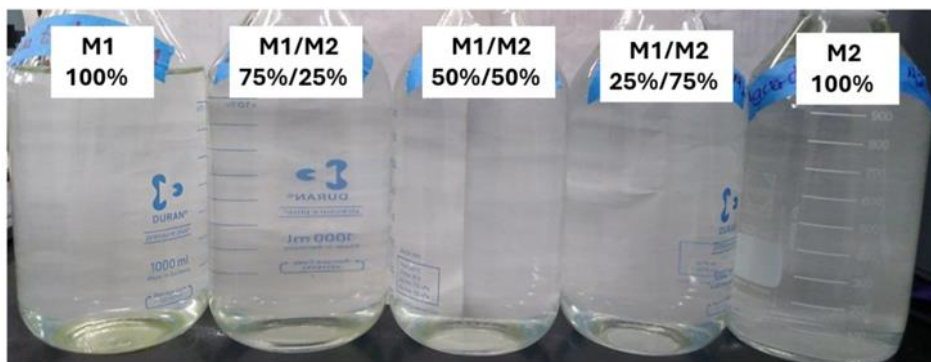


Figura 2. Salmueras utilizadas en los experimentos. Imagen tomada en el Laboratorio de Interacción Roca-Fluido y Fluido-Fluido, FI, UNAM.

3.2.4 Aceite Mineral

El aceite mineral es un subproducto que se obtiene de la destilación del petróleo crudo, compuesto generalmente por alcanos y parafinas, es transparente. Debido a su estabilidad y baja reactividad con otras sustancias, es apropiado para la preparación de emulsiones y otros experimentos que sirvan como modelo comparativo. Las propiedades del aceite mineral utilizado se especifican, a continuación, en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Propiedades físicas del aceite mineral.

Material	Densidad $\left[\frac{g}{mL}\right]$	Densidad $[\text{°API}]$	Viscosidad $[cP]@ 25$ $[\text{°C}]$ y $120 [rpm]$	Tipo
Aceite Mineral	0.839	37.15	55	Ligero

3.2.5 Petróleo Crudo

El petróleo crudo se utilizó para preparar un segundo grupo de emulsiones. Las características de este petróleo se describen en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Propiedades físicas del petróleo crudo.

Material	Densidad $\left[\frac{g}{mL}\right]$	Densidad $[\text{°API}]$	Viscosidad $[cP]@ 25$ $[\text{°C}]$ y $10 [rpm]$	Tipo
Petróleo Crudo	0.98	10.1	31,140	Extrapesado

3.3 Equipos y Software

En esta sección se detallan cada uno de los equipos y herramientas que se utilizaron para la medición y recopilación de los datos, mismos que se suman con otros preexistentes de la misma familia de experimentos realizados por otros compañeros

de laboratorio. ^[31] Entre los equipos que se utilizaron se encuentran: microscopios, tensionómetro superficial y herramientas de cómputo auxiliares, ver **Figura 3**.

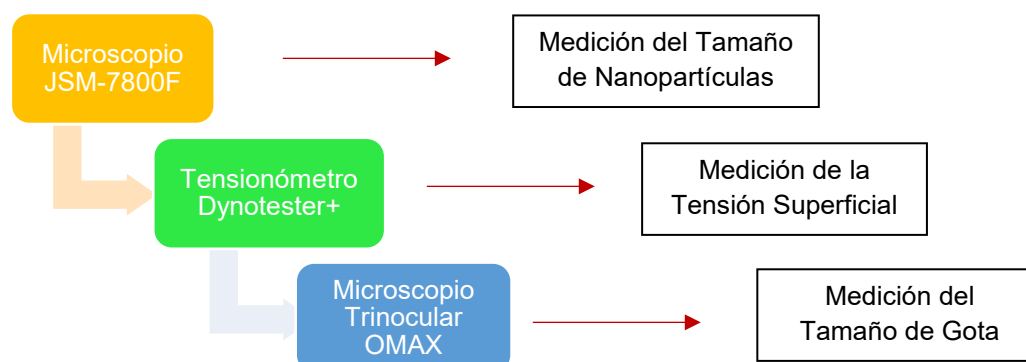


Figura 3. Diagrama de flujo de los equipos utilizados. Diseño propio.

3.3.1 Microscopio Electrónico de Barrido de Ultra-Alta Resolución *JSM-7800F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope*

El microscopio electrónico de barrido permite construir imágenes con aumento de hasta 1,000,000X. Esto significa que es posible visualizar estructuras a escala nanométrica de los materiales o incluso menos. ^[32] En el Instituto de Física de la UNAM se cuenta con el SEM JSM-7800F (*por sus siglas en inglés*), el cual fue utilizado para la obtención de las micrográficas necesarias para la caracterización de las nanopartículas, ver **Figura 4**.

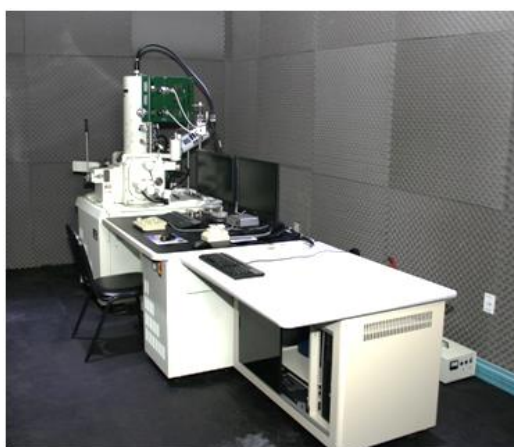


Figura 4. SEM JSM-7800F Schottky Field Emission del Instituto de Física, UNAM. Recuperada de: <http://laboratorios.fisica.unam.mx/technology?id=12>

El funcionamiento de este tipo de microscopio se debe a las interacciones electrón-materia que, a diferencia de los microscopios ópticos, emite un haz de electrones que barre la superficie de la muestra a analizar. Estos microscopios requieren de

una cantidad de energía importante, pues deben formar un campo eléctrico que permita generar el haz de electrones, los cuales interactuarán con los átomos de la muestra para formar la imagen, ver **Figura 5**.^[33]

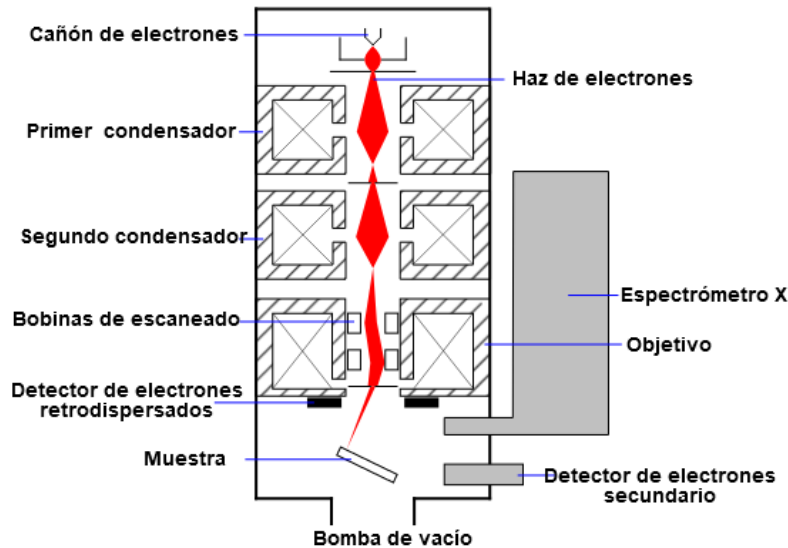


Figura 5. Componentes de un SEM, destaca un detector de rayos X "EDS" (de dispersión de energía). Recuperada de: https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido.

3.3.2 Microscopio óptico trinocular OMAX Series 40X-1000X M837L

Se utiliza como un microscopio binocular y por medio del tercer ocular se conecta una cámara digital que captura imágenes para visualizarlas en una computadora. Este microscopio viene equipado con 4 objetivos correspondientes a las escalas de magnitud (4X, 10X, 40X y 100X), así como un foco LED atenuador de intensidad con el cual es posible resaltar los detalles de la imagen según las necesidades del observador. El sistema mecánico de estos microscopios se conforma por una base de soporte, un brazo que guía el sistema óptico y los tubos que conectan los tres oculares, además de un mecanismo para el ajuste de la platina que contiene la muestra y un revólver que cambia el objetivo de visualización. Con este microscopio se obtienen imágenes de alta calidad en unidades de micrómetros [μm], ver la **Figura 6**.^[34]

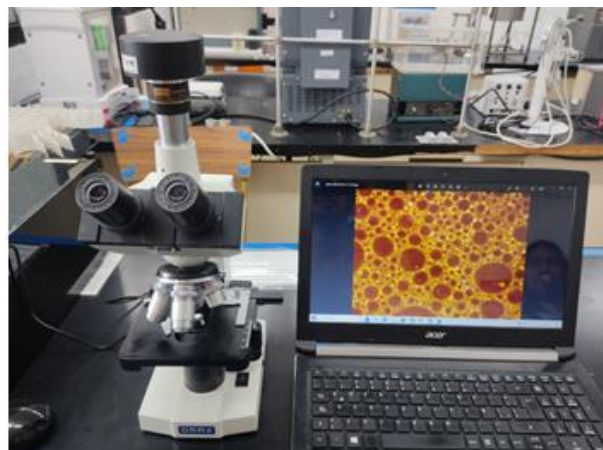


Figura 6. Microscopio Óptico Trinocular OMAX Series 40X-1000X M837L. Foto derecha tomada en el Laboratorio de Interacción Roca-Fluido y Fluido-Fluido, UNAM.

El microscopio óptico funciona a partir de la captación y direccionamiento de luz, así como de las propiedades de los materiales de los cuales están fabricados los lentes y que permiten disipar, converger o divergir un haz luminoso cuando éste los atraviesa, produciendo así el efecto de una imagen aumentada.

3.3.3 Tensiómetro SITA DynoTester+

Este modelo se caracteriza por su fácil manejo y transporte, cuenta con una batería que ofrece una autonomía de aproximadamente 10 horas, muestra los resultados de las mediciones al momento y permite seleccionar entre varios perfiles de medición. Los resultados se muestran en mili-newton por metro $\left[\frac{mN}{m}\right]$. Utiliza el principio de presión de burbuja para medir la tensión superficial dinámica (este método se explicará de forma más amplia en el apartado de metodología), el cual consta de un capilar por el que viaja la burbuja previo a interactuar con el fluido, ver la **Figura 7** y **Tabla 11**. [35]



Figura 7. Tensiómetro SITA DynoTester+. Imagen derecha tomada en el Laboratorio de Interacción Roca-Fluido y Fluido-Fluido, UNAM. Imagen izquierda recuperada de: <https://www.sita-lab.com/products/sita-tensiometer/sita-dynotester/>

Tabla 11. Ficha técnica del dispositivo SITA DynoTester +. ^[VI]

Tensión Superficial	
Rango de medición	10 – 100 $\left[\frac{mN}{m}\right]$
Resolución	0.1 $\left[\frac{mN}{m}\right]$
Vida de la burbuja	
Rango ajustable	15 – 20,000 [ms]
Resolución	1 [ms]
Desviación máxima	5 %
Viscosidad máxima	2,000 [mPas]
Medición de Temperatura	
Rango	0 – 100 [°C]
Resolución	0.1 [K]
Concentración	
Unidades del rango de medición	Definido por el usuario
Fuente de alimentación	
Alimentación por USB	100 – 240 [V] / 5 [V]
Batería de ion Li	3.6 [V] / 1,950 [mAh], min. 10 [h] operación
Máximo consumo de potencia	2.5 [W]
Interfaz, almacenamiento, dimensiones, peso	
USB – Interfaz	Transferencia de datos
Pantalla	LCD, iluminada
Perfiles de medición	25
Almacenamiento	25 espacios de memoria por perfil
Dimensiones (WxHxD)	75x168x35 [mm]
Peso	260 [g]

3.3.4 Image J

Image J es un software de acceso abierto desarrollado por el *National Institute of Health (NIH)*, utilizado para el procesamiento de imágenes, el cual permite mostrar, editar, analizar, guardar e imprimir imágenes; diseñado principalmente para el estudio de muestras biológicas en laboratorio, **Figura 8**. Entre las herramientas con las que cuenta este software para el tratamiento de las imágenes generadas por microscopio, está la herramienta para determinar el diámetro de las nanopartículas y gotas de emulsión. Además, permite exportar la base de datos en formato “.csv” para ser utilizada posteriormente. Image J cuenta con algunas funciones adicionales de estadística descriptiva. El funcionamiento de este software se basa en la transformación geométrica de las escalas del objeto en la imagen y depende de su resolución en píxeles para ser convertidas a submúltiplos del metro que sean representativos o aproximados al tamaño real. ^[36]

^[VI] La ficha técnica ha sido traducida al español y puede consultarse original en el sitio web del fabricante (referencia 30).

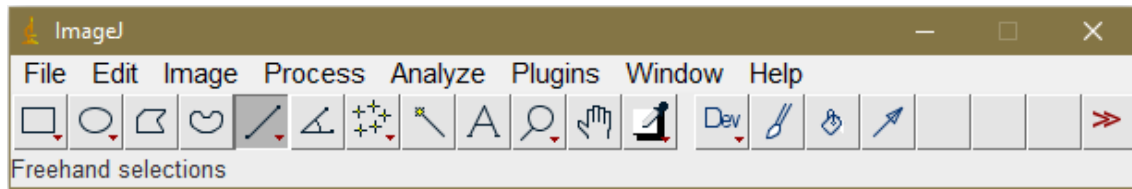


Figura 8. Menú de inicio del software Image J. Captura de pantalla.

3.3.5 R

Es un software de uso libre que se emplea para realizar análisis de estadística computacional y visualización gráfica de forma eficiente cuando se tiene una cantidad importante de datos. Si se desea darles un tratamiento específico a dichos datos, el software cuenta con una gama amplia de funciones matemáticas (modelos lineales y no lineales, series en el tiempo, clasificación, dispersión, etcétera.) facilitando la interpretación para diferentes propósitos como la toma de decisiones. La ventaja que tiene R es su integración con otros ambientes de programación populares que se utilizan en el ámbito científico y la industria, mismos que igualmente permiten la visualización, manejo y almacenamiento de datos, tales como Python, SQL, Power BI, Tableau, entre otros. [37]

Existe un ambiente de desarrollo integrado (*IDE* por sus siglas en inglés) llamado “R Studio” el cual facilita el proceso de escritura de los comandos y funciones a ejecutar con R, mediante una interfaz gráfica, **Figura 9**. Esta interfaz gráfica fue la que se utilizó para escribir las funciones y realizar el resumen estadístico de los datos experimentales que se discutirán más adelante.

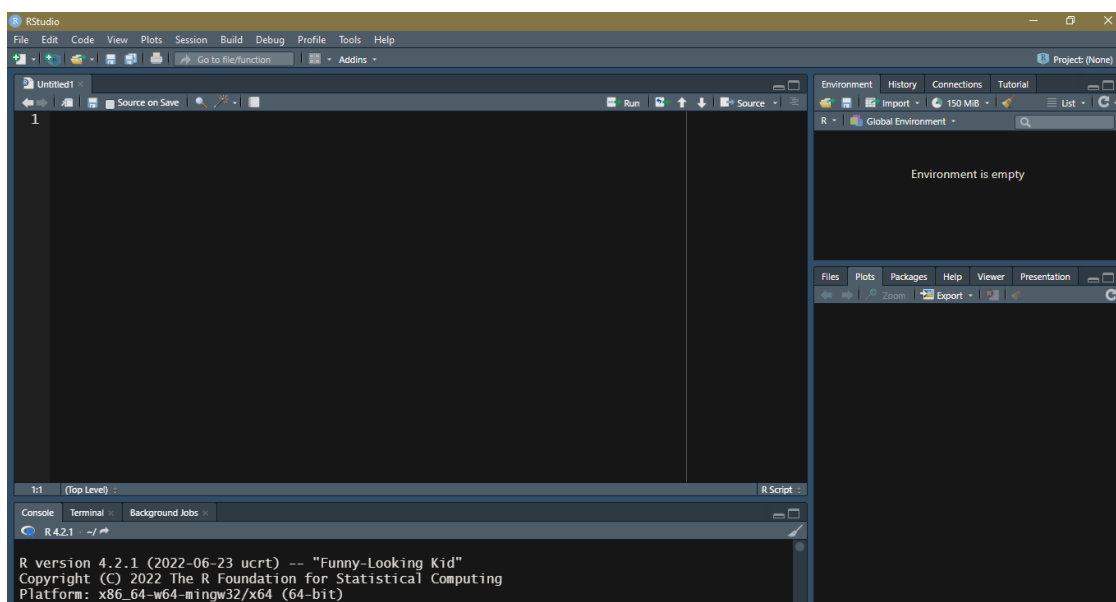


Figura 9. Interfaz gráfica de R Studio. Captura de pantalla.

3.4 Metodología

El análisis exploratorio y las actividades experimentales se realizaron en una secuencia de 5 pasos que se señalan en la **Figura 10**. Previamente se hizo el planteamiento y diseño experimental (premisas y métodos), así como la recolección de datos existentes. Los pasos 1, 2 y 3 corresponden al análisis de las nanopartículas, que engloba a la distribución de su tamaño, el tiempo de suspensión en salmueras y los efectos en la tensión superficial e interfacial. Finalmente, los pasos 4 y 5 corresponden al análisis de emulsiones preparadas con y sin nanopartículas, así como la distribución del tamaño de gotas.

Para la integración de resultados complementarios se prepararon emulsiones adicionales, y por el tipo de información obtenida, se aplicaron diferentes métodos de análisis como la construcción de curvas de distribución acumulada, histogramas, diagramas de cajas (*boxplots*) y el resumen estadístico.



Figura 10. Secuencia del proceso o método experimental llevado a cabo. Diseño propio.

3.4.1 Caracterización de nanopartículas de sílice (SiO₂)

En primer lugar, se tomaron micrografías mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) JSM-7800F, y se realizó un análisis estadístico del tamaño del diámetro de las nanopartículas utilizando algunas micrografías seleccionadas, para validar que el tamaño de partícula promedio (APS, por sus siglas en inglés) indicado en la etiqueta del producto coincida con lo medido en el microscopio SEM.

Las micrografías tomadas por el microscopio electrónico de barrido que fueron seleccionadas para este trabajo tienen escalas de 200, 100 y 50 [nm]. Se utilizaron 5 micrografías por cada tipo de nanopartícula para su análisis, ejemplos en la **Figura 11**. Se utilizó el software Image J, para determinar el diámetro de las nanopartículas.

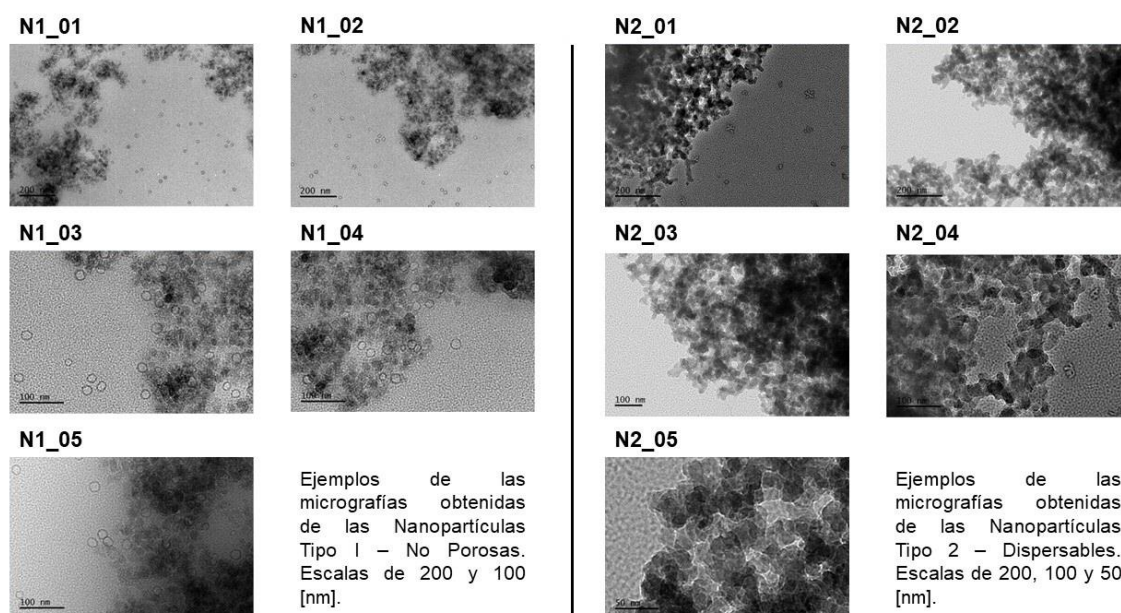


Figura 11. Micrografías de nanopartículas obtenidas por el microscopio electrónico de barrido SEM JSM-7800F.

