



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Recopilación y análisis de
propiedades de emulsiones
con ayuda de MATLAB**

TESINA

Que para obtener el título de

Ingeniera Petrolera

P R E S E N T A

Abigali Hernández Medrano

DIRECTORA DE TESINA

Dra. Ana Paulina Gómora Figueroa



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
Capítulo I: Justificación y Objetivos	11
Justificación	11
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
Capítulo II: Antecedentes	13
2.1. Procesamiento de datos	13
2.1.1. <i>Data science</i>	13
2.2. Herramientas computacionales	14
2.2.1. Uso de matlab®	15
2.3. Recuperación de hidrocarburos	15
2.3.1. Surfactantes	17
2.3.2. Nanopartículas	19
2.3.3. Emulsiones	21
Capítulo III: Premisas y desarrollo	25
3.1. Premisas	25
3.2. Desarrollo	26
Capítulo IV: Resultados de la Aplicación	28
4.1. Aceite mineral	28
4.2. Crudos extrapesados (KTIA y Jurásico)	35
Capítulo V: Discusión de Resultados	39
5.1. Aceite mineral	39
5.1.1. Viscosidad	39
5.1.2. Tamaño de gota	49
5.1.3. Rendimiento	52
5.1.4. Análisis general	52
5.2. Aceite extrapesado jurásico	53
5.2.1. Viscosidad	53
5.2.2. Tamaño de gota	61
5.2.3. Análisis general	64
CONCLUSIONES	66
APÉNDICE A: Resultados de viscosidad de aceite extapesado KTIA	68

APÉNDICE B: <i>Safety data sheet</i>	74
REFERENCIAS	76
LISTA DE FIGURAS	78
LISTA DE TABLAS	81

DECLARATORIA

Este proyecto se realizó gracias a la ayuda del equipo de trabajo del Laboratorio de interacción roca-fluido y fluido-fluido (LRFFF):

- Omar Luna Flores
- Adrián Romero García
- Cesar Villagómez Pérez

Ayudaron a la preparación y caracterización de las emulsiones en un periodo de tiempo.

Se agradece el apoyo de la beca de titulación **PAPIIT** del proyecto **IA105621** "Evaluación de rocas ígneas para almacenar dióxido de carbono a través de la formación de carbonatos".

También, se agradece al proyecto **SENER-CONACyT 280816** "Plataforma Yacimiento en miniatura para Estudios de EOR mediante Nanofluidos Inteligentes en Campos Maduros y No Convencionales de México".

AGRADECIMIENTOS

A mi hermana, mejor amiga, compañera de vida y fuerza. Mia, gracias infinitas por darme el universo entero con sólo existir, por ser mi “tú puedes con todo”, por hacer que esta vida valga la pena, por hacer el mundo un mejor lugar, por dejarme ser quien te acompañe diario. Gracias por contarle a todas las personas que conoces que hace y quien es tu hermana porque sé que te sientes orgullosa. Ni con todas las palabras de agradecimiento y de amor podría describir lo que siento por ti: te amo.

A mi abuela Isabel, mi mami, que en cada momento me apoyó, me amó y me aplaudió no sólo en mis logros, también en mis fracasos.

A mis padres, gracias por el esfuerzo, cansancio, desvelos y sacrificios.

A la Dra. Paulina, gracias por apoyarme en todos mis proyectos, metas e ideas, por no dejarme sola y por hacerme saber que tengo a alguien a quien admirar, a una confidente y a una amiga. Gracias infinitas por su apoyo incondicional, por ayudarme a crecer como ser humano y como profesionalista.

Al Dr. Gorgonio, por haber confiado en mí, por sus enseñanzas y por permitirme hacer equipo con él. Gracias por los conocimientos, por las pláticas y por no dudar en que lo lograría.

A Sebastián, por regalarme experiencias y vivencias increíbles, por haberme enseñado el mundo a través de sus ojos, por el apoyo incondicional en mi carrera y en la vida, por el cariño y por demostrarme que la vida es mejor en compañía.

A Freed, por demostrarme durante tantos años una amistad increíble, por hacerme sentir especial e importante, por apoyarme en cada idea y meta, y sobre todo por ser la persona que es.

A mi team, por las experiencias que le han dado a mi vida, por su amistad y por echarme porras siempre. Me han hecho la vida más fácil, feliz y encantadora.

A mis grandes amigos: Janett, Pilar, Erick Cantú, Erick Gordillo, Adrián y Angie por abrirme las puertas de su corazón, por su amistad y por cada vivencia.

Al equipo de LIRFFF: Janett, Miguel, Adrián, Omar, Julieta y Josué por compartir este proceso y hacerlo un poco más ligero.