Como se comentó anteriormente, este software permite ajustar la escala a conveniencia haciendo una conversión de la cantidad de píxeles de la imagen proporcionales a una determinada longitud. Una vez asignados los parámetros correspondientes, se selecciona una herramienta de línea que con los comandos *ctrl + b* la mantiene estática y *ctrl + m* que almacena el dato en una base descargable de archivo .csv., como se muestra en la **Figura 12**. Debido a que las nanopartículas aparecen encimadas en la micrografía, no es posible realizar una medición automática como podría hacerse con otro tipo de procesadores de imagen, por lo que es necesario hacerlo de forma manual en estos casos, recogiendo así varias

mediciones de diferentes muestras gráficas de forma aleatoria. El tamaño de la muestra recomendada para este tipo de análisis debe ser de $n \geq 100$.^[VI]

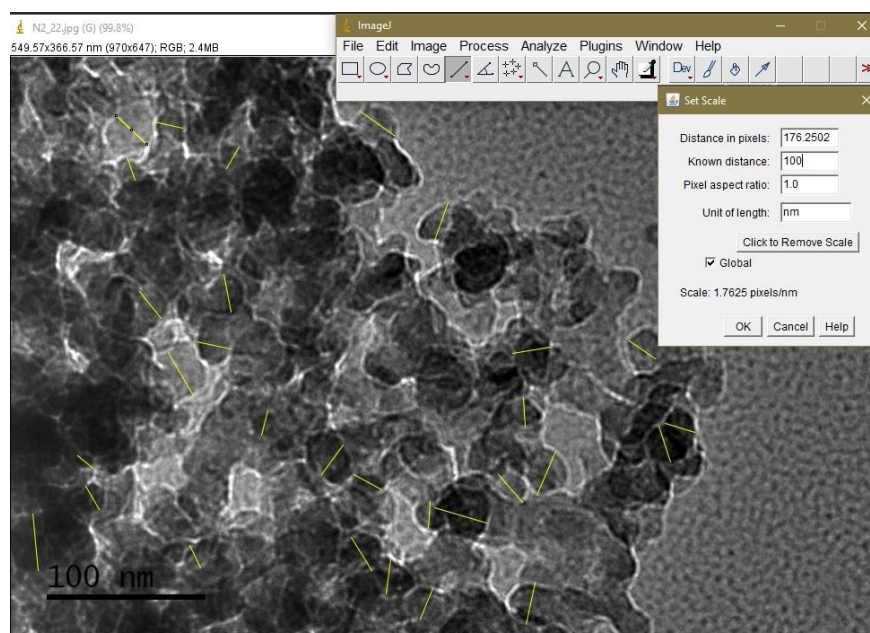


Figura 12. Medición del diámetro de las nanopartículas con Image J. Captura de pantalla.

3.4.2 Suspensión en salmueras

Cuantificar el tiempo que permanecen las nanopartículas suspendidas en las salmueras antes de precipitar es importante porque permite estimar que fluidos presentan mayor estabilidad; además, permite determinar la concentración óptima de surfactante/nanopartícula/salinidad que debe emplearse para mantener suspendidas por más tiempo a las nanopartículas, ver **Figura 13**.

^[VI] La longitud aproximada de 1 píxel es 2.645833×10^{-4} [m], la cual ajustada a la escala y resolución de la imagen, permitiendo aproximar las dimensiones reales de los objetos que son invisibles al ojo humano.

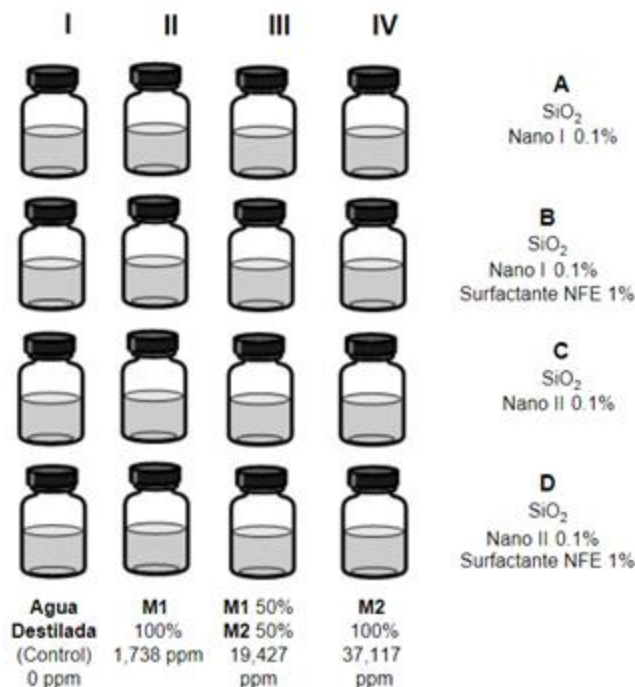


Figura 13. Diseño experimental para evaluar el tiempo de suspensión de nanopartículas. Esquema propio.

Para esta evaluación se realizaron 16 experimentos, que se agruparon en una matriz cuyas filas A, B, C y D designan el tipo de nanopartículas empleadas y si contaban o no con surfactante, y en 4 columnas que designan la variación de la salinidad en las salmueras de cada muestra. Para llevar a cabo las pruebas de suspensión se utilizaron frascos de 15 mL, procurando que salieran en una misma corrida por cada grupo (A, B, C y D) para que inmediatamente se les tomara una fotografía y marcara el tiempo transcurrido; de esta forma se podría contrastar de forma visual los grupos entre sí, ver **Tablas 16 y 17 del Anexo I**.

3.4.3 Efectos en la tensión superficial e interfacial

Se diseñaron experimentos, los cuales se clasificaron en 6 grupos de muestras de fluidos en 50 mL, como se ven en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Clasificación de los fluidos para la evaluación de la tensión superficial e interfacial.

Grupos	Descripción
I (Control 1)	Salmueras 100M1, 75M1-25M2, 50M1-50M2, 25M1-75M2 y 100M2 sin surfactante ni nanopartículas.
II	Salmueras con nanopartículas tipo I al 0.1%.
III	Salmueras con nanopartículas tipo II al 0.1%.
IV (Control 2)	Salmueras con agregado nonilfenol etoxilado (NFE) al 1% en volumen.
V	Control 2 con nanopartículas tipo I al 0.1% en volumen.
VI	Control 2 con nanopartículas tipo II al 0.1% en volumen.

Adicionalmente, durante el desarrollo de los experimentos se midieron los efectos asociados al aumento de la concentración de nanopartículas para los grupos II y V (260%); y para los grupos III y VI una vez que habían precipitado las nanopartículas.

Las mediciones de la tensión superficial se hicieron para todos los grupos con el dispositivo Dynotester + de la marca SITA Lab Solution, descrito anteriormente. El principio físico que utiliza el aparato para hacer la medición de la tensión superficial se conoce como método de la presión de burbuja. Este método consiste en el registro de la variación de presión respecto al tiempo que toma un capilar sumergido en el fluido de interés emitir una burbuja de aire y formarse hasta salir a superficie; la presión capilar alcanza su máximo valor cuando la burbuja adquiere el radio más pequeño al formarse una semiesfera, ver **Figura 14**. El equipo toma 3 lecturas y arroja un resultado promedio por cada proceso, para mayor fidelidad de los datos se repite el mismo por tres ocasiones y nuevamente se considera un promedio global; además, antes de cada medición para grupos distintos, debe limpiarse y calibrarse el capilar con agua destilada.

A partir de la tensión superficial se estima la tensión interfacial utilizando dos correlaciones numéricas; la ecuación de George Antonov, en la cual se considera una diferencia de las tensiones superficiales de ambos fluidos. [VII, 38]

$$\sigma_{interfacial} = |\sigma_{petróleo} - \sigma_{fluido}|$$

La segunda ecuación es de Abdul-Majeed que relaciona la densidad °API y la temperatura en [°C] del aceite muerto para obtener la tensión interfacial. [39]

$$\sigma_{aceite\ muerto} = A(38.085 - (0.259 * °API))$$

$$A = 1.11591 - (0.00305 * T)$$

[VII] Publicada en 1907 por George Antonov donde demuestra la existencia de una relación entre dos capas líquidas en equilibrio. La ecuación es más adecuada cuando los fluidos no son miscibles entre sí y estos presentan distinta polaridad.

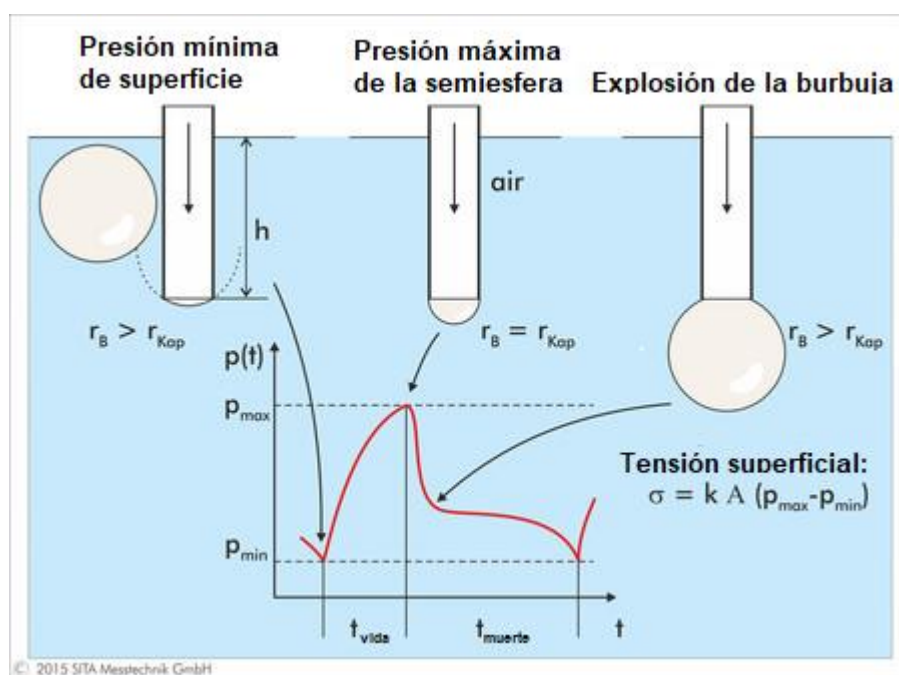


Figura 14. Esquema del principio de la burbuja para la estimación de la tensión superficial dinámica en fluidos. Adaptada de SITA Lab Solution Inc.

Las condiciones físicas del entorno y las proporciones en masa de las diferentes sustancias empleadas para la realización de esta prueba experimental se resumen en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Condiciones físicas para medir los efectos en la tensión superficial e interfacial.
Temperatura empleada, 25 °C.

Sustancia	Concentración [% p/p]	Volumen [mL]	Densidad [g/cm ³]	Masa [g]
NFE	1.00	0.5241851	1.0468	0.50075
Nanopartículas SiO ₂	0.10	0.13269875	2.65	0.050075
Salmuera	98.90	50	1.0015	50.075

3.4.4 Preparación de Emulsiones

Emulsiones de aceite mineral: se prepararon 26 emulsiones que se clasificaron de acuerdo con la proporción de agua, aceite y surfactante; la adición de nanopartículas, salinidad y tipo de iones. Las emulsiones fueron caracterizadas con el microscopio OMAX, se realizaron observaciones al tiempo 0, 7 y 30 días.

Tabla 14. Clasificación de las emulsiones preparadas con aceite mineral. En azul las que se prepararon con distintos tipos de iones (ver **Tabla 7**). Surfactante de NFE 1%.

Proporción Agua – Aceite [%]	Tipo de Emulsión	Concentración de sales (Mg ²⁺) [ppm]
30-70	NFE	1,000
		8,000
		15,000 (Mg ²⁺)
		15,000 (Ca ²⁺)
		15,000 (Na ⁺)
		35,000 (mar)
	NFE + Nanopartículas Tipo I	1,000
		8,000
		15,000
		35,000 (mar)
50-50	NFE	1,000
		8,000
		15,000
		35,000 (mar)
	NFE + Nanopartículas Tipo I	1,000
		8,000
		15,000
		35,000 (mar)
70-30	NFE	1,000
		8,000
		15,000
		35,000 (mar)
	NFE + Nanopartículas Tipo I	1,000
		8,000
		15,000
		35,000 (mar)

Las emulsiones de aceite se prepararon con salmuera de cloruro de magnesio a 1,000, 8,000 y 15,000 ppm. Se prepararon dos emulsiones más con salmuera de cloruro de calcio y otra con cloruro de sodio a concentraciones de 15,000 ppm. Las salmueras de 35,000 ppm simulan agua de mar sintética, basado en un estudio Stiff Davis con agua proveniente del Golfo de México. Para estas emulsiones se utilizaron nanopartículas del tipo I.

Emulsiones de petróleo crudo: Se prepararon 30 emulsiones, las cuales se clasificaron por la proporción de agua, petróleo y surfactante; la adición de nanopartículas, salinidad y tipo de iones. Las nanopartículas utilizadas para estas emulsiones fueron de tipo II. Las emulsiones fueron caracterizadas con el

microscopio OMAX. Se realizaron observaciones al tiempo 0 días. La **Tabla 15** presenta las condiciones de las emulsiones preparadas.

Tabla 15. Clasificación de las emulsiones preparadas con petróleo crudo. Surfactante de NFE 1%.

Proporción Agua – Aceite [%]	Tipo de Emulsión	Salinidad [ppm]
30-70	NFE	1,738
		10,583
		19,427
		28,272
		37,117
	NFE + Nanopartículas Tipo II	1,738
		10,583
		19,427
		28,272
		37,117
50-70	NFE	1,738
		10,583
		19,427
		28,272
		37,117
	NFE + Nanopartículas Tipo II	1,738
		10,583
		19,427
		28,272
		37,117
70-30	NFE	1,738
		10,583
		19,427
		28,272
		37,117
	NFE + Nanopartículas Tipo II	1,738
		10,583
		19,427
		28,272
		37,117

3.4.5 Diámetro de gotas de emulsión

Se realizó la medición del diámetro de las gotas para cada emulsión a distintos tiempos con la herramienta Image J. Ganesh Kumar, A. K *et. al.* (2022) sugieren que una emulsión que presenta buena estabilidad mantiene cierta uniformidad y

diámetros de gota menores respecto emulsiones poco estables o que están en proceso de coalescencia; observando además una distribución aproximada a la normal de forma leptocúrtica. ^[VIII] No obstante, no proponen un tamaño de referencia o estándar, ya que esto dependerá de las características propias de los componentes que conforman la emulsión, **Figura 15**.

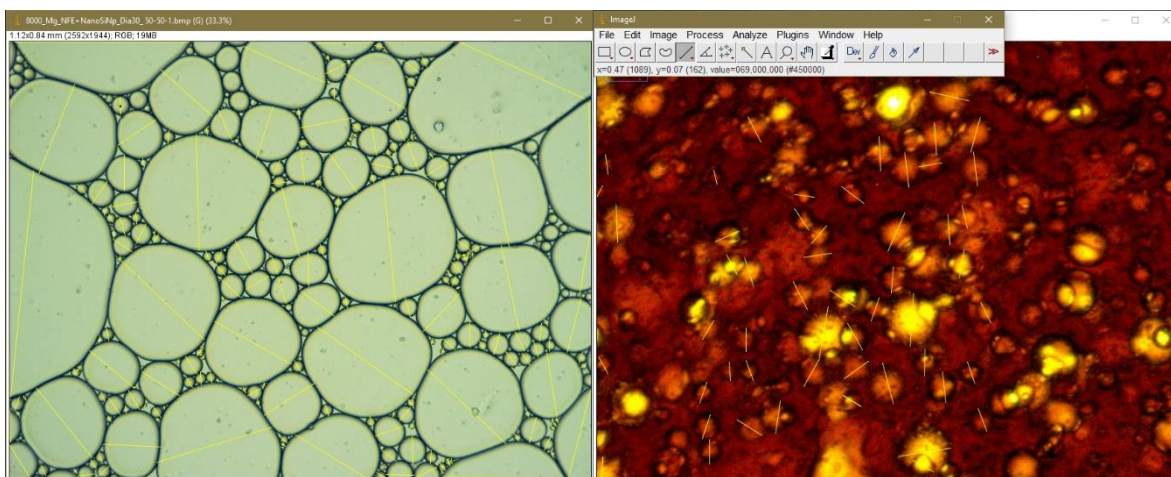


Figura 15. Medición del tamaño de gotas de emulsión con Image J. Izquierda – emulsión de aceite mineral. Derecha – emulsión con petróleo crudo, al tiempo de 0 días. Captura de pantalla.

El tamaño de la muestra sugerido para el análisis de gotas de una emulsión es de 800 a 1,000 mediciones; sin embargo, para este trabajo no se implementó un método de reconocimiento automático de imagen, por lo que el tamaño de muestra empleada para el análisis fue de $300 \geq n \geq 100$.

^[VIII] Hace referencia a una de las formas geométricas de la distribución de frecuencias (curtosis), donde se tiene una desviación estándar menor que produce colas más largas que la normal.

4 Resultados

4.1 Caracterización de nanopartículas

Como se explicó en el apartado 3.4.1, la caracterización de nanopartículas consta de la visualización gráfica que es la comparación entre las micrografías obtenidas por el microscopio SEM JSM-7800F del Instituto de Física y las publicadas por el fabricante. Como se puede observar, la calidad y resolución de las micrografías obtenidas por el microscopio electrónico de barrido JSM-7800F, en contraste con las que exhibe el fabricante, son muy diferentes, ver **Figura 16**. Esto quizá se deba a que el microscopio utilizado por el fabricante utilice un mecanismo de funcionamiento diferente, como lo es el microscopio electrónico de transmisión y que este disponga de una mejor resolución, sin descartar posibles retoques fotográficos. El fabricante no aporta más datos.

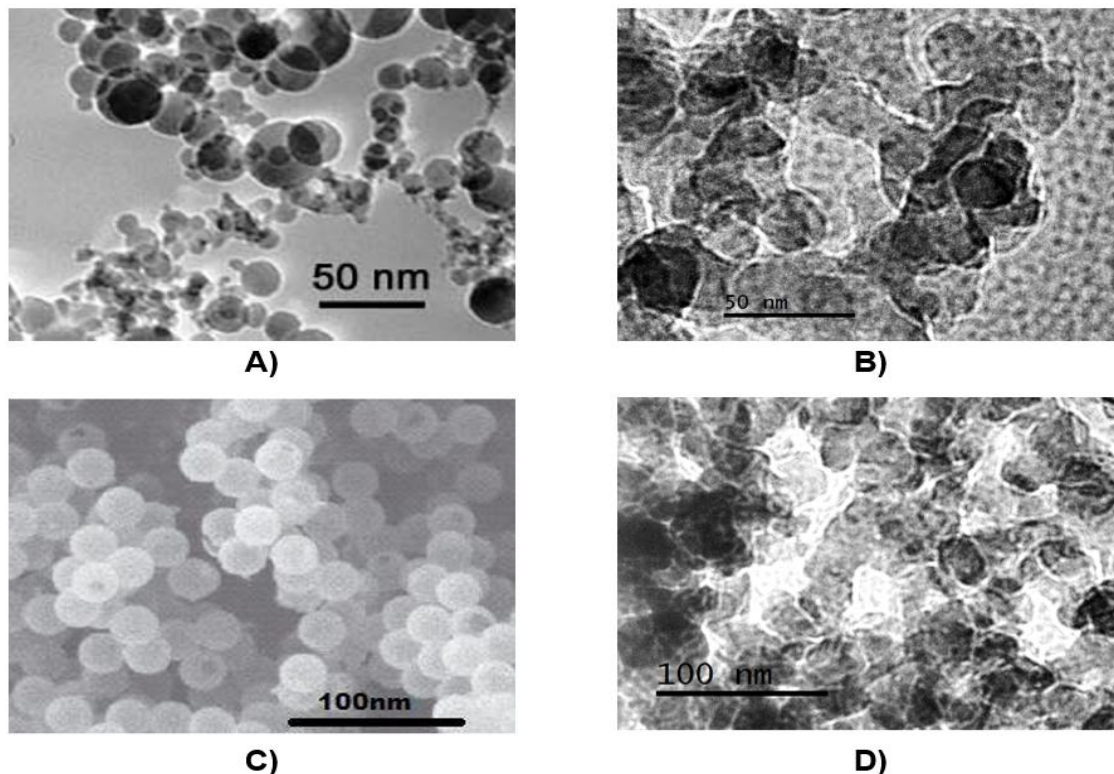


Figura 16. Micrografías reportadas por el fabricante de las nanopartículas de sílice, A y C tipos 1 y 2 respectivamente. Micrografías B y D tipos 1 y 2 respectivamente, obtenidas por el microscopio SEM JSM-7800F.

Por otro lado, es posible identificar a simple vista y guiándose con las escalas que vienen trazadas en las respectivas imágenes, que el tamaño de las nanopartículas es más o menos equivalente entre las que muestra el fabricante y las que se utilizaron. Esto se comprobará posteriormente con el análisis estadístico de las

mediciones realizadas a partir de una muestra representativa de dichas nanopartículas utilizando las micrografías.

El análisis estadístico del tamaño de nanopartículas se presenta en el histograma de la **Figura 17**. El tamaño de nanopartículas de tipo I adopta una distribución cercana a la normal con un ligero sesgo hacia la izquierda (asimetría positiva); se observan algunos datos atípicos que rondan los 35 nm. Con la gráfica de distribución acumulada (ojiva) se observa que el 25% de los datos son menores o igual a 15.99 nm, el 75% menores a 20.5 nm y el promedio de 18.43 nm, la desviación es de ± 3.4 nm y moda de 18 nm. El tamaño de las nanopartículas coincide con el especificado por el fabricante al menos el 75% de los casos (rango de 10 – 20 nm).

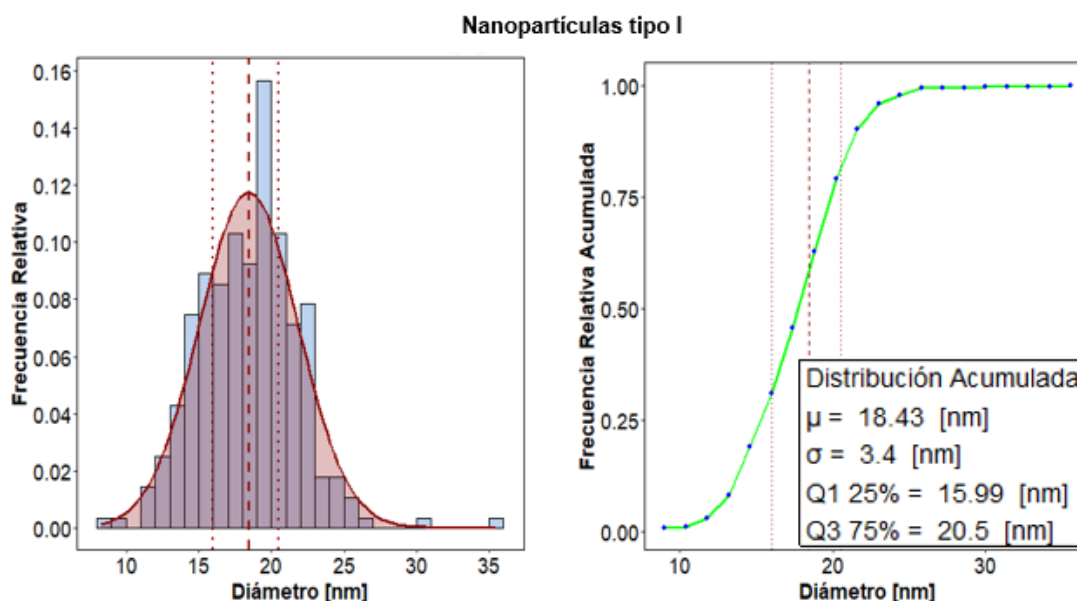


Figura 17. Distribución del tamaño de nanopartículas tipo I. Gráficas generadas con R.

En el histograma de la **Figura 18** se muestra que las medidas del tamaño de nanopartículas de tipo II, adoptan una distribución cercana a la normal con un sesgo ligero hacia la izquierda (asimetría positiva) en comparación con las de tipo I. Se observan algunos datos atípicos que rondan los 40 nm. Con la gráfica de distribución acumulada se observa que el 25% de los datos son menores o igual a 16.41 nm, el 75% menores a 21.54 nm y el promedio de 19.45 nm, la desviación es de ± 4.62 nm y moda de 20 nm. El tamaño de las nanopartículas coincide con el especificado por el fabricante al menos el 70% de los casos (rango de 10 – 20 nm).

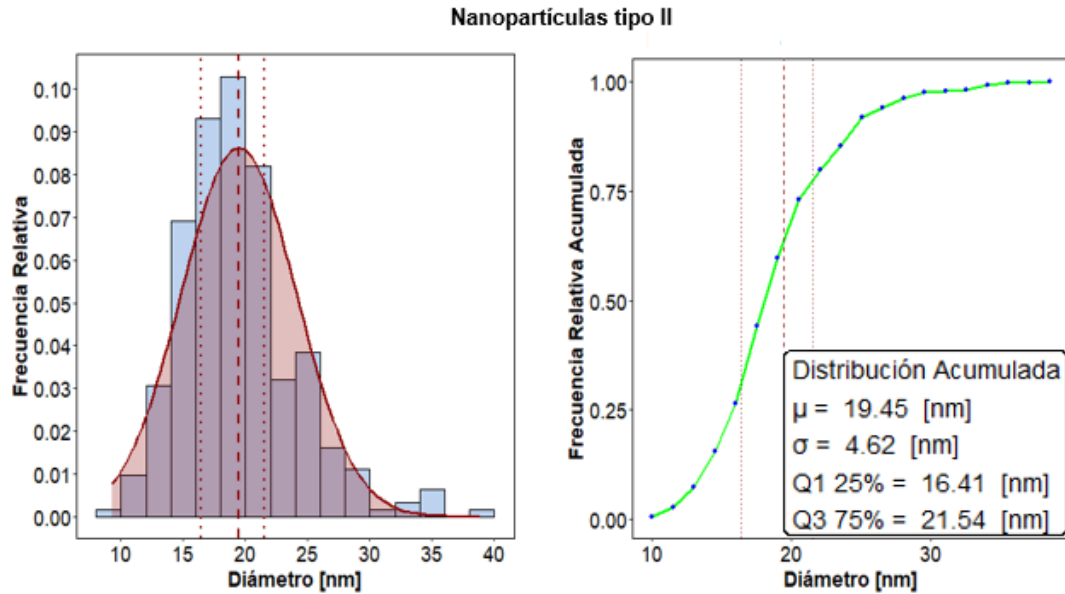


Figura 18. Distribución del tamaño de nanopartículas tipo II. Gráficas generadas con R.

Como se observa en la **Figura 19** (diagrama de caja y bigotes), ambas nanopartículas presentan una distribución casi simétrica y cercana a la normal. Se destaca que las nanopartículas de tipo II presentan más datos atípicos que sobresalen del límite superior definido por el rango intercuartil en contraste con las nanopartículas de tipo I; al tratarse de dos tipos de nanopartículas con diferencias en su superficie, cabe la posibilidad de que sea un comportamiento esperado para las de tipo II. Con una mediana similar para ambas nanopartículas, no se observan desviaciones considerables.

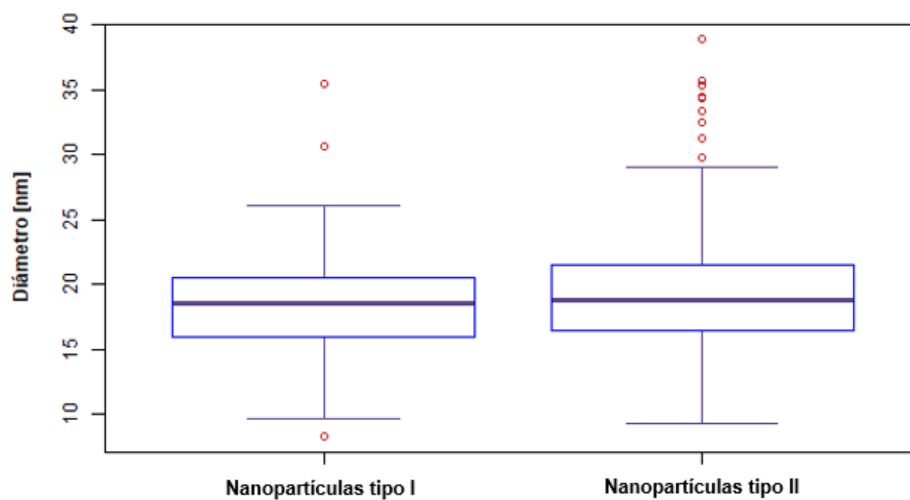


Figura 19. Comparación de la distribución del tamaño para ambos tipos de nanopartículas. Gráficas generadas con R.

4.2 Suspensión en salmueras

El análisis del tiempo que permanecen suspendidas las nanopartículas en salmueras es de carácter cualitativo, ya que no hay una forma precisa de medir las partículas que permanecen en suspensión, y se basan en la turbidez del fluido en rangos de tiempo más o menos similares para identificar aquellas mezclas que permanecieron más estables.

En la **Figura 20** se presentan algunas fotografías tomadas de los nanofluidos a diferentes tiempos que van de [0 – 30], [60 – 120], [120 – 180] minutos y después de 20 horas aproximadamente. [IX]

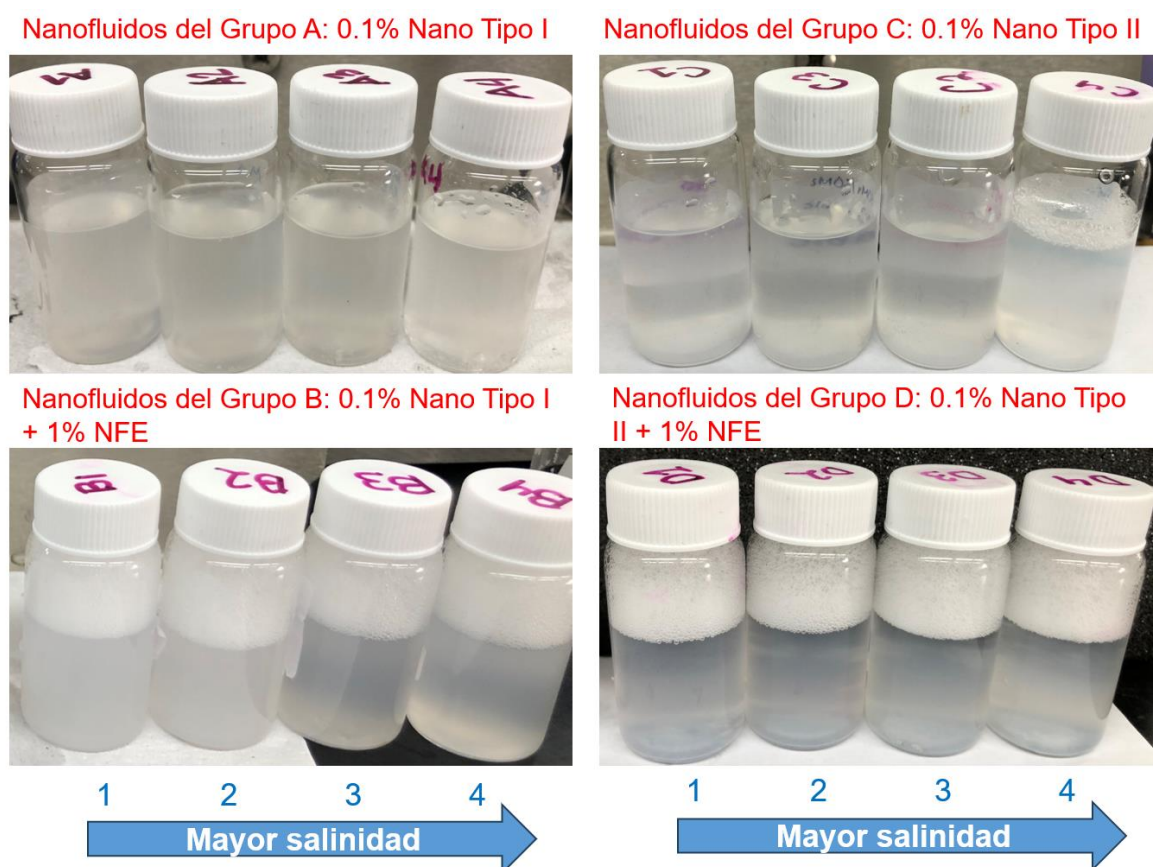


Figura 20. Grupos de nanofluidos para observar aquellos en los que las nanopartículas se mantienen suspendidas por mayor tiempo. Salinidad [ppm]: 1 = 0, 2 = 1,738, 3 = 19,427 y 4 = 37,117. Fotografías tomadas en el LIRFFF al minuto 0.

[IX] Por practicidad los grupos de nanofluidos se designan utilizando la letra representativa de su familia (A, B, C y D) y numeración decimal en sustitución de la numeración romana (1, 2, 3 y 4) utilizada en el esquema de la **Figura 13**.

Dentro de los primeros 30 minutos el grupo de nanofluidos que presenta mayor turbidez debido a la suspensión de nanopartículas es el B, mientras que el grupo C es el que se muestra más traslúcido a pesar de que los fluidos de dicho grupo se prepararon minutos más tarde. En este punto es posible observar que aparentemente las nanopartículas de tipo II tienden a precipitar más rápido que las de tipo I.

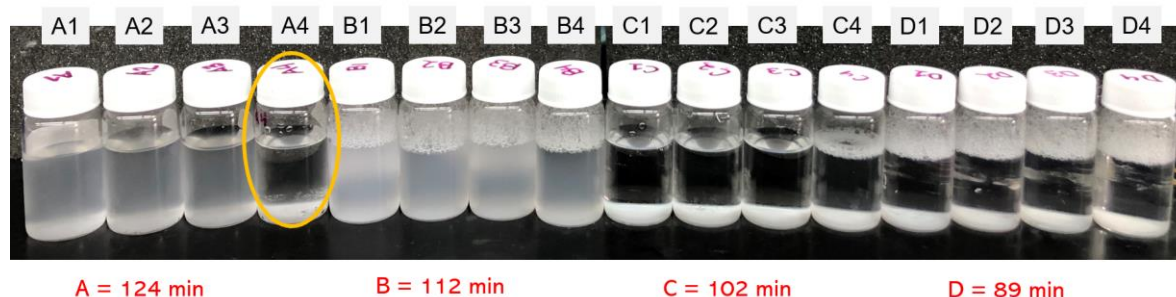


Figura 21. Comparación de nanofluidos. 60 – 120 [min] aproximadamente. Fotografía tomada en el LIRFFF.

En el rango que va de los 60 – 120 minutos se puede observar que del grupo A, el nanofluido con mayor salinidad (A4) presenta mayor precipitación de nanopartículas, mientras que en el grupo B se muestran más o menos homogéneos las cuatro muestras. Respecto a los grupos C y D con nanopartículas de tipo II se aprecian prácticamente traslúcidos, esto quiere decir que la mayoría de las nanopartículas han precipitado.

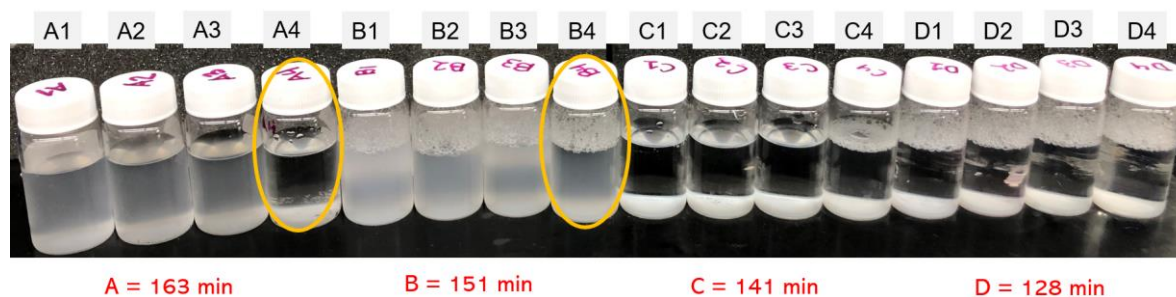


Figura 22. Comparación de nanofluidos. 120 – 180 [min] aproximadamente. Fotografía tomada en el LIRFFF.

En el rango de 120 – 180 minutos es posible identificar que para el grupo B el nanofluido que presenta mayor precipitación es el B4.

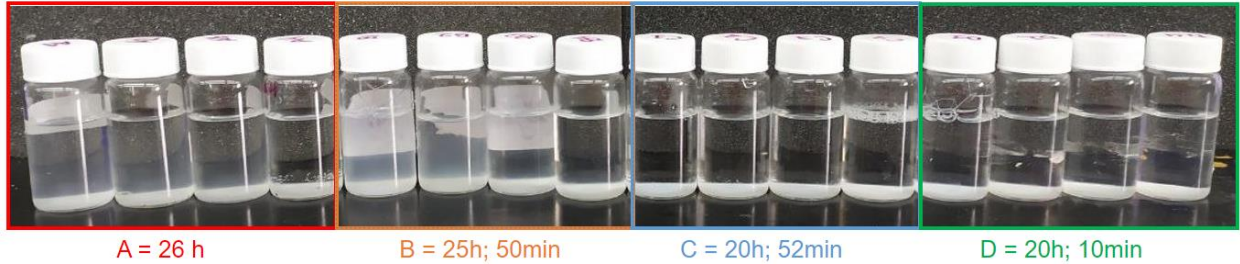


Figura 23. Comparación de nanofluidos. Más de 20 horas aproximadamente. Fotografía tomada en el LIRFFF.

Después de las 20 horas se observa que los grupos A y B con menor salinidad (A1 y B1) presentan mayor turbidez; predominando el grupo B que contiene surfactante. Los grupos C y D prácticamente se muestran traslúcidos con las nanopartículas precipitadas en el fondo; entre estos dos, el grupo D que contiene surfactante se muestra ligeramente más turbio.

4.3 Efectos en la Tensión Superficial e Interfacial

Con el dispositivo DynoTester + se realizaron mediciones de la tensión superficial a 50 ms. En la **Figura 24** se observa que a mayor salinidad, incrementa la tensión superficial. Las nanopartículas por sí solas en las salmueras muestran un efecto reductor de la tensión mínimo y no se observan diferencias significativas entre éstas, aunque las de tipo II apenas incrementan la tensión con la salinidad frente las de tipo I. Por otro lado, el surfactante tiene un efecto mayor en la disminución de la tensión a valores que oscilan entre 53 – 65 mN/m. El efecto mayor ocurre cuando se combinan nanopartículas con surfactante, donde los valores van de los 36 – 38 mN/m.

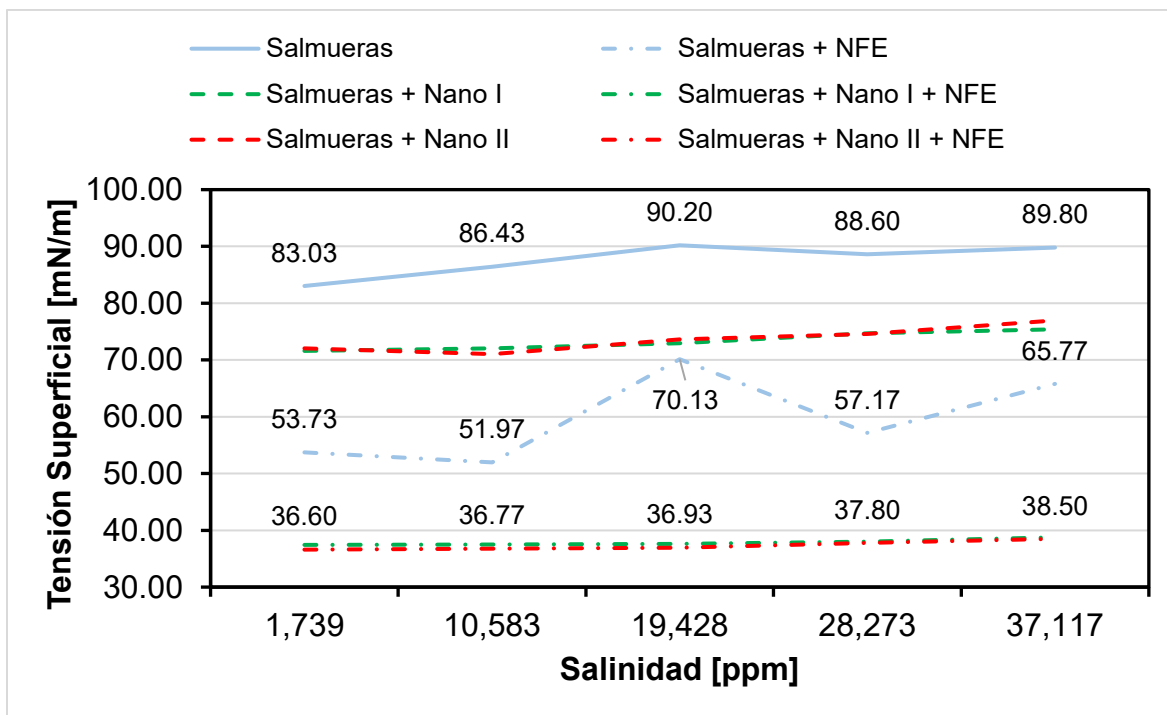


Figura 24. Tensión superficial medida a 50 [ms]. Gráfico generado en Excel.