Y, por último, pero no menos importante: a mí. Gracias por levantarte cada mañana para hacer un viaje que parecía infinito, permanecer todo el día en la facultad y después irte a trabajar. Gracias por nunca darte por vencida y aunque recibiste malos comentarios y acciones en el proceso de ser ingeniera nunca dudaste ni un segundo que podrías con lo que se te pusiera en tu camino. Gracias por caerte, equivocarte y fallar porque aprendiste mucho, por crecer como persona y tratar de hacer lo mejor todos los días.

Women, they have minds, and they have souls, as well as just hearts. And they've got ambition. And they've got talent as well as just beauty. And I'm so sick of people saying that love is just all a woman is fit for. I'm so sick of it.

Greta Gerwig, Little Women, 2019

RESUMEN

Al momento de generar un proyecto experimental, la variación de parámetros es fundamental para cubrir la mayor cantidad de posibilidades. Lo anterior, puede implicar la obtención de numerosos resultados experimentales para analizar, lo cual requiere de tiempo y una buena organización. En este trabajo se desarrolló una aplicación para brindar apoyo a los integrantes del Laboratorio de interacción roca-fluido y fluido-fluido (LRFFF) a acceder, consultar y analizar los datos generados durante el proyecto SENER-CONACyT 280618 “Plataforma yacimiento en miniatura para estudios de EOR mediante nanofluidos inteligentes en campos maduros y no convencionales en México”.

Se construyó la aplicación *AIM Emulsions* por medio de la herramienta computacional MATLAB®. Esta plataforma de programación contiene diversos instrumentos tales como *guide* que permitió la elaboración de interfaces que componen la aplicación mencionada.

La implementación de *AIM Emulsions* permitió encontrar tendencias en los resultados experimentales debido a que se organizaron todos los datos obtenidos durante la preparación de emulsiones. La información con la que se contó para el desarrollo de este trabajo fue: viscosidad, rendimiento y tamaño de gota (ver **Figura 1**).

Las emulsiones caracterizadas se prepararon utilizando aceite mineral, crudos extrapesados y salmueras provenientes de un campo de la Región Norte. Se ocuparon diferentes proporciones de agua-aceite y también se modificó la salinidad del medio. Todas las emulsiones se prepararon a presión y temperatura ambiente. Como agentes estabilizadores para las emulsiones se utilizó un surfactante no-iónico y nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂). Se evaluaron a los agentes por separado y en conjunto.

Este trabajo se llevó a cabo para auxiliar la evaluación del potencial que tienen las nanopartículas y su implementación como un método químico para la recuperación incremental de hidrocarburos.

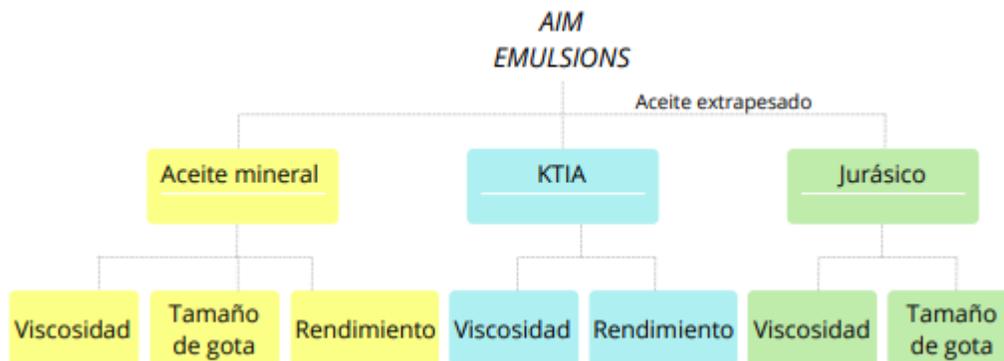


Fig. 1 – Datos que son posibles consultar en la aplicación *AIM Emulsions*.

INTRODUCCIÓN

En varios sectores se cuenta con una gran cantidad de información que requiere ser recopilada, almacenada y organizada para consulta y análisis con el fin de encontrar tendencias que permitan sugerir estrategias, soluciones y conclusiones. Tal es el caso de la industria petrolera que para realizar la caracterización de yacimientos se requiere integrar numerosos datos geológicos, geofísicos, petrofísicos y de ingeniería para construir un modelo [1]. Otra área es la experimental, pese a que se mantienen constantes ciertos parámetros para idealizar y poder generar conclusiones; se obtiene una amplia variedad de resultados.

En el laboratorio de interacción roca-fluido y fluido-fluido (LIRFFF), se diseñan y desarrollan diferentes pruebas experimentales para distintos proyectos relacionados a la industria petrolera. En el proyecto SENER-CONACyT 280618 “Plataforma yacimiento en miniatura para estudios de EOR mediante nanofluidos inteligentes en campos maduros y no convencionales en México” se obtuvieron resultados sobre la formación de emulsiones, su viscosidad, tamaño de gota y rendimiento que requerían ser analizados.

El objetivo de este trabajo es facilitar a los usuarios del laboratorio LIRFFF la consulta y el análisis de los datos experimentales por medio de la implementación de la aplicación *AIM Emulsions*.

Para la elaboración de la aplicación se implementó *data science* para la adquisición, análisis, integración, modelado, visualización e interacción de los resultados experimentales de 93 emulsiones elaboradas por el equipo de trabajo de LIRFFF, las cuales fueron caracterizadas durante 30 días aproximadamente. Esto permitió mejorar las decisiones a través del análisis de datos. También, permitió la transformación de estos datos por medio del uso de tecnologías para su almacenamiento y procesamiento [2].

Con la herramienta computacional MATLAB®; por medio de *guide* se generaron interfaces en forma de menú con los datos previamente depurados y con *application compiler* no es necesario la instalación del compilador para que el usuario realice la consulta de los datos. Utilizando *AIM Emulsions* fue posible encontrar tendencias en la viscosidad, rendimiento y tamaño de gota de las emulsiones elaboradas con aceite mineral y crudos extrapesados de dos formaciones (KTIA y Jurásico), y salmueras provenientes de campo.

Las tendencias analizadas se usaron para evaluar dos agentes estabilizadores por separado y en conjunto; (1) surfactante no-iónico (nonilfenoletoxilado), el cual reduce la tensión interfacial entre el aceite y agua, dando lugar a la formación de emulsiones que afectan la viscosidad del aceite y por lo tanto al desplazamiento de éste; y (2) nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂), que modifican las propiedades del fluido en el que se dispersan como: viscosidad, densidad, conductividad térmica, capacidad calorífica, también puede verse afectada la tensión interfacial (IFT) del agua-aceite [4].

Este estudio es importante debido a que la elección correcta de los componentes químicos a emplear en los métodos químicos de recuperación mejorada es crucial para la

recuperación de hidrocarburos remanentes en el yacimiento sin dañar la formación. Además, que los recursos de aceite pesado son más del doble que del aceite ligero convencional en el mundo; lo que nos hace considerar el comportamiento y extracción de los crudos extrapesados [5].

CAPÍTULO I

Justificación y Objetivos

Justificación

La aplicación de métodos EOR (*Enhanced Oil Recovery*), por sus siglas en inglés, ayuda a incrementar la producción de campos petroleros cuando no producen hidrocarburos con la energía natural que estos tienen. Los métodos EOR se dividen en químicos, térmicos, inyección miscible; y se ha implementado la nanotecnología para obtener mejores resultados en los métodos. Específicamente para los métodos químicos (cEOR) se tiene la inyección de polímeros, surfactantes, alcalinos, entre otros. Para implementar cualquiera de los métodos antes mencionados es importante realizar pruebas de simulación, investigación experimental y pruebas piloto para la selección adecuada del método y una implementación satisfactoria.

Al definir las pruebas de laboratorio para la selección de un método de cEOR (*Chemical Enhanced Oil Recovery*) es crucial definir las variables que se utilizarán para la evaluación del método en cuestión. En ocasiones, estas variables se mantienen constantes para idealizar y de esta manera simplificar los problemas a resolver. Una vez que se selecciona el material, deben realizarse pruebas para evaluar la estabilidad y el desempeño del agente químico, así como las interacciones que se generen con los fluidos y el medio poroso. A continuación, se muestra un ejemplo para la selección de un surfactante:

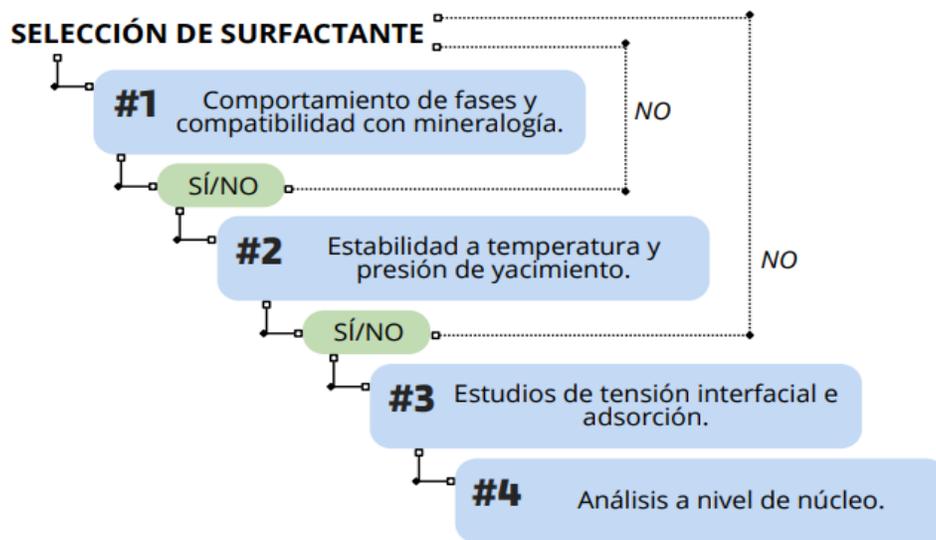


Fig. 2 – Metodología para la elección de un surfactante para cEOR. Modificado [6].

En este trabajo se agrupan y analizan los resultados de la caracterización de emulsiones generadas con aceite mineral y/o aceite crudo extrapesado con salmueras, las cuales fueron estabilizadas por un surfactante no-iónico (nonilfenoletoxilado) y nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂). Para llevar a cabo lo anteriormente dicho, se generó la aplicación *AIM Emulsions* con MATLAB®. Para la elaboración de esta aplicación se programaron

diversas interfaces gráficas presentadas en forma de catálogos secuenciales para visualizar ordenadamente los datos experimentales. También, se utilizó *application compiler* del mismo compilador para generar un archivo .exe y así ingresar a la aplicación sin necesidad de instalar MATLAB®.

Finalmente, la aplicación *AIM Emulsions* facilita a los usuarios la consulta de los resultados experimentales obtenidos, la comparación entre ellos y un mejor análisis, con lo cual es posible encontrar tendencias que permitan llevar a cabo la evaluación del desempeño de las nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂) con y sin surfactante.

Objetivo general

Generar e implementar interfaces usando MATLAB® para ordenar y visualizar los resultados obtenidos durante el proyecto; “Plataforma yacimiento en miniatura para estudios de EOR mediante nanofluidos inteligentes en campos maduros y no convencionales en México” y analizar el desempeño de los agentes químicos como un método potencial para la recuperación de hidrocarburos.

Objetivos específicos

1. Recopilar, almacenar y organizar datos experimentales de viscosidad, distribución de tamaño de gota y rendimiento de emulsiones preparadas con aceite mineral y crudo extrapesado, con respecto al tiempo.
2. Desarrollar una aplicación compuesta de interfaces generadas en MATLAB® para el ordenamiento de los resultados.
3. Generar gráficos de viscosidad vs. tiempo y tablas de propiedades físicas para una mejor visualización de datos en las interfaces generadas.
4. Permitir una organización sencilla de los datos experimentales para una consulta y análisis adecuado.
5. Identificar tendencias en los resultados para conocer el comportamiento de un surfactante no-iónico y nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂).

CAPÍTULO II

Antecedentes

2.1. Procesamiento de datos

En ocasiones el desarrollo de procesos y proyectos da como resultado una gran cantidad de información que dificulta observar, consultar y analizar los datos generados, para encontrar tendencias y patrones que permitan sugerir estrategias, soluciones y conclusiones.

Por ejemplo, en el área de genética, para llegar a un resultado eficiente es necesario el análisis de datos almacenados en *petabyte* (10^{15}). Para poner esto en contexto, la cantidad de datos de proyectos grandes de 1,000 genomas¹ abordan colectivamente la escala de *petabyte* sólo para la información sin procesar [7]. Por otro lado, en la exploración de yacimientos específicamente el mapeo de estructuras geológicas se utiliza el levantamiento de sísmica 3D de grandes volúmenes (km^2) de subsuelo lo que implica una gran cantidad de datos [8]; otro ejemplo es en la caracterización de los yacimientos donde el primer paso es integrar numerosos datos geológicos, geofísicos, petrofísicos y de ingeniería que están disponibles para construir un modelo [1]. Finalmente, en nuestro grupo de investigación, J. Montañó analizó propiedades en un periodo de tiempo de 150 emulsiones como parte de un proyecto asociado al transporte de los hidrocarburos [9].

El análisis de bases de datos grandes demanda tiempo y el almacenamiento de información implica gastos económicos. En la actualidad, debido a la complejidad que representa el contar con una base de datos extensa en varios campos se ha implementado el *data science* para facilitar la organización, gestión y análisis de los procesos. También, es necesario la implementación de la tecnología (herramientas computacionales), para encontrar tendencias, patrones y proponer estrategias y soluciones a un problema dado.