En la **Figura 25** se contrasta el efecto reductor de la tensión superficial que aportan las nanopartículas de tipo II y el surfactante; cuando éstas se encuentran en suspensión, hay mayor reducción de la tensión frente a cuando han precipitado.

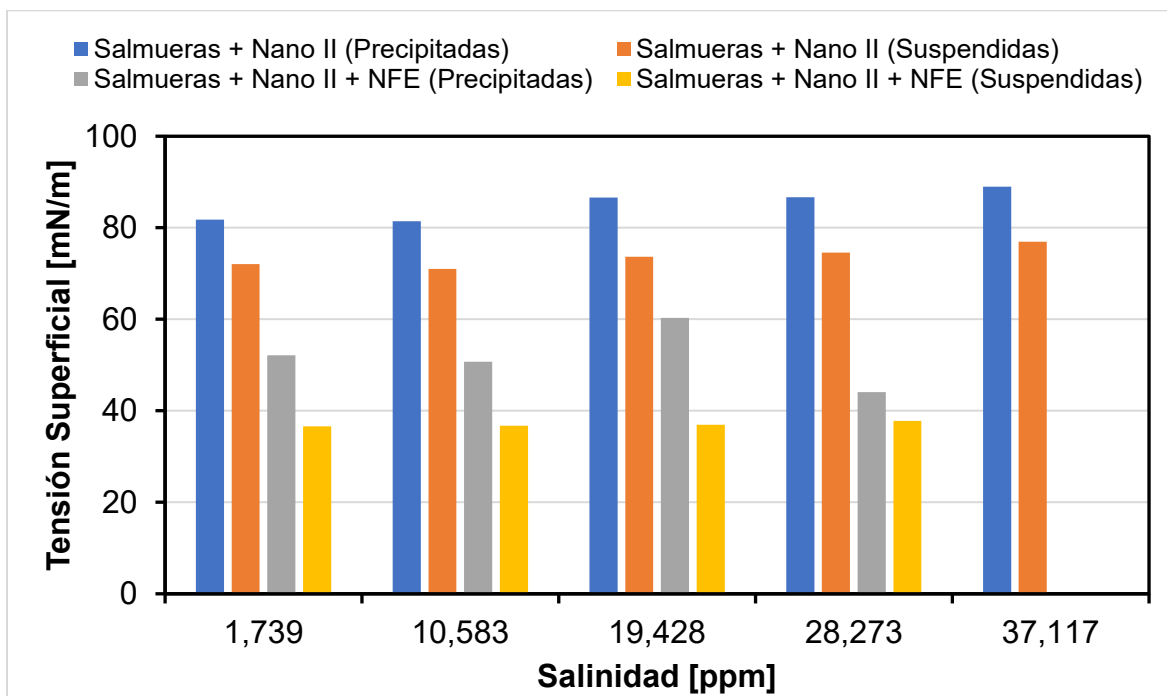


Figura 25. Comparación de tensión superficial a 50 [ms]. Gráfico generado en Excel.

La tensión interfacial estimada mediante la correlación de Antonov presenta una tendencia similar a la mostrada en la **Figura 24** con mediciones a 50 ms, dado que se trata de una correlación lineal que utiliza las mediciones de la tensión superficial. La correlación es válida solo para el petróleo crudo, por lo que no se consideran las emulsiones con aceite mineral.

Es importante mencionar que los valores de la tensión interfacial estimados para Salmueras + Nano I o Nano II + NFE caen a mínimos, lo que sugiere que la combinación más efectiva para formar emulsiones es la mezcla de nanopartículas con surfactantes, ver **Figura 26**.

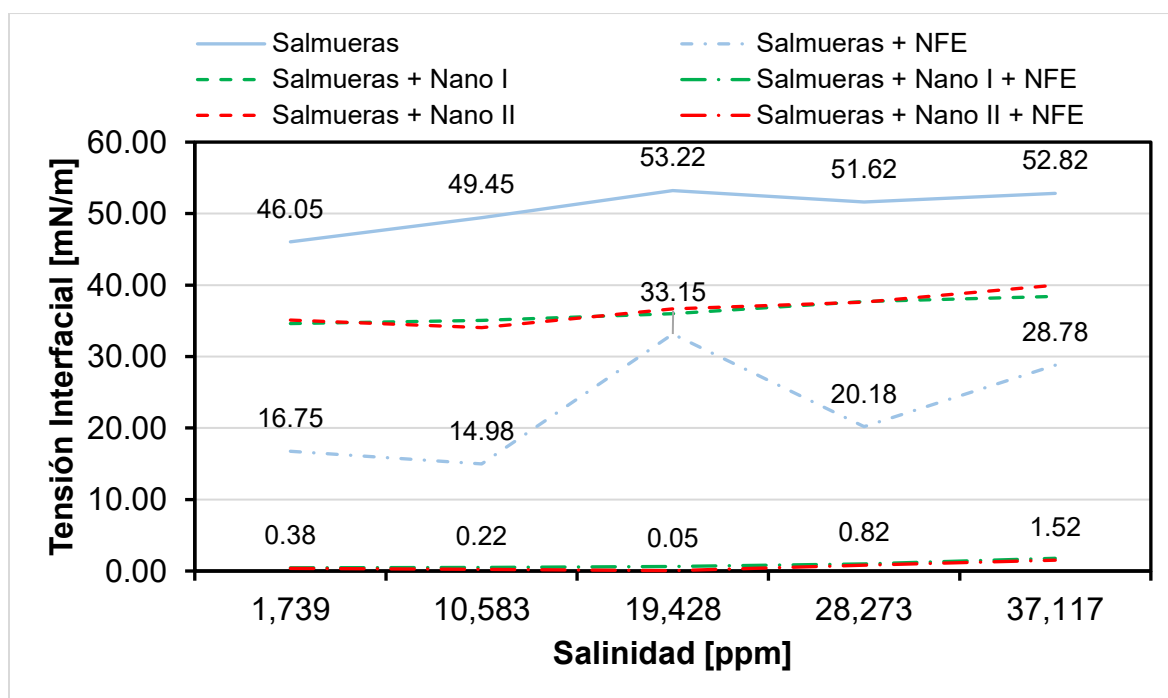


Figura 26. Tensión interfacial calculada, medición a 50 [ms]. Gráfico generado en Excel.

En el **Anexo I, Tabla 18** y **Figuras 39 – 42** se pueden consultar los resultados complementarios de la tensión superficial e interfacial con medidas a 30 ms. Así como las variaciones asociadas al exceso y suspensión de nanopartículas en el fluido.

4.4 Diámetro del tamaño de gotas de emulsión

Para el análisis de los resultados del diámetro de gota de emulsión, se seleccionan solo algunos experimentos, mismos que se agrupan para compararse e identificar si existen algunas tendencias o patrones.

4.4.1 Emulsiones con aceite mineral

a) Comparación 1. Misma salinidad, diferentes iones: se comparan tres emulsiones con una salinidad de 15,000 ppm, solo con surfactante y sin nanopartículas, con una proporción 30:70. Los iones son de sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}).

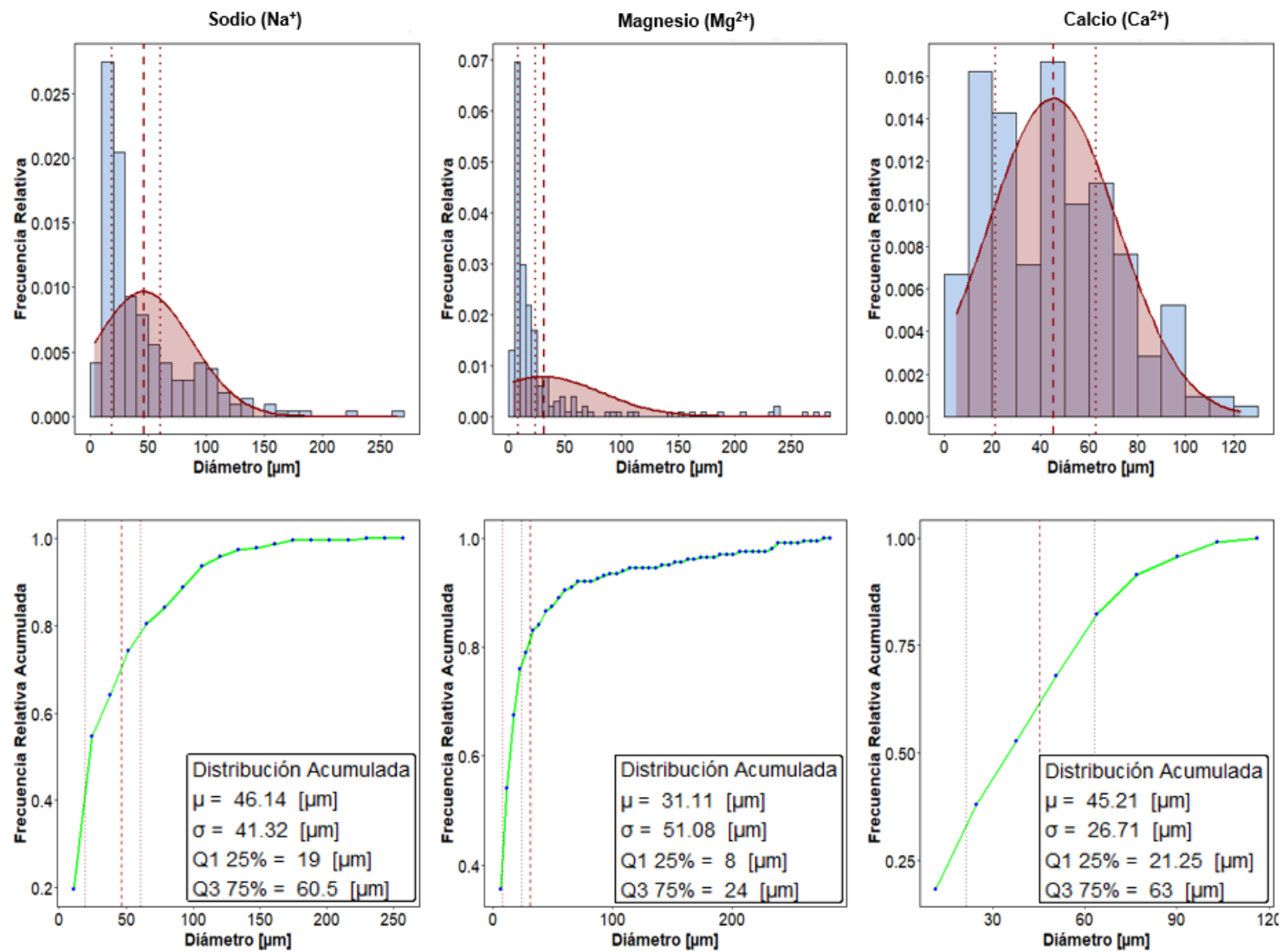


Figura 27. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 15,000 [ppm], diferentes iones. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 27** se observa que las emulsiones preparadas con salmueras de diferentes iones, presentan patrones en común y diferencias en el tamaño de las gotas. Todas comparten un sesgo hacia la izquierda y asimetría positiva, pero sólo las de sodio y magnesio expresan datos atípicos considerables que interfieren con los valores de la desviación estándar. Todas las emulsiones caen en la clasificación de macroemulsiones. La emulsión con iones de magnesio presenta un tamaño promedio de gota menor en comparación con las demás salmueras, aunque tiene algunas gotas de gran tamaño, el 75% es menor a 25 μm . Por otro lado, la emulsión con iones de calcio tiene una distribución cercana a la normal, con una desviación estándar menor de 26.71 μm y bimodal de 20 y 50 μm , lo cual sugiere que a pesar de tener gotas de mayor tamaño, podría permanecer estable durante más tiempo.

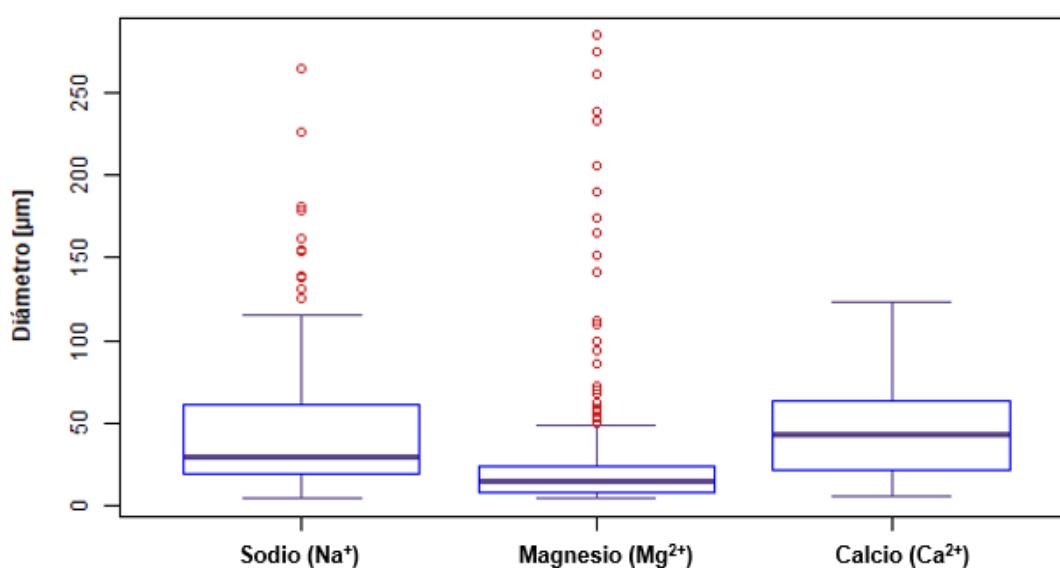


Figura 28. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 15,000 [ppm], diferentes iones. Gráficas generadas con R.

En el diagrama de cajas de la **Figura 28** se observa con detalle los valores atípicos presentes en las emulsiones de sodio y magnesio, mientras que para la emulsión con iones de calcio se tienen valores mejor relacionados entre sí, dado que no se observan datos fuera del gráfico. Sin importar el tipo de iones de la salmuera utilizada en la preparación de las emulsiones, el tamaño de gota se encuentra por debajo de los 50 μm para cada una de éstas.

b) Comparación 2. Misma salinidad, diferente corte de agua: se comparan seis emulsiones con salinidad de 35,000 ppm, esta salmuera representa un agua sintética de mar, la cual contiene diferentes iones (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}) tres de éstas contienen solo surfactante y las otras tres contienen surfactante más nanopartículas tipo I, empleando proporciones 30:70, 50:50 y 70:30.

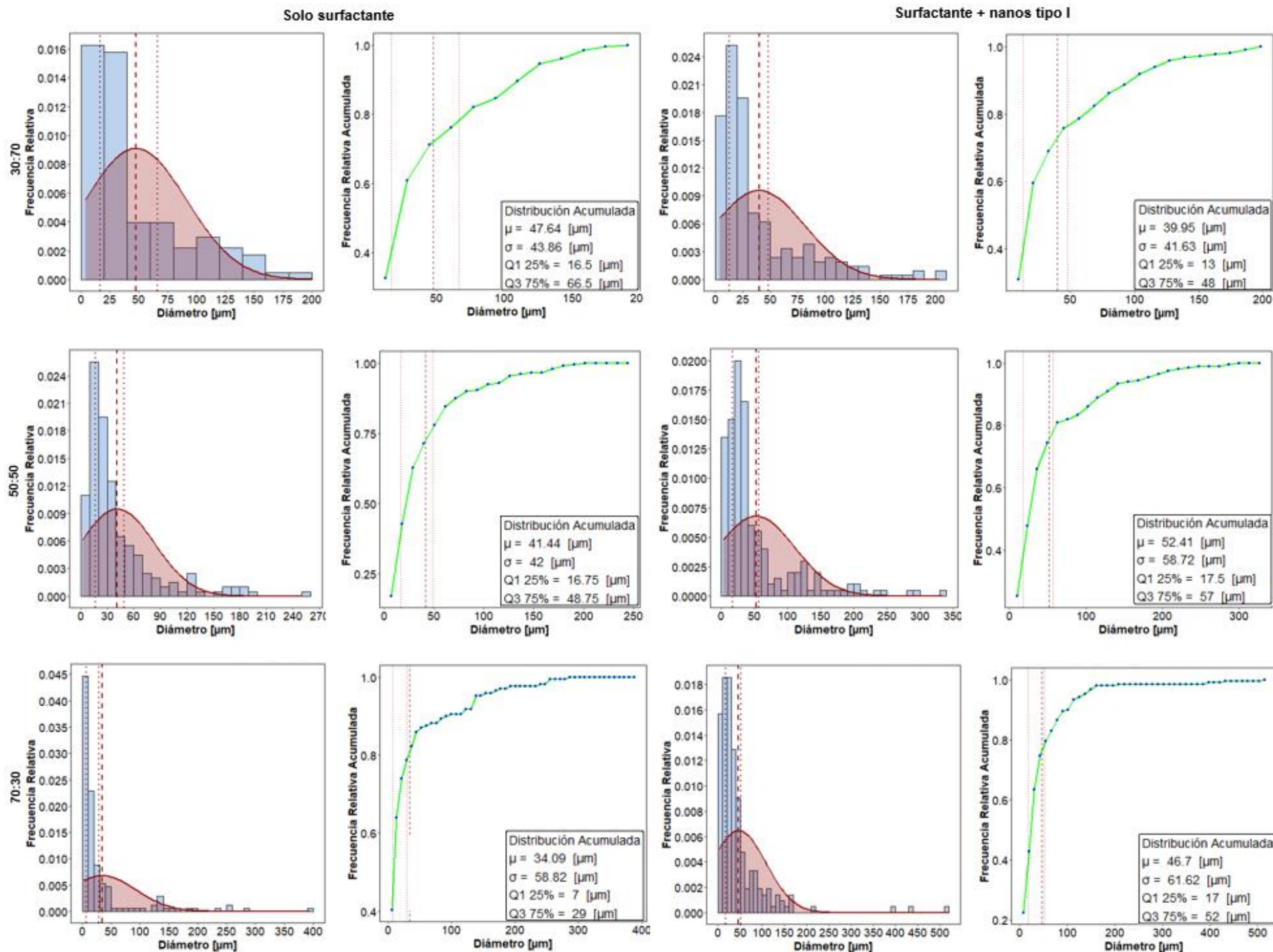


Figura 29. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50:50 y 70:30, 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 29** se observa que las emulsiones preparadas sin nanopartículas presentan menor tamaño (promedio) de gota a medida que aumenta el corte de agua; no obstante, ese patrón no se observa en las emulsiones que contienen nanopartículas, incluso se aprecia que el tamaño de gota es mayor, excepto para las de corte 30:70 ($\mu = 39.96 \mu\text{m}$) cuya desviación estándar es también menor ($\sigma = 41.63 \mu\text{m}$), lo que sugiere que es la más estable en este grupo. En todos los casos la distribución presenta un sesgo hacia la izquierda con asimetría positiva y tamaño de gota promedio alrededor de los $50 \mu\text{m}$.

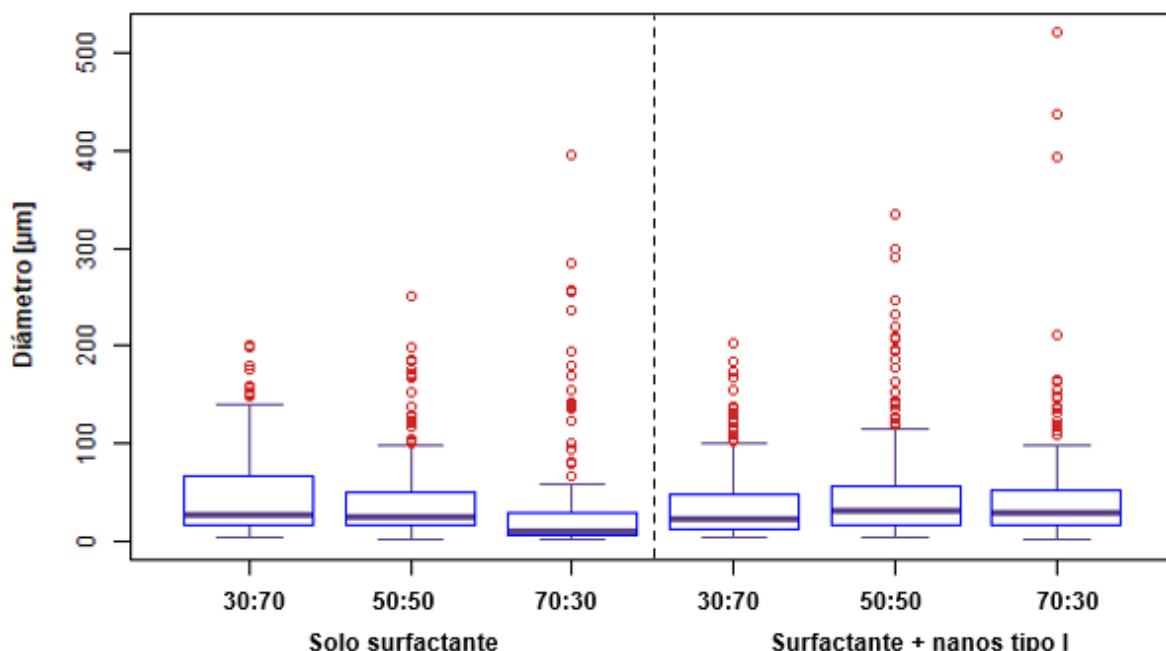


Figura 30. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50:50 y 70:30, 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 30** se corrobora que las emulsiones con corte de agua 30:70 presentan menos datos atípicos, y la que contiene nanopartículas una menor desviación. Por otro lado, las emulsiones que presentan mayor desviación y datos atípicos son las de corte 70:30 para ambos grupos.

c) Comparación 3. Mismo corte de agua, diferente salinidad: se comparan ocho emulsiones, cuatro de ellas solo con surfactante y las otras cuatro con nanopartículas tipo I, el corte de agua es de 50:50, con salinidades de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 ppm.

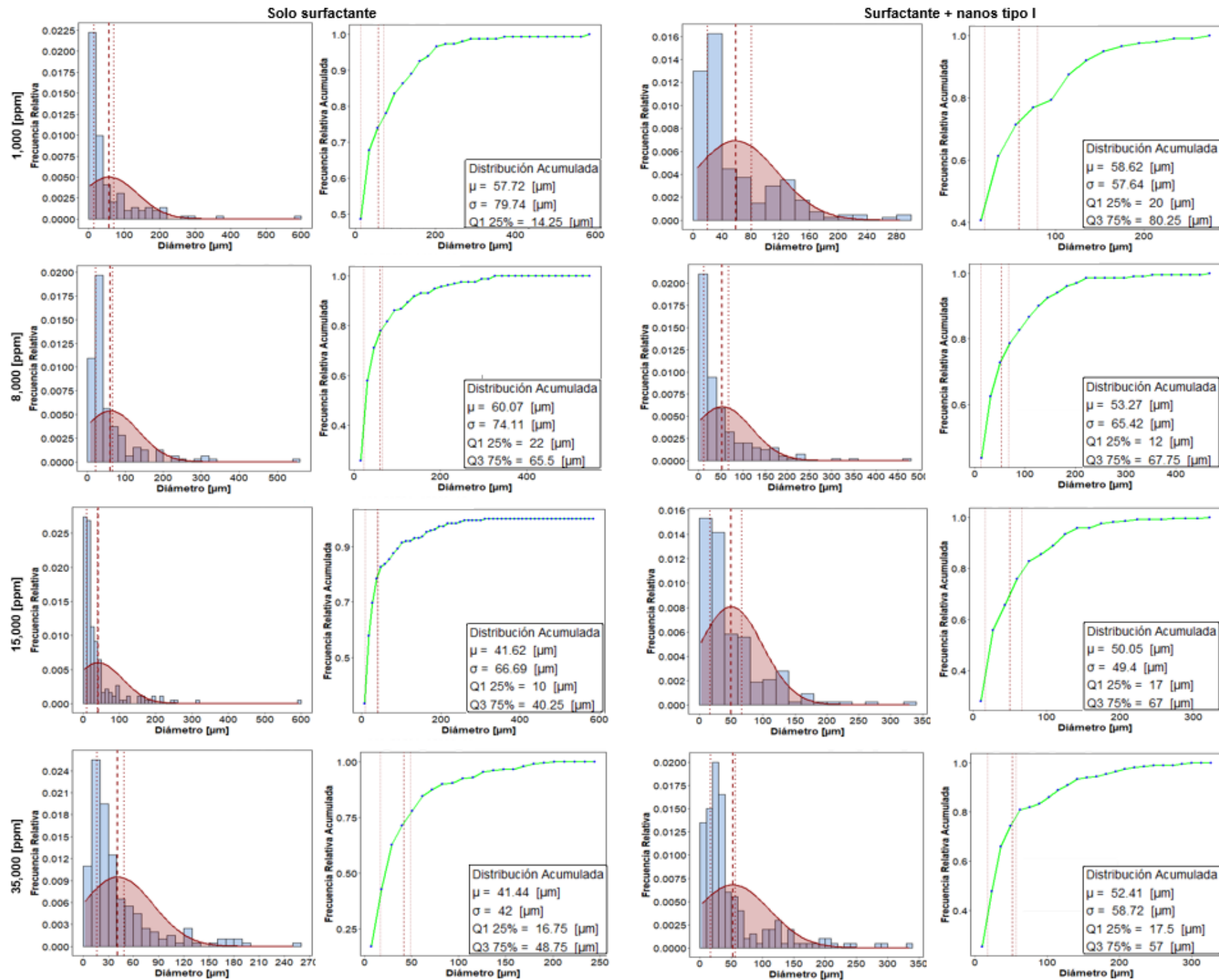


Figura 31. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 50:50, salinidad de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 31** se observa que las emulsiones preparadas con surfactante y nanopartículas presentan menor desviación estándar, el tamaño promedio de gota es similar en ambos grupos y no se observa algún patrón en específico. Todas presentan un sesgo hacia la izquierda y asimetría positiva. Las emulsiones preparadas con nanopartículas de 1,000 y 15,000 ppm son bimodales. La emulsión que podría mostrar mayor estabilidad en este grupo, es la preparada con surfactante y salmuera de 35,000 ppm ($\mu = 41.44 \mu\text{m}$, $\sigma = 42 \mu\text{m}$).

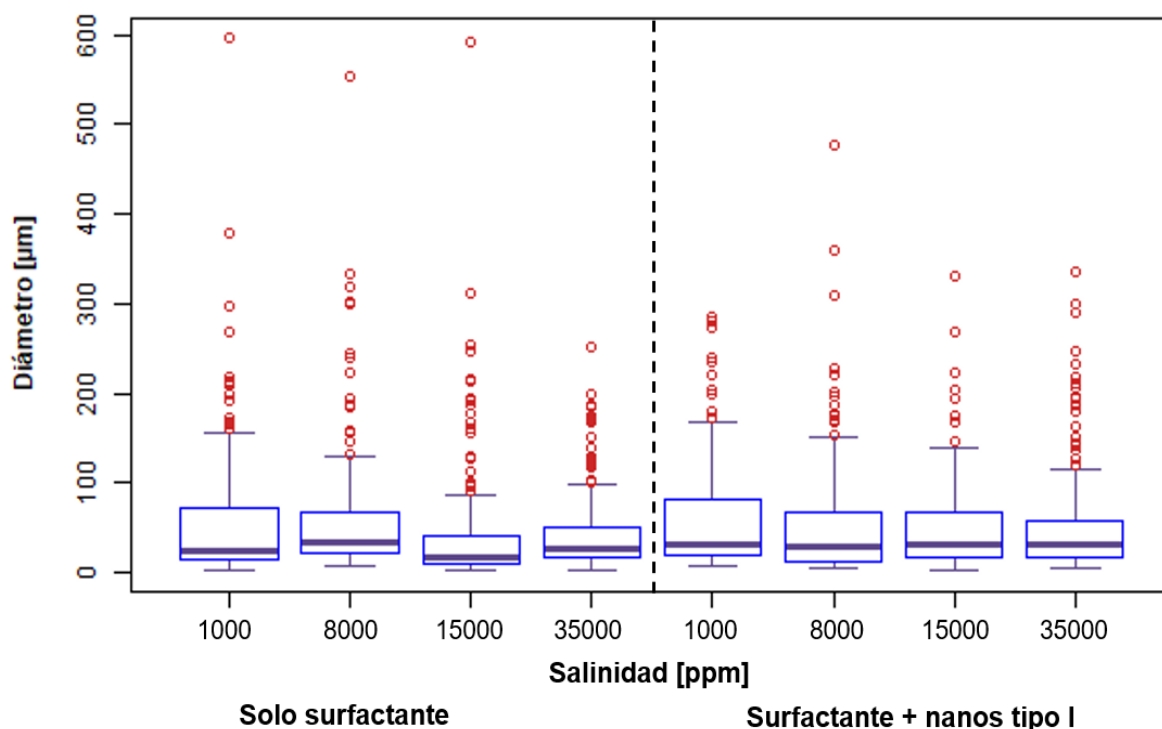


Figura 32. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 50:50, salinidad de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 [ppm], con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 32** se comparan las emulsiones de ambos grupos, destacando que todas presentan datos atípicos que sobresalen de la parte superior del gráfico, siendo la emulsión de 35,000 ppm con solo surfactante la que presenta mejor relación de los datos.

d) Comparación 4. Mismo corte de agua y salinidad, variación en el tiempo: se comparan seis emulsiones de corte 30:70, salinidad de 15,000 ppm con y sin nanopartículas a 0, 7 y 30 días para evaluar los cambios en el tamaño de gota transcurrido el tiempo.

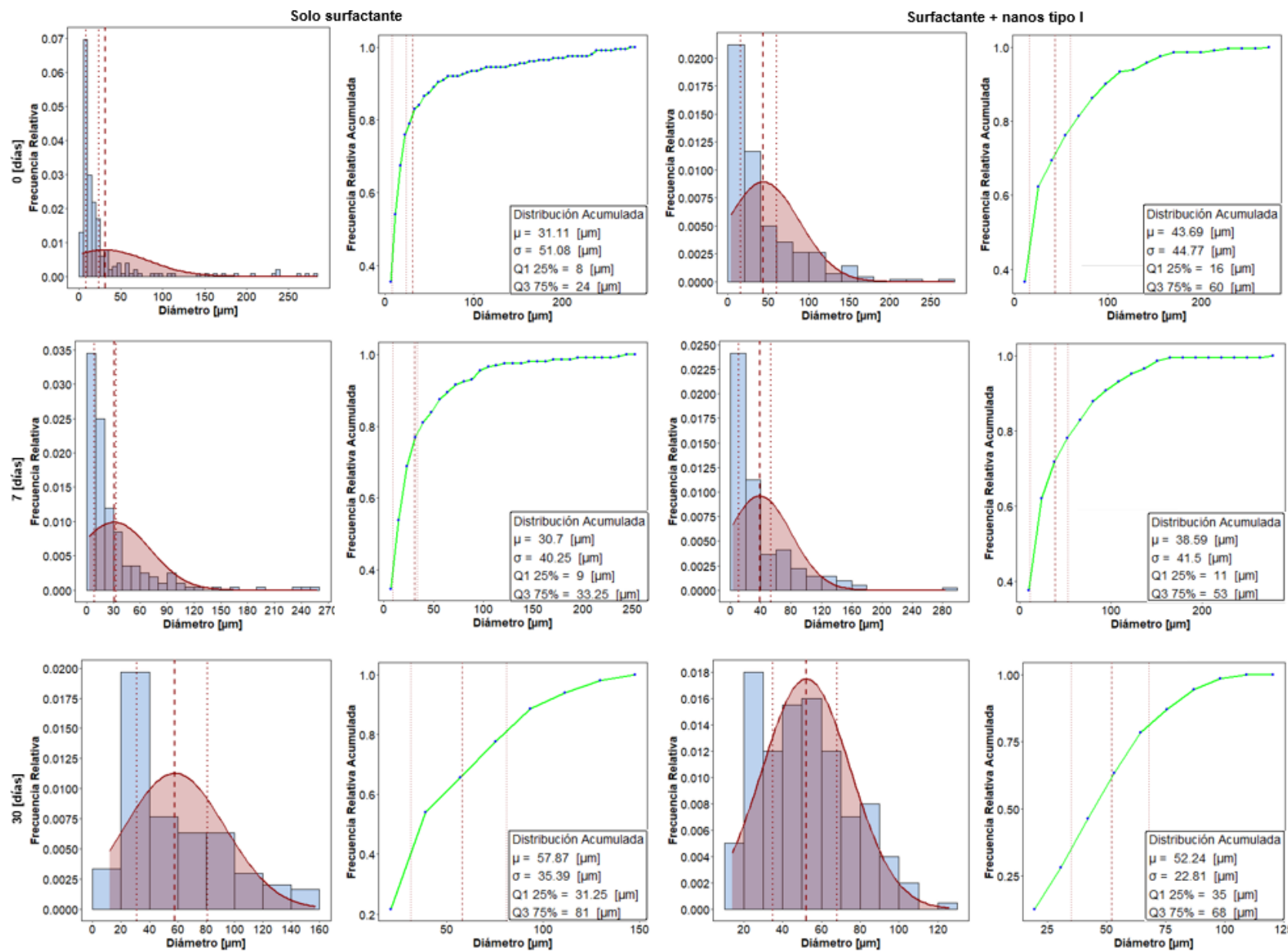


Figura 33. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, salinidad de 15,000 [ppm] con y sin nanopartículas añadidas. Gráficas generadas con R. 61

En la **Figura 33** se observa que las emulsiones presentan mayor estabilidad durante los primeros días desde su preparación porque presentan un tamaño de gota menor ($\mu = 30.7$ y $38.59 \mu\text{m}$). Se observa que la estabilidad de las emulsiones disminuye progresivamente, ya que al día 30, el tamaño promedio de las gotas es mayor. De ambos grupos, la emulsión preparada solo con surfactante, presenta menor tamaño de gotas durante los primeros 7 días.

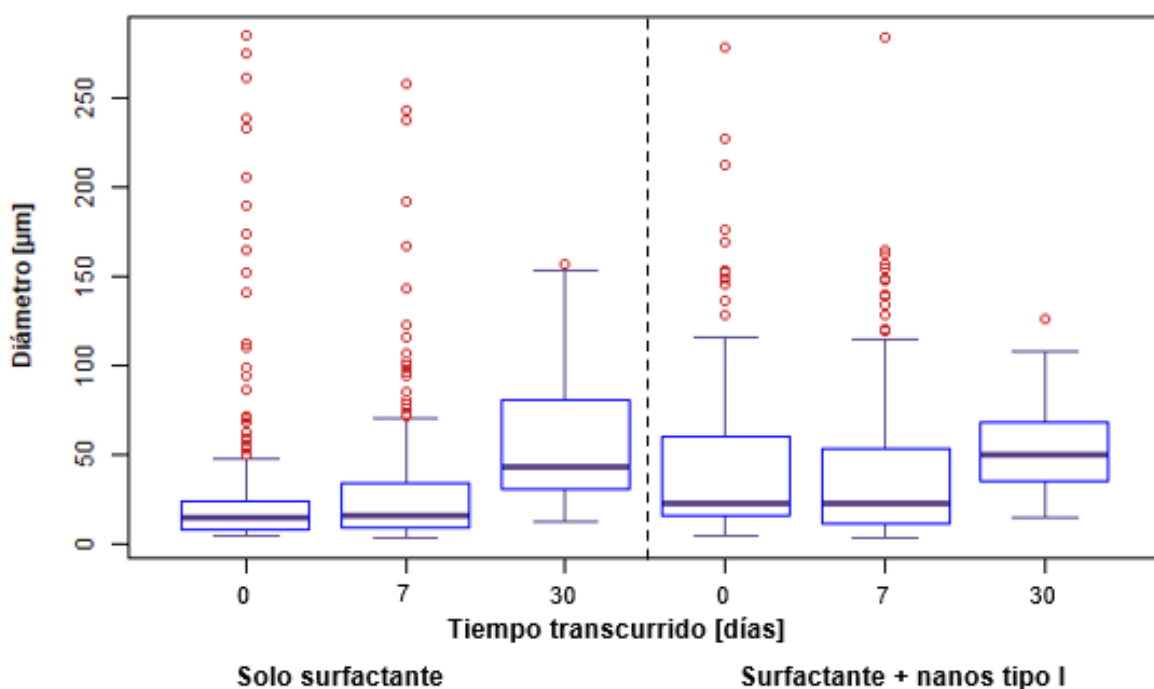


Figura 34. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, salinidad de 15,000 [ppm] con y sin nanopartículas. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 34** se observa que en los primeros días las emulsiones presentan mayor cantidad de valores atípicos respecto al día 30, no obstante el tamaño promedio de gota es considerablemente menor, esto se debe a que en los primeros días las emulsiones presentan mayor heterogeneidad o dispersión del tamaño de gota, mientras que transcurridos los días se va rompiendo la emulsión y éstas se vuelven más uniformes aumentando el tamaño promedio.

4.4.2 Emulsiones con petróleo crudo

a) Comparación 1. Misma salinidad, diferente corte de agua: se comparan seis emulsiones con salinidad de 37,117.34 ppm, salmuera M2, tres de éstas contienen solo surfactante y las otras tres contienen surfactante más nanopartículas tipo II. Los cortes de agua son de 30:70, 50:50 y 70:30.

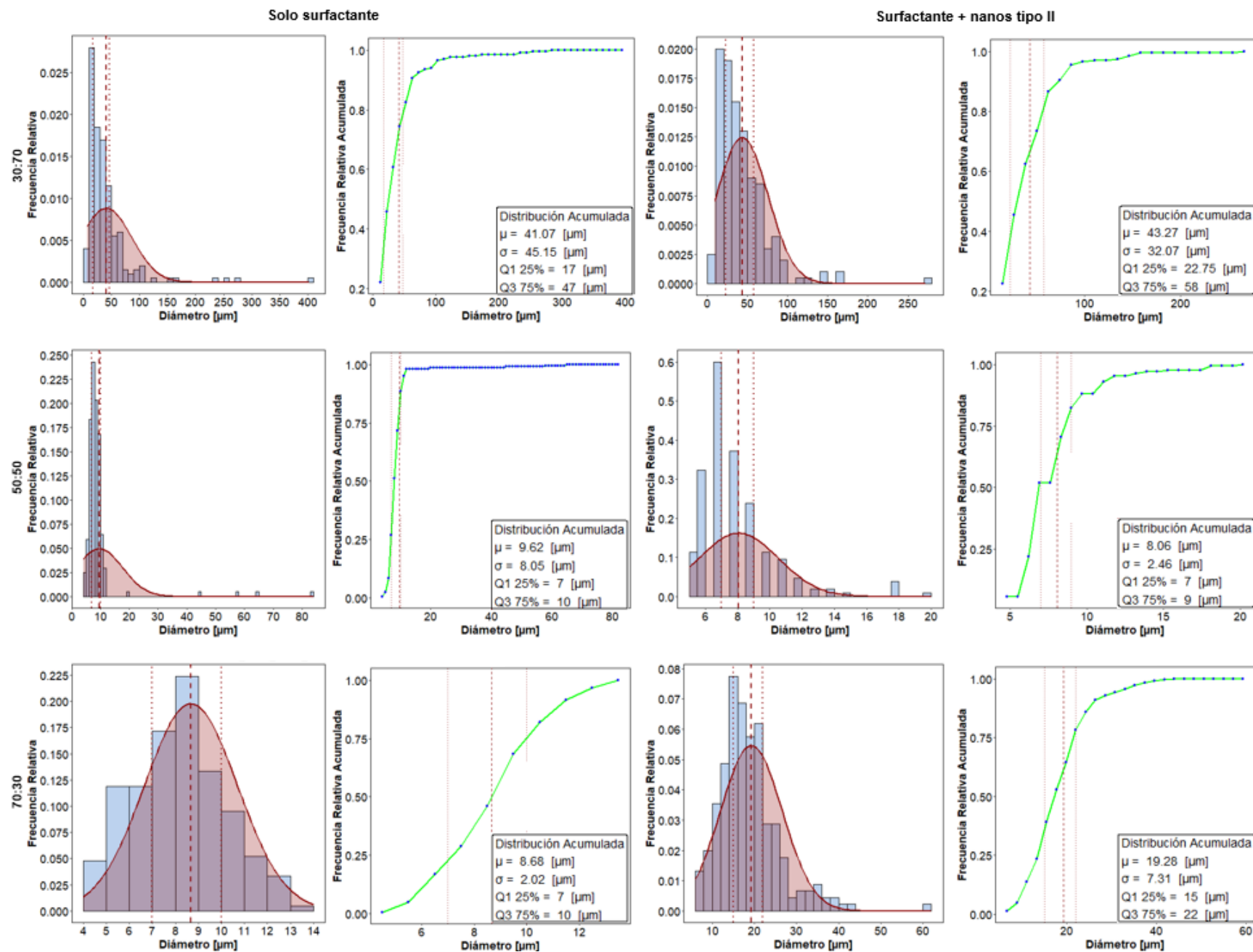


Figura 35. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50:50 y 70:30, salinidad de 37,117.34 [ppm]. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 35** se observa que a medida que aumenta el corte de agua, las emulsiones tienden a adoptar una simetría en cuanto a la distribución de los datos, manteniendo un sesgo hacia la izquierda, así como una disminución considerable en el tamaño promedio de gota. La desviación estándar también disminuye.