2.1.1. *Data science*

En muchos sectores, la cantidad de información que se produce es abismal y en varias ocasiones no se cuenta con un formato con estructura, y la tarea de procesar y extraer estos datos es desafiante. Hoy en día el concepto del *data science* es muy usado e implementado debido a que provee las herramientas y técnicas para analizar datos, lo que a su vez permite comprender, comparar y evaluar la información y generar soluciones.

El término *data science* comenzó a utilizarse a finales de la década de 1990 en discusiones relacionadas con la necesidad de unir a los especialistas en estadística con expertos en informática para trasladar el rigor matemático al análisis computacional de grandes conjuntos de datos [2]. *Data science* es uno de los campos multidisciplinarios de mayor crecimiento en los últimos años, se ocupa de la adquisición, análisis, integración, modelado,

¹ La Organización Panamericana de la Salud menciona que el genoma es un conjunto completo de ADN que contiene una especie y almacena toda la información necesaria para que una persona pueda crecer y desarrollarse.

visualización e interacción de una gran cantidad de información [3]. En la **Figura 3**, se presentan las habilidades que se implementan en la *data science*.

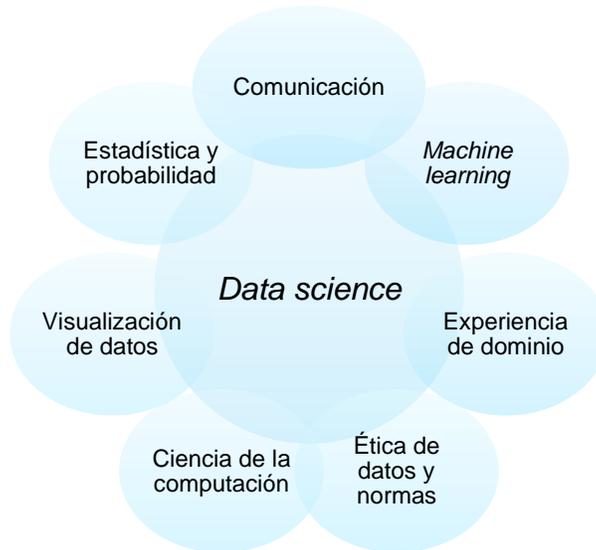


Fig. 3 – Conjunto de habilidades para un data scientist. Modificado [2].

Esta disciplina se enfoca en mejorar las decisiones a través del análisis de datos. J. Kelleher et al. mencionan que se realiza una captura, limpieza y transformación usando tecnologías de macrodatos para el almacenamiento y procesamiento de conjuntos de datos con la finalidad de encontrar tendencias y patrones para clasificar a dichos datos en diversas categorías y así resolver un problema dado. Un ejemplo muy claro es la clasificación de los correos electrónicos por medio de la categoría spam. Ya que hay correos electrónicos que tienen ciertas características que se utilizan para clasificarlos. Este tipo de patrones son muy simples de identificar, pero hablando de datos científicos encontrar estos patrones no es una tarea sencilla [2].

En general, el *data science* se vuelve útil cuando tenemos un gran número de datos distintos y cuando distinguir patrones o tendencias es demasiado complejo para que sean descubiertos y/o extraídos manualmente por el humano [2]. Sin embargo, el éxito dependerá de la capacidad del humano para interpretar los datos a gran escala, la elección de la información y la detección de atributos y patrones correctos. Por lo tanto, la dimensión de los datos obliga a adoptar avances tecnológicos que faciliten el procesamiento y almacenamiento de datos.

2.2. Herramientas computacionales

La tecnología ha desempeñado un papel crucial en áreas como la medicina, ciencia, procesos industriales, comunicación, entre otros, la ingeniería no es la excepción, ya que sigue facilitando y agilizando diversos procesos. Las herramientas computacionales se han implementado para el desarrollo de proyectos con mayor facilidad en un menor tiempo.

2.2.1. Uso de MATLAB®

Para cumplir el objetivo de este trabajo se ocupó *data science* y el compilador MATLAB®, el cual es utilizado para resolver problemas científicos y de ingeniería por medio de vectores y matrices. Profesionales de ciencias e ingeniería utilizan MATLAB® para organizar, depurar y analizar conjuntos de datos complejos de diversos campos, como climatología, mantenimiento predictivo, investigación médica y finanzas [11].