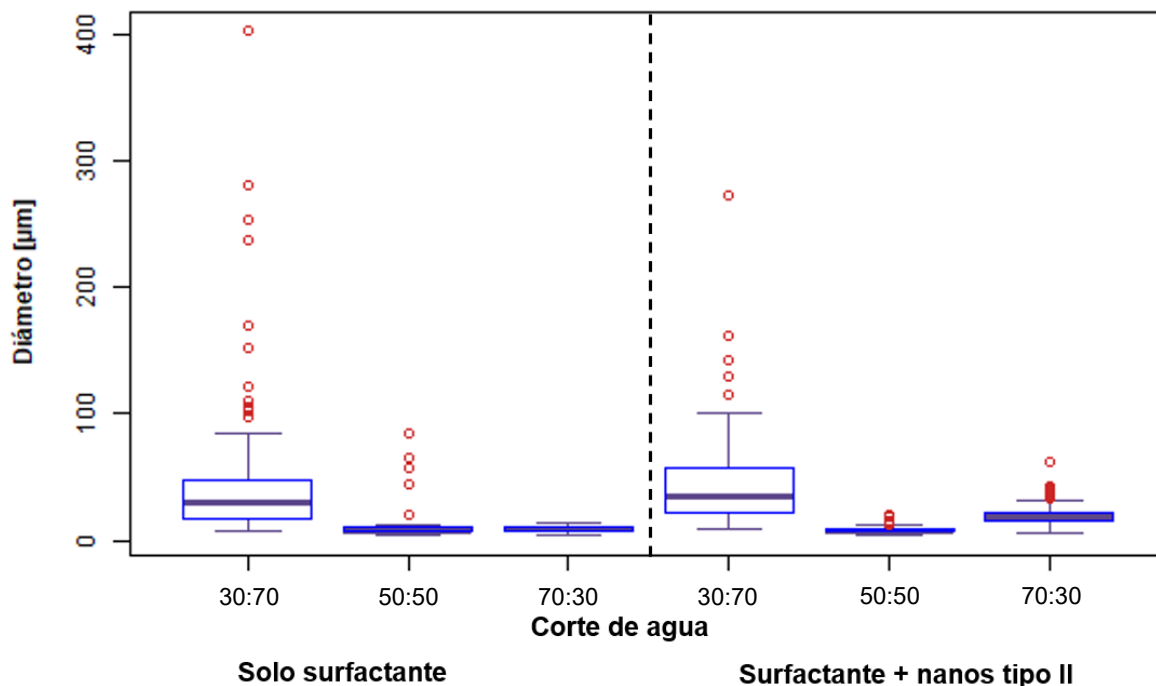


Figura 36. Comparación del tamaño de gota. Emulsiones 30:70, 50-50-,1 y 70:30, salinidad de 37,117.34 [ppm]. Gráficas generadas con R.

En la **Figura 36** se observa que las emulsiones con corte 30:70 presentan más valores atípicos y mayor tamaño promedio de gotas que el resto, siendo la emulsión 70:30 preparada únicamente con surfactante la que presenta mejor relación de los datos, lo que indica tamaño de gotas más homogéneas y de menor tamaño, por lo que se asume que es la más estable de ambos grupos.

b) Comparación 2. Mismo corte de agua, diferente salinidad: se comparan diez emulsiones de corte 50:50, la mitad de éstas solo con surfactante y las demás con nanopartículas tipo II. La salinidad de las emulsiones varió desde 1,738.61 hasta 37,117.34 ppm, ver **Tabla 8**.

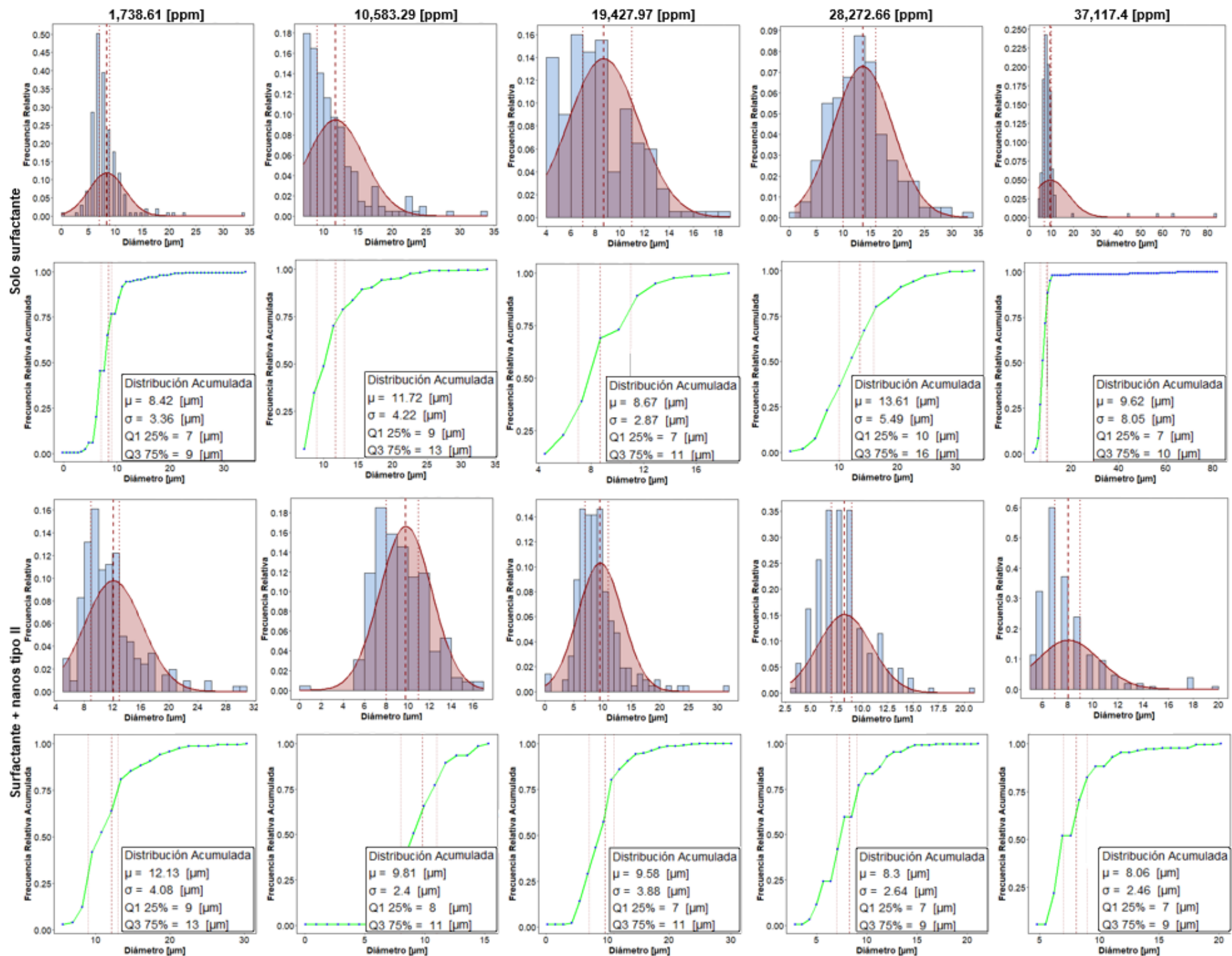


Figura 37. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 50:50 con y sin nanopartículas añadidas, salinidades de 1,738.61, 10,583.29, 19,427.97, 28,272.66 y 37,117.34 [ppm]. Graficas generadas con R.

En la **Figura 37** se observa que el tamaño promedio de gota y desviación, permanecen relativamente pequeños en comparación con otros grupos de emulsiones descritas anteriormente, destacando que tienden a una distribución simétrica y normalizada aquellas que presentan valores intermedios de salinidad, sin importar si se utilizaron o no nanopartículas para su preparación. No se observan patrones específicos para la desviación estándar, la mayoría de las emulsiones muestra un comportamiento multimodal.

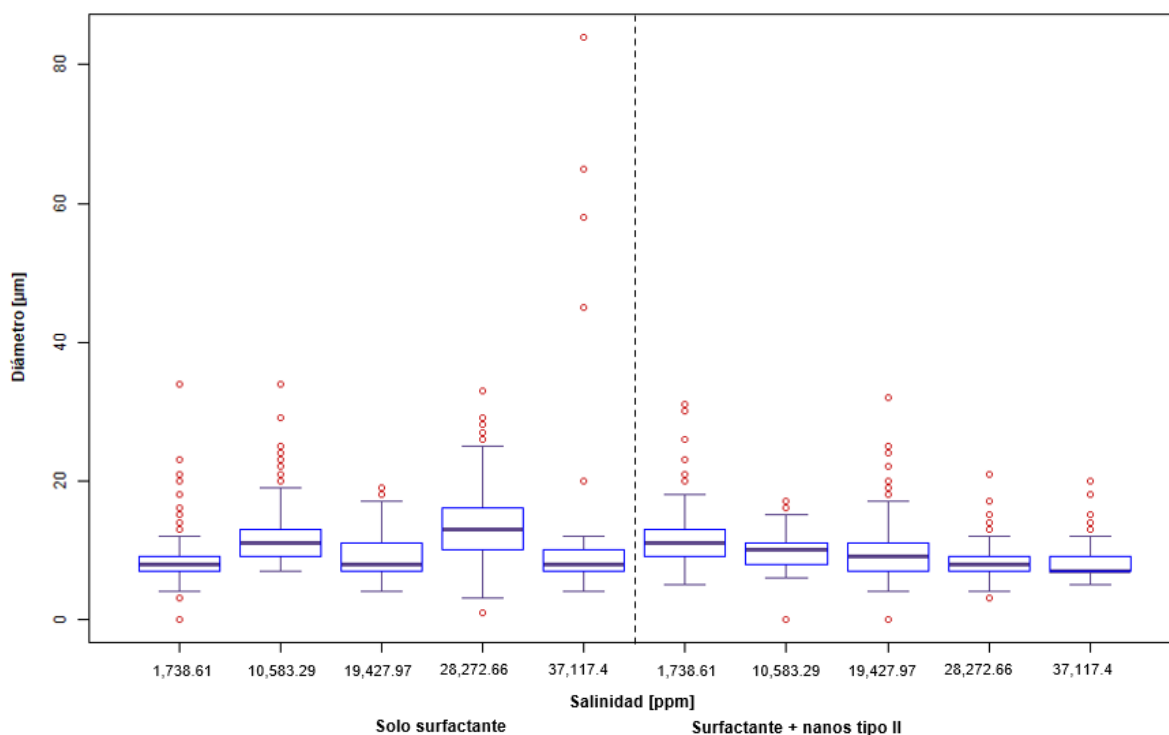


Figura 38. Distribución del tamaño de gota. Emulsiones 50:50 con y sin nanopartículas añadidas, salinidades desde 1,738.61 (M1) hasta 37,117.34 [ppm] (M2). Graficas generadas con R.

En la **Figura 38** se observa que las emulsiones con niveles intermedios de salinidad presentan menos valores atípicos que el resto, así como una tendencia decreciente en el promedio del tamaño de gota para aquellas que contienen nanopartículas tipo II. La emulsión que muestra mejor relación de los datos entre sí ($\sigma = 2.4 \mu\text{m}$) es la preparada con surfactante y nanopartículas tipo II de 10,583.29 ppm (75% M1 y 25% M2), ya que casi no presenta datos atípicos, por lo que el tamaño de gota es más homogéneo.

4.5 Planteamiento de Aplicación en Recuperación Mejorada (EOR)

Los resultados obtenidos en este trabajo experimental permiten plantear un escenario hipotético de aplicación en procesos de recuperación mejorada (EOR) mediante la inyección de nanofluidos en yacimientos de crudo pesado a

extrapesado. El propósito sería incrementar el factor de recuperación a través de dos mecanismos principales: la reducción de la viscosidad del crudo in situ y la alteración de la mojabilidad de la roca.

Escenario de aplicación propuesto

Se considera un campo maduro productor de crudo pesado (10–15 °API), con alta salinidad en el agua de formación (20,000–40,000 ppm de sólidos disueltos totales) y temperatura moderada (50–80 °C), condiciones compatibles con la estabilidad térmica de los componentes. La formación correspondería a una arenisca con mojabilidad preferencial al aceite, donde la inyección de agua convencional presenta una baja eficiencia de desplazamiento.

Estrategia de inyección

Se plantea la inyección de un bache de nanofluido compuesto por:

1. Fase acuosa: agua de producción tratada con salinidad de 15,000–25,000 ppm.
2. Surfactante: Nonilfenol etoxilado (NFE) al 1% v/v.
3. Nanopartículas: sílice tipo II (6851HN) modificada con grupos amino, a una concentración de 0.1% p/p.

Justificación técnica basada en los resultados

Los experimentos de laboratorio demostraron que la combinación Nano II + NFE genera emulsiones de petróleo crudo con gotas finas y homogéneas (~8–10 µm), especialmente con cortes agua-aceite 70:30, lo que podría favorecer la formación in situ de emulsiones aceite-en-agua (O/W) de baja viscosidad. Este comportamiento mejora la movilidad del crudo y facilita su desplazamiento hacia los pozos productores.

Asimismo, el sistema mostró alta compatibilidad con salinidades intermedias a elevadas, lo que permitiría aprovechar el agua de formación sin requerir procesos costosos de desalinización. Otro resultado destacado fue la reducción significativa de la tensión interfacial (IFT), alcanzando valores del orden de 0.05 mN/m, lo que favorece la liberación del aceite atrapado en los poros finos de la roca.

Finalmente, aunque no se midió directamente, se infiere que las nanopartículas modificadas con grupos amino podrían contribuir a la alteración de la mojabilidad de

la roca hacia un estado más neutro o preferencial al agua, facilitando el desplazamiento del crudo adherido a la superficie del poro.

Este planteamiento hipotético ejemplifica cómo los hallazgos de laboratorio pueden servir como base para diseñar procesos EOR adaptados a condiciones específicas de yacimiento, aportando una posible ruta de aplicación tecnológica a los resultados experimentales obtenidos.

5 Conclusiones

El presente trabajo permitió analizar el comportamiento de emulsiones preparadas con distintas combinaciones de salmueras, nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2) y surfactante, evaluando su estabilidad a través del tamaño de las gotas y las propiedades de tensión superficial e interfacial.

En función de los resultados obtenidos, se logró cumplir con el objetivo general de la investigación, esto es, organizar y analizar datos experimentales para evaluar los cambios significativos y efectos combinados en la estabilidad de emulsiones formadas con nanofluidos. Por un lado la caracterización de las nanopartículas validó su calidad y uniformidad, lo que confirmó su idoneidad para los experimentos. Una recomendación en general sería replicar este tipo de análisis para el uso de diferentes productos que se deseen utilizar en la preparación de emulsiones.

Por otro lado se observó que la combinación de nanopartículas con surfactantes generó una mayor reducción en la tensión interfacial, favoreciendo la formación de emulsiones más estables. La diferencia de iones en las salmueras causa cambios en el desempeño del surfactante, pues se dan diferentes interacciones entre el surfactante y los iones en disolución (Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) que repercuten en la estabilidad de las emulsiones; aunque es un factor difícil de controlar en el yacimiento donde se tiene contacto con agua de formación y existen diversos iones, es valioso realizar el análisis individual para entender cuales iones tienen mayor interacción con el surfactante en casos donde haya salmueras con una composición química más compleja. De acuerdo con los resultados de las pruebas de suspensión, se recomienda utilizar las nanopartículas de tipo I, ya que tardan más tiempo en precipitar.

Se identificaron patrones como la disminución del tamaño promedio de las gotas en las emulsiones preparadas con aceite mineral de proporción 50:50 y salinidad desde 15,000 a 35,000 ppm, mientras que las preparadas con petróleo crudo de proporción 50:50, salinidad desde 10,585 a 37,117 ppm con nanopartículas tipo II presentaron igualmente menor tamaño de gotas promedio. Esto supone una mejor distribución y estabilidad, además de un panorama óptimo para ser utilizadas en ambientes de alta salinidad. Por otro lado, se observó que las emulsiones presentan valores atípicos en las primeras horas de su elaboración, debido a que las emulsiones se consideran sistemas termodinámicamente inestables y que a tiempos cortos presentan cambios físicos que alteran la homogeneidad de las gotas. Cabe señalar que, mejores indicadores estadísticos como el tamaño promedio y desviación estándar no implican que una emulsión sea más estable a los 30 días respecto al día 0. Para las condiciones probadas de este estudio, el surfactante no-iónico es

suficiente para estabilizar emulsiones en los rangos de salinidad y proporciones de agua mencionadas, por lo que no necesariamente requieren del uso de nanopartículas para su formación.^[X]

El uso del software R para el análisis estadístico resultó fundamental para procesar eficientemente los datos recopilados de los diferentes experimentos, automatizando la generación de gráficas y el cálculo estadístico. Para este trabajo destacan la librería *ggplot2* y la función *nclass.FD* que utiliza un modelo propuesto por David A. Freedman y Persi Diaconis (1981), el cual considera el rango intercuartil como un estimador para determinar el número de clases óptimo, lo cual es ideal para series de datos que presentan múltiples valores atípicos. ^[40, XI]

No obstante, el conteo manual de las gotas de emulsión o de las nanopartículas representó una limitación, ya que restringe considerablemente el número de elementos a procesar en el modelo, así mismo la precisión con la que se toman las mediciones, destacando la necesidad de implementar técnicas automatizadas de procesamiento de imágenes para futuras investigaciones. Recientemente, nuestro grupo de trabajo reportó el desarrollo de una herramienta para *“analizar micrografías de emulsiones, identificando y diferenciando con claridad las gotas de las impurezas y ruido ambiental”* mediante la biblioteca *Skimage*, la cual permite el procesamiento, manipulación y análisis de imágenes con alta precisión. ^[41]

Finalmente, se recomienda ampliar el estudio experimental hacia condiciones más cercanas a las de yacimiento y considerar el uso de técnicas avanzadas, como algoritmos de machine learning, para mejorar la interpretación de resultados y optimizar el proceso de análisis estadístico, considerando este trabajo como un primer acercamiento.

^[X] En el **Anexo I** se pueden consultar resultados complementarios, así como otras formas de presentar visualmente la información (gráficos de barras y variación porcentual) que remarcan algunas diferencias de los métodos de análisis.

^[XI] Para mayor detalle sobre el proceso de automatización y análisis estadístico de este trabajo, se sugiere consultar las líneas de código en el **Anexo III**.

Anexos

Anexo I. Resultados complementarios

Tabla 16. Clasificación de las muestras para evaluación de la suspensión de nanopartículas.

Grupos	Descripción	Grupos	Salinidad [ppm]
A	Nanopartículas tipo I al 0.1%.	I (Control)	Agua destilada
B	Grupo A + surfactante NFE al 1%.	II	100M1 → 1,738
C	Nanopartículas tipo II al 0.1%.	III	50M1 50M2 → 19,427
D	Grupo C + surfactante NFE al 1%.	IV	100M2 → 37,117

Tabla 17. Composición química de las muestras de fluidos.