Para generar una aplicación de utilidad para los miembros del proyecto, y otros alumnos en LIRFFF, para consultar y analizar datos, se implementaron dos herramientas de las muchas que ofrece MATLAB®:

1. *Guide* es una función de MATLAB®, con la cual es posible desarrollar interfaces gráficas *guide* (entorno de desarrollo de GUI) y proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario de *apps* personalizadas. Mediante el editor de diseño de *guide*, es posible diseñar gráficamente la interfaz de usuario.
2. *MATLAB Compiler* permite compartir programas de MATLAB® como aplicaciones independientes y *apps web* [11].

2.3. Recuperación de hidrocarburos

La demanda creciente en energía y diversos derivados ha promovido mayor actividad de la industria del petróleo y gas para satisfacer dicha demanda. Las etapas de producción de hidrocarburos son tres (ver **Figura 4**);

- Recuperación primaria: el yacimiento produce por su propia energía debido al gradiente de presión y a mecanismos de empuje que existen de forma natural.
- Recuperación secundaria: se busca mantener el gradiente de presión por medio de un proceso de inyección de un fluido inmisible más económico que el hidrocarburo, esto sin afectar propiedades del fluido o yacimiento; con el fin de aumentar la recuperación de aceite.
- Recuperación mejorada: también conocida como EOR por sus siglas en inglés (*Enhanced Oil Recovery*) que consiste en diferentes métodos: químicos, térmicos, inyección miscible y otros procesos. [13]

Estos procesos de recuperación no tienen un orden específico, en ocasiones es necesario implementar recuperación mejorada al inicio de la vida de explotación de un yacimiento petrolero [12]. El uso y aplicación de los diferentes métodos que existen dependen de las propiedades de los fluidos y del yacimiento, y de la estrategia de inyección que permitirá extraer la mayor cantidad de aceite.

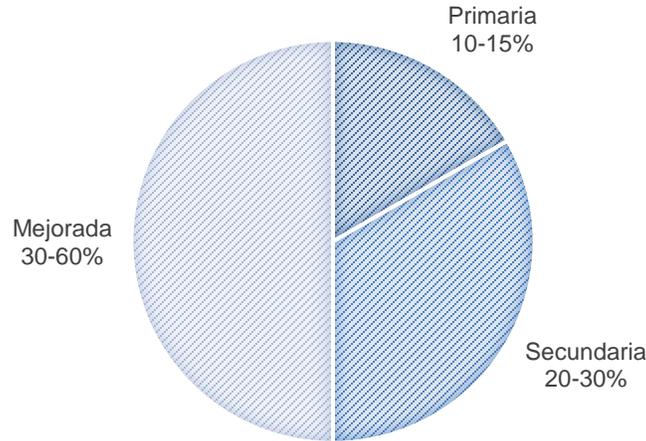


Fig. 4 – Porcentaje de recuperación de aceite de cada etapa de producción. Recuperado [4].

La recuperación mejorada se clasifica en métodos térmicos (agua caliente, vapor, calentamiento eléctrico, combustión *in-situ* y no térmicos (miscibles, químicos, gases inmiscibles). Los métodos químicos de recuperación mejorada (cEOR) incluyen el uso de surfactantes, polímeros, álcalis, o bien, una combinación de estos [13]. La elección correcta de los componentes químicos a emplear es crucial para la recuperación de hidrocarburos remanentes en el yacimiento sin dañar la formación.

Por otro lado, es importante conocer el tipo de hidrocarburo presente en el yacimiento ya que el petróleo es una mezcla compleja y cuando se habla de un aceite pesado o extrapesado la complejidad aumenta debido a su alta viscosidad por la presencia de moléculas pesadas como son asfaltenos (surfactantes naturales), ácidos nafténicos, resinas y parafinas; y porque la movilidad del agua es mayor debido a la diferencia de viscosidad de los fluidos.

Hart menciona que los recursos de aceite pesado son más del doble que de aceite ligero convencional en el mundo; por lo que se ha considerado la extracción y aprovechamiento de los crudos extrapesados [5].

En los crudos pesados el factor de recuperación es alrededor del 10%, es decir, que una gran cantidad de aceite aún se encuentra en el yacimiento y potencialmente puede extraerse con el empleo de los métodos y estrategias adecuados para cada tipo de yacimiento [12]. Uno de los métodos para extraer el aceite entrampado es por medio de la inyección de surfactantes para la formación de emulsiones ya que se altera la tensión interfacial entre fluidos, y la mojabilidad de la roca. El aceite pesado es una mezcla compleja de hidrocarburos que complica la elaboración de emulsiones en parte debido a los procesos dinámicos entre moléculas grandes y pesadas que interactúan y se reorganizan en la interfase aceite-agua de la emulsión.