Propiedades	M1	50M1 50M2	M2	Surfactante	Nanopartículas
Densidad $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1.0015	1.0145	1.0275	1.06	
Volumen [mL]	15	15	15		
Masa salmuera [g]	14.978	14.786	14.599		
Concentración [%]				1	0.1
Masa NFE [g]	0.150	0.148	0.146		
Volumen surfactante [mL]	0.141	0.139	0.138		
Masa nano [g]	0.0150	0.0148	0.0146		

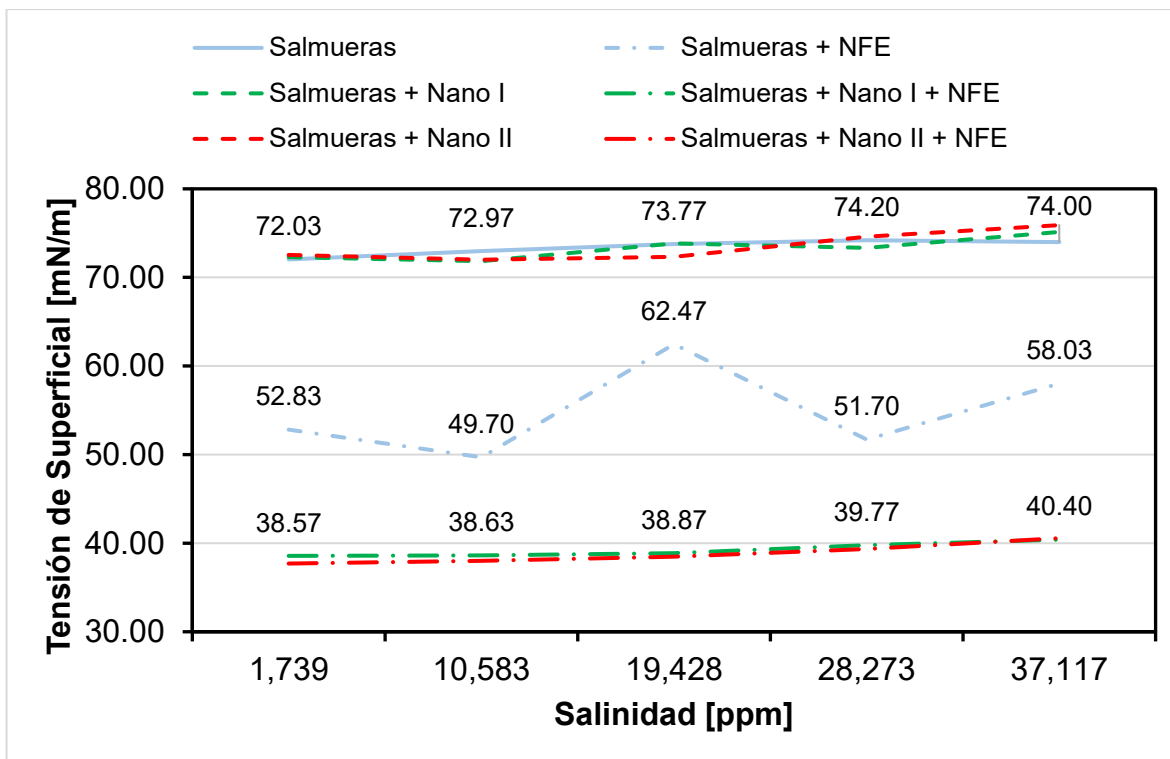


Figura 39. Tensión superficial medida a 30 [ms]. Gráfico generado en Excel.

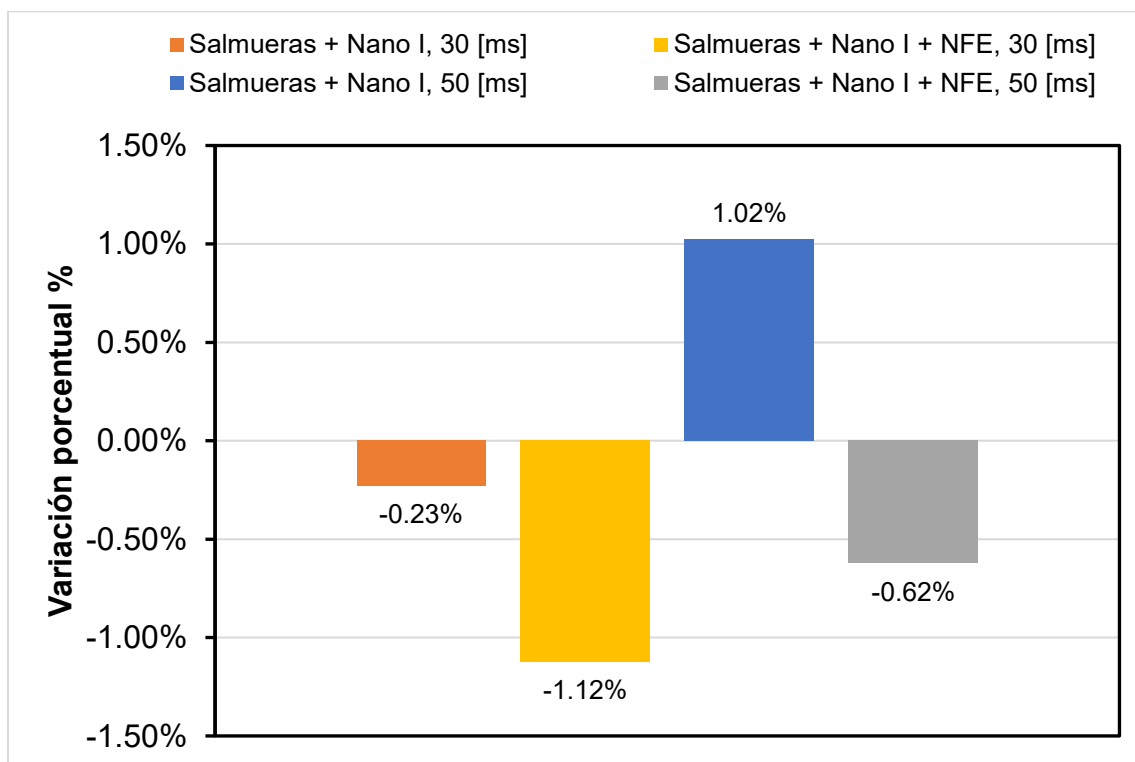


Figura 40. Variación porcentual de la tensión superficial debido al exceso de nanopartículas. Gráfico generado en Excel.

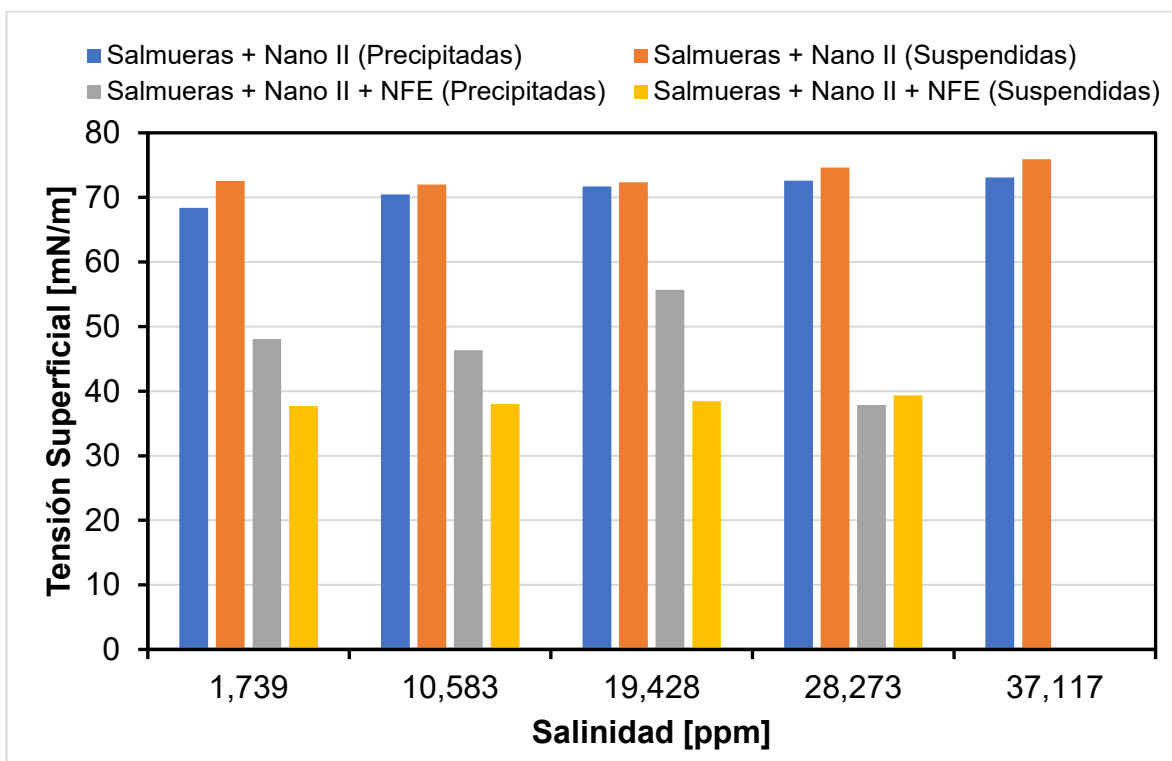


Figura 41. Comparación de tensión superficial a 30 [ms]. Gráfico generado en Excel.

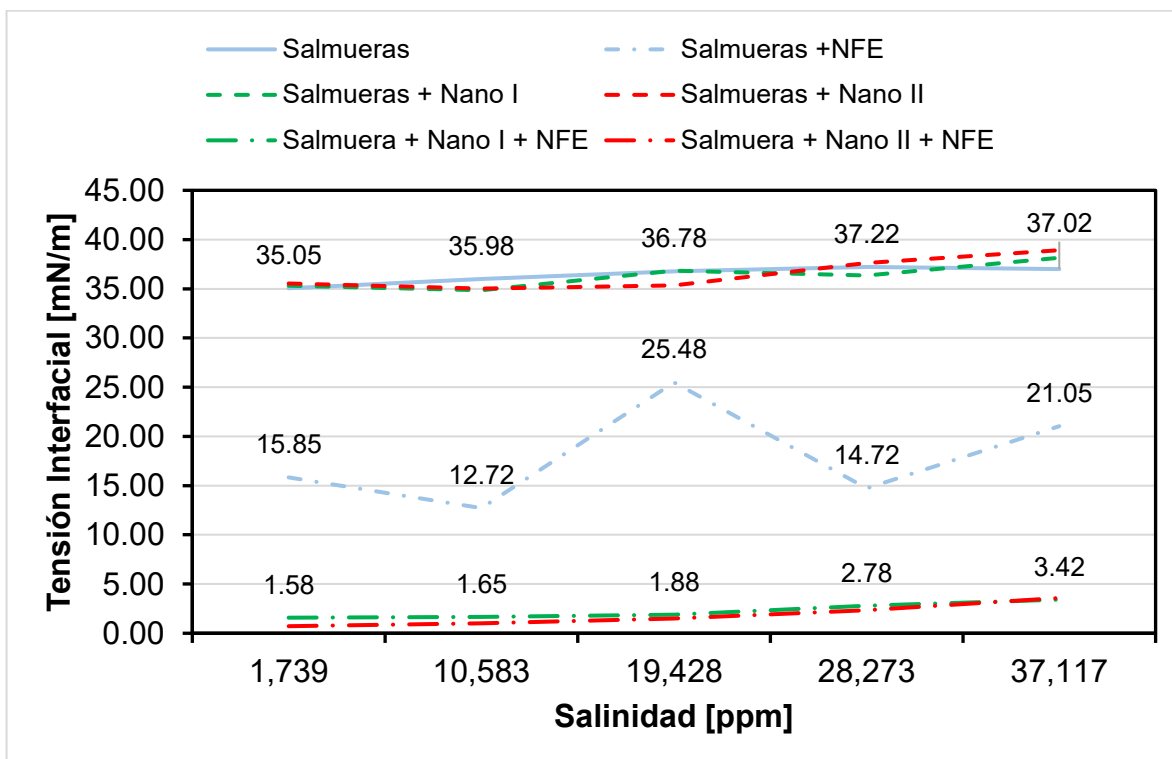


Figura 42. Tensión interfacial calculada, medición a 30 [ms]. Gráfico generado en Excel.

Tabla 18. Cálculo de la tensión interfacial mediante la correlación de Antonov.

Tensión Interfacial [mN/m]						
Tipo de salmuera		M1	M1 M2			M2
Proporción [%]		100	75/25	50/50	25/75	100
tiempo [ms]	Salinidad [ppm]	1738.61	10583.29	19427.98	28272.66	37117.34
50	Sin agregados	46.05	49.45	53.22	51.62	52.82
30	Sin agregados	35.05	35.98	36.78	37.22	37.02
50	Nanopartículas tipo I	34.62	35.05	35.98	37.72	38.42
30	Nanopartículas tipo I	35.32	34.85	36.85	36.35	38.15
50	Nanopartículas tipo II	35.08	34.05	36.65	37.62	39.98
30	Nanopartículas tipo II	35.55	35.02	35.35	37.62	38.92
50	NFE	16.75	14.98	33.15	20.18	28.78
30	NFE	15.85	12.72	25.48	14.72	21.05
50	Nanopartículas tipo I + NFE	0.45	0.52	0.65	1.02	1.78
30	Nanopartículas tipo I + NFE	1.58	1.65	1.88	2.78	3.42
50	Nanopartículas tipo II + NFE	0.38	0.22	0.05	0.82	1.52
30	Nanopartículas tipo II + NFE	0.72	1.02	1.48	2.35	3.58

Anexo II. Resumen estadístico de las muestras

Tabla 19. Resumen estadístico del tamaño de nanopartículas.

Nanos	Tipo I	Tipo II
n_datos	281	311
Min.	8.31	9.29
1er Qu.	15.99	16.41
Mediana	18.53	18.83
Media	18.43	19.45
3er Qu.	20.5	21.54
Max.	35.46	38.87
Rango	27.15	29.58
Varianza	11.55	21.38
Desv_est	3.4	4.62
RIC	4.51	5.12
Coef_var	0.18	0.24
Error_est	0.2	0.26
Curtosis	4.99	4.77
Asimetría	0.41	0.98

Tabla 20. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral, salinidad de 15,000 ppm y corte 30:70.

Iones	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺
n_datos	201	210	215
Min.	4	5	4
1er Qu.	8	21.25	19
Mediana	14	43	29
Media	31.11	45.21	46.14
3er Qu.	24	63	60.5
Max.	285	123	265
Rango	281	118	261
Varianza	2609.21	713.25	1706.97
Desv_est	51.08	26.71	41.32
RIC	16	41.75	41.5
Coef_var	1.64	0.59	0.9
Error_est	3.6	1.84	2.82
Curtosis	13.85	2.6	8.17
Asimetría	3.3	0.54	2.01

Tabla 21. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral, salinidad de 35,000 ppm, cortes 30:70, 50:50, y 70:30 con y sin nanopartículas tipo I.

35,000 [ppm]	Solo NFE			NFE + Nanos tipo I		
Corte de agua	30:70	50:50	70:30	30:70	50:50	70:30
n_datos	203	200	170	210	200	210
Min.	4	2	3	4	4	3
1er Qu.	16.5	16.75	7	13	17.5	17
Mediana	28	26	11	22.5	32	29
Media	47.64	41.44	34.09	39.95	52.41	46.7
3er Qu.	66.5	48.75	29	48	57	52
Max.	200	251	395	204	335	520
Rango	196	249	392	200	331	517
Varianza	1923.65	1764.33	3459.33	1732.73	3448.56	3797.07
Desv_est	43.86	42	58.82	41.63	58.72	61.62
RIC	50	32	22	35	39.5	35
Coef_var	0.92	1.01	1.73	1.04	1.12	1.32
Error_est	3.08	2.97	4.51	2.87	4.15	4.25
Curtosis	4.3	8.43	14.96	6.18	8.58	29.99
Asimetría	1.45	2.25	3.26	1.86	2.28	4.54

Tabla 22. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral de corte 50:50, con y sin nanopartículas de tipo I. Salinidades de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 ppm.

50:50	Solo NFE				NFE + Nanos tipo I			
Salinidad [ppm]	1000	8000	15000	35000	1000	8000	15000	35000
n_datos	146	160	186	200	200	202	215	200
Min.	3	7	3	2	6	4	3	4
1er Qu.	14.25	22	10	16.75	20	12	17	17.5
Mediana	24	33.5	17	26	31.5	28	32	32
Media	57.72	60.07	41.62	41.44	58.62	53.27	50.05	52.41
3er Qu.	70.75	65.5	40.25	48.75	80.25	67.75	67	57
Max.	596	553	593	251	285	476	330	335
Rango	593	546	590	249	279	472	327	331
Varianza	6358.85	5492.25	4447.9	1764.33	3321.84	4280.06	2440.84	3448.56
Desv_est	79.74	74.11	66.69	42	57.64	65.42	49.4	58.72
RIC	56.5	43.5	30.25	32	60.25	55.75	50	39.5
Coef_var	1.38	1.23	1.6	1.01	0.98	1.23	0.99	1.12
Error_est	6.6	5.86	4.89	2.97	4.08	4.6	3.37	4.15
Curtosis	17.96	16.91	29.22	8.43	5.77	13.91	9.45	8.58
Asimetría	3.25	3.27	4.3	2.25	1.71	2.79	2.18	2.28

Tabla 23. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de aceite mineral de corte 30:70 y salinidad de 15,000 ppm a 0, 7 y 30 días.

30:70 y 15,000 [ppm]	Solo NFE			NFE + Nanos tipo I		
t [días]	0	7	30	0	7	30
n_datos	201	200	150	210	205	200
Min.	4	3	12	4	3	14
1er Qu.	8	9	31.25	16	11	35
Mediana	14	16	43	23	22	50
Media	31.11	30.7	57.87	43.69	38.59	52.24
3er Qu.	24	33.25	81	60	53	68
Max.	285	258	157	279	284	126
Rango	281	255	145	275	281	112
Varianza	2609.21	1619.76	1252.57	2004.35	1722.66	520.21
Desv_est	51.08	40.25	35.39	44.77	41.5	22.81
RIC	16	24.25	49.75	44	42	33
Coef_var	1.64	1.31	0.61	1.02	1.08	0.44
Error_est	3.6	2.85	2.89	3.09	2.9	1.61
Curtosis	13.85	15.55	3.11	8.2	9.25	2.66
Asimetría	3.3	3.24	0.98	2.09	2.16	0.5

Tabla 24. Resumen estadístico del tamaño de gota para emulsiones de petróleo crudo con salinidad de 37,117.34 ppm (100M2) y corte de agua de 30:70, 50:50 y 70:30.

37,117.34 [ppm]	Solo NFE			NFE + Nanos tipo II		
Corte de agua	30:70	50:50	70:30	30:70	50:50	70:30
n_datos	200	202	210	210	200	226
Min.	7	4	4	5	9	6
1er Qu.	17	7	7	7	22.75	15
Median	30	8	9	7	35.5	18
Media	41.07	9.62	8.68	8.06	43.27	19.28
3er Qu.	47	10	10	9	58	22
Max.	402	84	14	20	272	62
Rango	395	80	10	15	263	56
Varianza	2038.48	64.85	4.08	6.05	1028.24	53.38
Desv_est	45.15	8.05	2.02	2.46	32.07	7.31
RIC	30	3	3	2	35.25	7
Coef_var	1.1	0.84	0.23	0.31	0.74	0.38
Error_est	3.19	0.57	0.14	0.17	2.27	0.49
Curtosis	29.67	55.97	2.57	9.09	16.71	8.23
Asimetría	4.52	7.05	0.16	2.12	2.82	1.58

Tabla 25. Resumen estadístico de tamaño de gota para emulsiones de petróleo crudo, corte 50:50 y diferente salinidad.

50:50	Solo NFE					NFE + Nanos tipo II				
Salmueras	100M1	75M1 25M2	50M1 50M2	25M1 75M2	100M2	100M1	75M1 25M2	50M1 50M2	25M1 75M2	100M2
Salinidad [ppm]	1,738.61	10,583.29	19,427.97	28,272.66	37,117.34	1,738.61	10,583.29	19,427.97	28,272.66	37,117.34
n_datos	203	206	200	200	202	205	227	212	210	210
Min.	0.1	7	4	0.98	4	5	0.1	0.1	3	5
1er Qu.	7	9	7	10	7	9	8	7	7	7
Mediana	8	11	8	13	8	11	10	9	8	7
Media	8.42	11.72	8.67	13.61	9.62	12.13	9.81	9.58	8.3	8.06
3er Qu.	9	13	11	16	10	13	11	11	9	9
Max.	34	34	19	33	84	31	17	32	21	20
Rango	34	27	15	32.02	80	26	17	32	18	15
Varianza	11.3	17.79	8.23	30.11	64.85	16.66	5.76	15.06	6.97	6.05
Desv_est	3.36	4.22	2.87	5.49	8.05	4.08	2.4	3.88	2.64	2.46
RIC	2	4	4	6	3	4	3	4	2	2
Coef_var	0.4	0.36	0.33	0.4	0.84	0.34	0.24	0.41	0.32	0.31
Error_est	0.24	0.29	0.2	0.39	0.57	0.29	0.16	0.27	0.18	0.17
Curtosis	21.57	8.35	3.46	3.54	55.97	7.09	3.83	9.87	5.36	9.09
Asimetría	3.3	2.01	0.74	0.61	7.05	1.67	0.3	1.8	1.11	2.12

Anexo III. Scripts de R

a) Histograma

```
## Instalar librerías
install.packages("tools")
install.packages("readr")
install.packages("dplyr")
install.packages("moments")
install.packages("ggplot2")
install.packages("grDevices")

## Carga de librerías
library(tools) # Librería que habilita herramientas
library(readr) # Librería que facilita la lectura de .csv
library(dplyr) # Librería para manipulación de datos
library(moments) # Librería para análisis estadístico
library(ggplot2) # Librería para construir gráficas
library(grDevices) # Librería para exportar las gráficas

## Asignar el directorio de trabajo
setwd("C:/Users/cesar/OneDrive - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO/Escuela/Licenciatura/Titulación/Tesina/R_Scripts_LIRFFF/Fuente")
getwd()

## Listado de archivos en una carpeta
ruta_carpeta <- "C:/Users/cesar/OneDrive - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO/Escuela/Licenciatura/Titulación/Tesina/R_Scripts_LIRFFF/Fuente" # Ubicación de tu
carpeta
Fuente <- list.files(path = ruta_carpeta, pattern = ".csv", full.names = TRUE) # Lectura de archivos
con terminación .csv en esa carpeta

# Crea una lista vacía para almacenar los resultados de cada archivo
resultados <- list()

##### Bucle for que recorra todos los archivos de la carpeta para generar el resumen estadístico.#####
for (Archivo in Fuente) {

  # Carga el archivo en un data frame
  datos <- read.csv(Archivo)

  # Calcula el resumen estadístico de la columna "Length" y almacena los resultados (en la lista vacía
  previamente creada)
  tabla <- sapply(datos["Length"], summary, na.rm = TRUE)

  n_datos <- length(datos$Length)
  Rango <- max(datos["Length"]) - min(datos["Length"]) # Recorrido
  Varianza <- sapply(datos["Length"], var, na.rm=TRUE) # Varianza
```

```

Desv_est <- sapply(datos["Length"], sd, na.rm=TRUE) # Desviación Estándar
RIC <- sapply(datos["Length"], IQR, na.rm = TRUE) # Rango Inter cuartil

Coef_var <- Desv_est / mean(datos$Length) # Coeficiente de Variación
Error_est <- Desv_est / sqrt(n_datos) # Error Estándar
Curtosis <- kurtosis(datos["Length"]) # Curtosis Pearson
Skew <- skewness(datos["Length"]) # Simetría Fisher

rbind(n_datos, tabla, Rango, Varianza, Desv_est, RIC, Coef_var, Error_est, Curtosis, Skew) -> tabla

# Asigna el nombre del archivo correspondiente a cada columna creada
colnames(tabla) <- tools::file_path_sans_ext(basename(Archivo))
resultados[[basename(Archivo)]] <- tabla

}

# Combina los resultados en un único data frame
tabla_resultados <- round(do.call(cbind.data.frame, resultados),2)

# Imprime la tabla de resultados
print(tabla_resultados)

#### Bucle for que genera las gráficas de histograma ####

for (Archivo in Fuente) {

  # Carga el archivo en un data frame
  datos <- read.csv(Archivo)

  #crear las clases del histograma por el método de FD (1981)
  clases_FD <- pretty(range(datos$Length), nclass.FD(unlist(datos$Length), digits = 5), min.n = 1)

  # Dibujamos el histograma y construimos los ejes x,y
  base_plot <- ggplot(data.frame(datos$Length))
  draw_hist <- geom_histogram(breaks = clases_FD, color = "black", fill = "lightsteelblue2", aes(x =
datos$Length, after_stat(density)))

  x_axis <- scale_x_continuous(name="Diámetro [nm]", n.breaks = 10, limits=NULL)
  y_axis <- scale_y_continuous(name="Frecuencia Relativa", n.breaks = 10, limits=NULL)

  # Dibuja la curva de distribución normal y la rellena
  dist_nom <- geom_function(fun = dnorm, args = list(mean = mean(datos$Length), sd =
sd(datos$Length)), colour = "red4", linewidth = 1)
  fill_dist <- geom_area(stat = "function", fun = function(Length) dnorm(Length, mean =
mean(datos$Length), sd = sd(datos$Length)), fill = "red4", alpha = 0.25)

  # Dibuja una línea que cruza por la media, el 1st y 3rd cuartil.
  mid_line <- geom_vline(aes(xintercept = mean(datos$Length)), linetype = "dashed", linewidth = 1,
color = "red4")

```

```

Q1_line <- geom_vline(aes(xintercept = quantile(datos$Length, probs = 0.25, na.rm = TRUE)),
linetype = "dotted", linewidth = 0.75, color = "red4")
Q3_line <- geom_vline(aes(xintercept = quantile(datos$Length, probs = 0.75, na.rm = TRUE)),
linetype = "dotted", linewidth = 0.75, color = "red4")

body_plot <- base_plot + draw_hist + x_axis + y_axis + dist_nom + fill_dist + mid_line + Q1_line +
Q3_line

# Dibujar el marco, quitar el fondo de la gráfica e insertar el título
theme_plot <- theme_classic() + theme(panel.background = element_rect(fill = "white", color =
"black"), plot.title = element_text(size = 14, face = "bold", hjust = 0.95, vjust = 1)) +
  theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 18)) +
  theme(axis.text.y = element_text(color = "black", size = 18)) +
  theme(axis.title.x = element_text(size = 18, face = "bold")) +
  theme(axis.title.y = element_text(size = 18, face = "bold"))

title_plot <- labs(title = tools::file_path_sans_ext(basename(Archivo)))

# Combinar el gráfico con el título y el tema
plot_unified <- body_plot + title_plot + theme_plot

# Genera el nombre del archivo para cada gráfica
name_hist <- paste("C:/Users/cesar/OneDrive - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO/Escuela/Licenciatura/Titulación/Tesina/R_Scripts_LIRFFF/Histogramas_CSV/",
  tools::file_path_sans_ext(basename(Archivo)), ".png", sep = "")

# Guarda la gráfica en formato PNG en la carpeta específica

png(file = name_hist, width = 480, height = 480) # Puedes ajustar el ancho, alto y resolución
print(plot_unified)
dev.off()

}

```

b) Ojiva

```

## Listado de archivos en una carpeta
ruta_carpeta <- "C:/Users/cesar/OneDrive - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO/Escuela/Licenciatura/Titulación/Tesina/R_Scripts_LIRFFF/Fuente" # Ubicación de tu
carpeta
Fuente <- list.files(path = ruta_carpeta, pattern = ".csv", full.names = TRUE) # Lectura de archivos
con terminación .csv en esa carpeta

for (Archivo in Fuente) {

```

```

X <- read.csv(Archivo)
X = X$Length

k = nclass.FD(X)

Rango = ceiling(max(X) - min(X)) #Cálculo rango
a = round(Rango/k, 1) #Cálculo ancho de clase.
c = abs(round(a * k - Rango, 1))

LimClasInf = numeric(k) #Cálculo límites de clase inferiores
LimClasInf[1] = min(X) - c/2
for (i in 2:k) {
  LimClasInf[i] = LimClasInf[i - 1] + a
}
LimClasInf = round(LimClasInf, 2)

LimClasSup = numeric(k) #Cálculo límites de clase superiores
LimClasSup[1] = LimClasInf[1] + a
for (i in 2:k) {
  LimClasSup[i] = LimClasSup[i - 1] + a
}
LimClasSup = round(LimClasSup, 2)

MarClas = numeric(k) #Cálculo marcas de clase
for (i in 1:k) {
  MarClas[i] = (LimClasInf[i] + LimClasSup[i])/2
}
MarClas = round(MarClas, 2)

Freq = numeric(k)
for (i in 1:k) {
  Freq[i] = length(X[X >= LimClasInf[i] & X < LimClasSup[i]])
}
FreqAc = cumsum(Freq) #Cálculo Frecuencias Acumuladas
Rel = round(Freq/sum(Freq), 4) #Cálculo Frecuencias Relativas
RelAc = round(cumsum(Rel), 4) #Cálculo de Frecuencias Relativas Acumuladas

# Tabla de Frecuencias
TabFreq = data.frame(LimClasInf, LimClasSup, MarClas, Freq, FreqAc, Rel, RelAc)
print(TabFreq)

par(mfrow = c(1, 2))

# Crear el gráfico utilizando ggplot2
body_plot_ojiva <- ggplot(data = TabFreq, aes(x = MarClas, y = RelAc)) +
  geom_line(color = "green", linewidth = 1) +
  geom_point(color = "blue") +
  geom_vline(aes(xintercept = mean(X)), linetype = "dashed", linewidth = 0.7, color = "red4") +

```

```

    geom_vline(aes(xintercept = quantile(X, probs = 0.25, na.rm = TRUE)), linetype = "dotted",
linewidth = 0.5, color = "red4") +
    geom_vline(aes(xintercept = quantile(X, probs = 0.75, na.rm = TRUE)), linetype = "dotted",
linewidth = 0.5, color = "red4") + labs(title = tools::file_path_sans_ext(basename(Archivo)), x =
"Díámetro [nm]", y = "Frecuencia Relativa Acumulada") +
    theme_classic() +
    theme(panel.background = element_rect(fill = "white", color = "black"), plot.title = element_text(size
= 18, face = "bold", hjust = 0.05, vjust = 1)) +
    theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 18)) +
    theme(axis.text.y = element_text(color = "black", size = 18)) +
    theme(axis.title.x = element_text(size = 18, face = "bold")) +
    theme(axis.title.y = element_text(size = 18, face = "bold"))

# Creamos la caja de texto y su contenido
box_text <- paste("Distribución Acumulada\n $\mu$  = ",
    round(mean(X), digits = 2), " [nm]", "\n $\sigma$  = ",
    round(sd(X), digits = 2), " [nm]", "\nQ1 25% = ",
    round(quantile(X, probs = 0.25, na.rm = TRUE), digits = 2), " [nm]", "\nQ3 75% = ",
    round(quantile(X, probs = 0.75, na.rm = TRUE), digits = 2), " [nm]")

label_plot <- geom_label(aes(x = quantile(X, probs = 0.8, na.rm = TRUE), y = 0.5, label = box_text,
hjust="left"), parse = FALSE, size = 5, color = "black")

ojiva_plot <- body_plot_ojiva + label_plot

# Genera el nombre del archivo para cada gráfica
name_ojiva <- paste("C:/Users/cesar/OneDrive - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO/Escuela/Licenciatura/Titulación/Tesina/R_Scripts_LIRFFF/Ojivas_CSV/",
    tools::file_path_sans_ext(basename(Archivo)), ".png", sep = "")

# Guarda la gráfica en formato PNG en la carpeta específica

png(file = name_ojiva, width = 480, height = 480) # Puedes ajustar el ancho, alto y resolución
print(ojiva_plot)
dev.off()

}

```

c) Boxplot

```

# Directorio donde se encuentran los archivos
directorio <- "C:/Users/cesar/OneDrive - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO/Escuela/Licenciatura/Titulación/Tesina/R_Scripts_LIRFFF/Fuente"

# Listar los archivos CSV en el directorio
Fuente <- list.files(path = directorio, pattern = "\\*.csv$", full.names = TRUE)

# Inicializar una lista para almacenar las columnas "Length"

```

```

lista_medidas <- list()

# Generar una lista de columnas "Length" de cada archivo
for (archivo in Fuente) {
  nombre <- tools::file_path_sans_ext(basename(archivo)) # Obtener el nombre sin extensión
  df <- read.csv(archivo) # Leer el archivo CSV
  df <- df$Length

  lista_medidas[[nombre]] <- df # Almacenar las medidas en la lista de cada archivo.
}

# Especificar la carpeta y el nombre del archivo
carpeta_destino <- "C:/Users/cesar/OneDrive - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO/Escuela/Licenciatura/Titulación/Tesina/R_Scripts_LIRFFF/Boxplots_CSV"
nombre_archivo <- ".png"

# Crear el archivo en la carpeta especificada
png(file.path(carpeta_destino, nombre_archivo), width = 600, height = 600)

# Generar la gráfica (que ahora se guardará en el archivo)
boxplot(lista_medidas, ylab = "Diámetro [nm]", whisklty = 1, col = "white", boxcol = "blue", border =
"#5D478B", outcol = "#CD2626")

# Cerrar el dispositivo gráfico
dev.off()

```

Bibliografía

- [¹] Madriz, S. (2023, 13 de febrero). *Importancia del servicio de gestión de datos en la actualidad*. Imagineer.co. Recuperado el 27 de diciembre de 2023, de <https://blog.imagineer.co/es/importancia-del-servicio-de-gestion-de-datos-en-la-actualidad>
- [²] National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH]. (2008, febrero). *Prácticas de seguridad para el uso de la nanotecnología en el lugar de trabajo* (NIOSH Publication No. 2008-112). Recuperado de https://www.cdc.gov/spanish/NIOSH/docs/2008-112_sp/
- [³] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks [SCENIHR]. (2009). *Risk assessment of products of nanotechnologies*. Health & Consumers DG. Recuperado el 27 de diciembre de 2023, de https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_023.pdf
- [⁴] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks [SCENIHR]. (2009). *Nanomateriales*. Recuperado el 10 de agosto de 2024, de https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/nanomaterials/es/index.htm
- [⁵] Khan, S., & Hossain, K. (2022, 22 de julio). *Classification and properties of nanoparticles*. En *Nanoparticle-Based Polymer Composites* (pp. 18–20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824272-8.00009-9>
- [⁶] Rahimzadeh, C. Y., Barzinjy, A. A., Mohammed, A. S., & Hamad, S. M. (2022). Green synthesis of SiO₂ nanoparticles from *Rhus coriaria* L. extract: Comparison with chemically synthesized SiO₂ nanoparticles. *PLoS ONE*, 17(8), e0268184. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268184>
- [⁷] Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: Controlando forma y tamaño. *Mundo Nano: Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 5(1), 70–79. Recuperado el 1 de febrero de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912012000100069
- [⁸] Chang, R., & Goldsby, K. (2013). *Química* (S. J. Sarmiento, Trad., 11.^a ed., p. 548). McGraw Hill.
- [⁹] Plandiura, S. (2013). *Evaluación de un proceso experimental de inyección de producto químico para incrementar el factor de recobro* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- [¹⁰] Wikipedia. (2019, 8 de julio). *Emulsión Pickering*. En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 20 de septiembre de 2024, de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Emulsi%C3%B3n_Pickering&oldid=117263054
- [¹¹] Ganesh Kumar, A. K. (2021). *Stability of nanoparticle stabilized oil-in-water Pickering emulsion under high pressure and high temperature conditions: comparison with surfactant stabilized oil-in-water emulsion*. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(8), 1206–1208. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1730888>
- [¹²] *Stability - Emulsions | Dosage forms | Pharmaceutical*. (2019). *Pharmacy180.com*. Recuperado el 2 de septiembre de 2022, de <https://www.pharmacy180.com/article/stability-2814/>
- [¹³] Montaña, J. (2021). *Implicaciones de los iones de calcio y magnesio en las propiedades reológicas de emulsiones para transporte del hidrocarburo* (pp. 17–20). Universidad Nacional Autónoma de México.

[14] Komorowski, M., Marshall, D. C., Saliccioli, J. D., & Crutain, Y. (2016). Exploratory data analysis. En *Secondary analysis of electronic health records* (pp. 185–203). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43742-2_15

[15] IBM. (s. f.). *¿Qué es el análisis exploratorio de datos?* Recuperado el 8 de enero de 2024, de <https://www.ibm.com/mx-es/topics/exploratory-data-analysis>

[16] Bevilacqua, J. (2023, 13 de octubre). *Análisis de datos vs. estadística de datos. Plika*. Recuperado de <https://getplika.com/analisisdatosestadisticadatos>

[17] Dato. (2023). *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 19 de junio de 2023, de <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Dato&oldid=151936150>

[18] IBM. (s. f.). *SPSS Statistics 25.0.0*. Recuperado el 19 de junio de 2023, de <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/25.0.0?topic=charts-variable-types>

[19] (Ibídem).

[20] Sepúlveda, F. R. (2020, 25 de agosto). *Medidas numéricas descriptivas. RPubs*. Recuperado el 27 de junio de 2023, de https://rpubs.com/FabioSepulveda/medidas_descriptivas

[21] IBM. (s. f.). *¿Qué es el análisis exploratorio de datos?* Recuperado el 19 de junio de 2023, de <https://www.ibm.com/mx-es/topics/exploratory-data-analysis>

[22] Formoso, J. (s. f.). *Visualización de datos con R y ggplot2. RPubs*. Recuperado el 27 de enero de 2025, de <https://rpubs.com/jformoso/838661>

[23] Ibidem.

[24] Colaboradores de Wikipedia. (2023, 19 de septiembre). *Análisis exploratorio de datos. Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 27 de enero de 2025, de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=An%C3%A1lisis_exploratorio_de_datos&oldid=153859995

[25] PRTR-España. (s. f.). *Nonilfenol y etoxilatos de nonilfenol (NP/NPE). PRTR España*. Recuperado el 12 de agosto de 2024, de <https://prtr-es.es/Nonifenol-y-Etoxilatos-de-nonifenol,15651,11,2007.html>

[26] Colaboradores de Wikipedia. (2024, 17 de abril). *Nonilfenol. Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 12 de agosto de 2024, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Nonilfenol>

[27] Cosmotienda. (2022). *Nonil Fenol Etoxilado 9M [500g]*. Recuperado el 12 de agosto de 2024, de <https://www.cosmotienda.com/tienda/nonil-fenol-etoxilado-500-p-4132.html>

[28] Montañó, J. (2021). *Implicaciones de los iones de calcio y magnesio en las propiedades reológicas de emulsiones para transporte del hidrocarburo* (pp. 17–20). Universidad Nacional Autónoma de México.

[29] SkySpring Nanomaterials. (s. f.). *Silicon Oxide Nanoparticles / Nanopowder (SiO₂, 10–20 nm, 99.5%, Non-Porous)*. Recuperado de https://ssnano.com/i/u/10035073/h/Specification/Product_-_SiO2_Nanopowder_-_6808NM.pdf

[30] SkySpring Nanomaterials. (s. f.). *Silicon Oxide Nanoparticles / Nanopowder (SiO₂, 99.8%, 10–20 nm, surface modified with amino group, dispersible)*. Recuperado de <https://ssnano.com/i/u/10035073/h/Specification/Product - SiO2 nanopowder - 6851HN.pdf>

[31] Luna Flores. (2022). *Resultados sin publicar*.

[32] Instituto de Física, UNAM. (2022). *Central de Microscopía*. Recuperado el 27 de septiembre de 2022, de <http://laboratorios.fisica.unam.mx/technology?id=12>

[33] Colaboradores de Wikipedia. (2022, 11 de julio). *Microscopio electrónico de barrido*. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 27 de septiembre de 2022, de [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Microscopio electr%C3%B3nico de barrido&oldid=144713549](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido&oldid=144713549)

[34] Omax Microscope. (2023). *M837L Series Trinocular Lab Compound Microscope with LED Illumination*. Recuperado el 27 de febrero de 2023, de <https://omaxmicroscope.com/collections/compound-microscopes-general-trinocular/products/c-m837l>

[35] SITA Lab Solutions. (2019). *SITA DynoTester+*. Recuperado el 12 de marzo de 2023, de <https://www.sita-lab.com/products/sita-tensiometer/sita-dynotester/>

[36] National Institutes of Health (NIH). (2022, 4 de octubre). *ImageJ: Image Processing and Analysis in Java*. Recuperado de <https://imagej.nih.gov/ij/docs/intro.html>

[37] The R Foundation. (s. f.). *R: The R Project for Statistical Computing*. Recuperado el 16 de marzo de 2023, de <https://www.r-project.org/>

[38] Antonoff, G. (1951). *Sobre tensión superficial e interfacial*. *Revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales de Zaragoza*, IV(2), 31–40. https://zaguan.unizar.es/record/4395/files/S2_T06_A1951_2.pdf

[39] Abdul-Majeed, G. H., & Al-Soof, N. A. (2000). *Estimation of gas–oil surface tension*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 27(3–4), 197–200. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(00\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(00)00058-9)

[40] Datacamp. (s. f.). *R Documentation: nclass*. Recuperado el 16 de enero de 2025, de <https://www.rdocumentation.org/packages/grDevices/versions/3.6.2/topics/nclass>

[41] Montaña, J., & Mariscal, R. (2024, julio–diciembre). *A cuenta gotas: Un vistazo a la distribución del tamaño de gotas y su influencia en las propiedades de las emulsiones*. *Revista de Materiales Avanzados*, 41. Recuperado el 2 de febrero de 2025.