Un ejemplo de esto son los asfaltenos, los cuales se caracterizan por ser componentes polares de masa molecular elevada. Las emulsiones resultantes debido a la estabilización

por asfaltenos suelen ser bastante estables. Otro ejemplo, es la adsorción de diversas especies (surfactantes, resinas, asfaltenos) en la roca y da como consecuencia un cambio en la mojabilidad del medio poroso. La adsorción de surfactante en general es muy rápida, pero para las moléculas largas, como asfaltenos, el proceso es lento e irreversible [14].

2.3.1. Surfactantes

Los surfactantes son moléculas constituidas por dos secciones; una lipofílica (afín a la fase oleosa) y otra hidrofílica (afín a la fase acuosa); estos pueden ser catiónicos, aniónicos, anfotéricos, o no-iónicos [6]. La **Tabla 1**, muestra los tipos de surfactantes, así como sus ventajas y su mecanismo dominante, y en la **Figura 7** se presenta una esquematización de los distintos tipos de surfactantes.

Los surfactantes reducen la tensión interfacial (IFT) entre el aceite y el agua, lo cual puede dar lugar a la formación de emulsiones, agua en aceite (W/O) o aceite en agua (O/W) afectando a la viscosidad y por lo tanto al desplazamiento de aceite residual. El surfactante se posiciona en la interfaz aceite y agua estabilizando las gotas, lo que evita la separación de las fases (**Figura 5**) [9] [5]. La mojabilidad también se ve afectada con el uso de surfactantes, se ha reportado que la alteración de esta propiedad puede resultar en mayor recuperación del aceite entrampado en las paredes de los poros (**Figura 6**) [15].

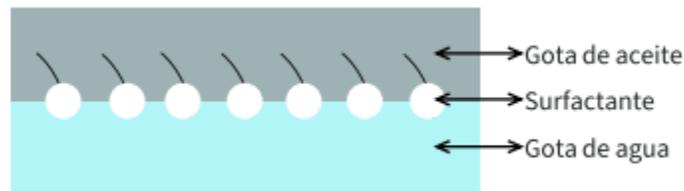


Fig. 5 – Surfactante estabilizando una emulsión. Modificado [5].

Al formar una emulsión con surfactante, el agua puede alcanzar un umbral de concentración y crear estructuras de asociación de tamaño nanométricas conocidas como micelas. Las propiedades de estas micelas (forma, estructura, número de moléculas de surfactante por micela) dependen de varios factores como son; concentración de surfactante, grupos polares, temperatura y aditivos [1].

Si la concentración de surfactante para formar una emulsión es muy alta se puede alcanzar un punto de saturación dificultando la solubilidad del surfactante. A dicha concentración se le conoce como concentración micelar crítica (CMC). La CMC depende del tipo de surfactante, fluidos con los que interactúa y las condiciones del medio donde se encuentre [6].

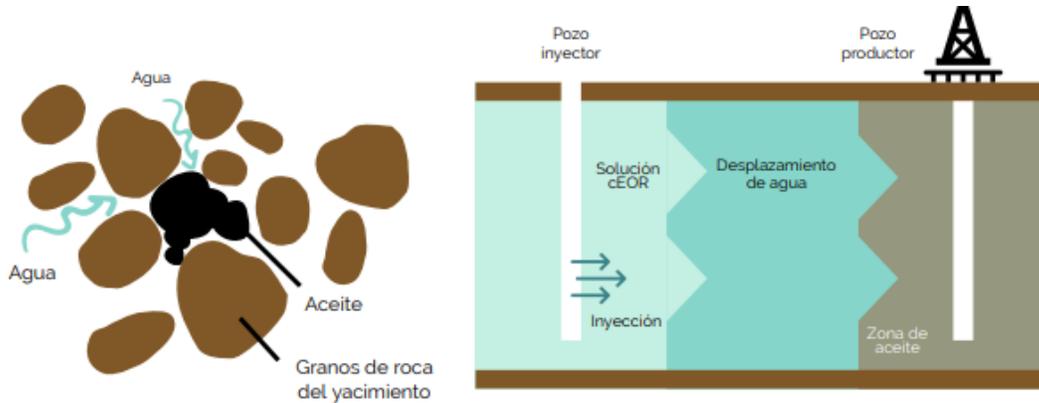


Fig. 6– Izquierda: perfil de barrido microscópico donde el fenómeno de desplazamiento es dominado por la reología interfacial. Derecha: perfil de barrido vertical durante el proceso de EOR donde el agua se utiliza como un agente de prelavado. Modificado [6].

Para disminuir la IFT, viscosidad y tener una baja estabilidad de las emulsiones es necesario el estudio del fluido y los químicos a inyectar para lograr la formulación de emulsiones in situ y así obtener un buen desplazamiento del aceite. El tener una baja estabilidad de las emulsiones permite recuperar de manera sencilla el crudo que se emulsiona [3].

El volumen de aceite y agua, y la cantidad de surfactante es crucial para la formación de emulsiones. Además, la buena elección de surfactante en un proceso de cEOR ayudará a incrementar la recuperación de aceite; en cambio, una mala elección puede dañar la formación y no disminuir el porcentaje de aceite residual.

Para llevar a cabo la selección de surfactante es crucial considerar los parámetros de; temperatura, salinidad, concentración de surfactante, potencial z y pH, presión, relación aceite-agua [6], [15].



Fig. 7– Representación de los tipos de surfactantes. Modificado [6].

Tabla 1 – Tipos de surfactantes. Modificado [6],[15].

Tipo	Descripción	Ventajas	Mecanismo dominante
Aniónico	Grupos hidrofílicos negativos y un ion con carga positiva que neutraliza la carga negativa.	Candidato efectivo para yacimientos de arenisca.	Reducción de IFT (tensión interfacial).
Catiónico	Grupos hidrofílicos positivos y un ion con carga negativa que neutraliza la carga positiva.	Forma soluciones estables con salmuera. La mezcla de surfactante catiónico con surfactante no iónico es eficiente para EOR en yacimientos carbonatados.	Reducción de IFT y alteración de mojabilidad.
No iónico	La principal fuerza para disolverse en agua es la vinculación del hidrógeno entre el grupo hidrofílico del surfactante y las moléculas del agua. No tiene carga.	Eficiente para inyección de surfactantes en formaciones que contienen agua de salinidad alta o agua dura (contiene iones de dureza).	Reducción de IFT.
Anfótero	El final hidrofílico tiene carga positiva como negativa que depende del pH.		

2.3.2. Nanopartículas

Las nanopartículas (NPs) son materiales sólidos que se emplean comúnmente dispersos en líquido formando fluidos inteligentes o nanofluidos [4]. El prefijo “nano” se refiere a una escala de 1×10^{-9} metros. En la **Tabla 2** se muestran los tipos de nanopartículas, su descripción y algunos ejemplos. Las nanopartículas muestran propiedades físicas y químicas diferentes a las partículas de mayor tamaño y cambian sus características de acuerdo con su dimensión, forma, estructura y composición.

Tabla 2 – Tipos de nanopartículas. Modificado [16].

Nanopartículas	Descripción
Orgánicas	Partículas biodegradables, no tóxicas, algunas con micelas.
Inorgánicas	No contienen carbón, y comúnmente se clasifican en: <ol style="list-style-type: none"> 1. Metálicas: Se sintetizan de elementos metálicos, por ejemplo: aluminio (Al), cadmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), oro (Au), hierro (Fe), plomo (Pb), plata (Ag) y zinc (Zn). 2. Óxido metálicas: poseen propiedades mejoradas comparadas con las metálicas. Ejemplos: óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de cerio (CeO_2), magnetita (Fe_3O_4), dióxido de sílice (SiO_2), óxido de titanio (TiO_2), óxido de níquel (NiO), y óxido de zinc (ZnO).
Carbono	Partículas hechas completamente de carbono (C).

C. Lárez et al. mencionan algunas aplicaciones de la nanotecnología que se han implementado en la industria petrolera [4]:

- Nanomateriales (NMs): elevan la resistencia de los dispositivos a alta presión y temperatura por medio de la elaboración de recubrimientos mecánicos y químicos.
- Nanosensores: los sensores construidos con nanopartículas ayudan a la caracterización del yacimiento a condiciones elevadas de presión y temperatura.
- Nanofluidos: se emplean para la prevención de daños por adsorción de asfaltenos, como métodos para la recuperación incremental de hidrocarburos (EOR) por medio de la alteración en la mojabilidad y reducción de la viscosidad. Además, se han empleado junto con surfactantes, polímeros y agua inteligente.

C. Lárez et al. definen a los nanofluidos como líquidos (agua, aceite o mezclas) que poseen partículas nanométricas o coloidales dispersas. Las nanopartículas modifican las propiedades del fluido en el que se dispersan como: viscosidad, densidad, conductividad térmica, capacidad calorífica, también puede verse afectada alguna propiedad del sistema al cual se apliquen, como por ejemplo la tensión interfacial (IFT) agua/aceite [4]. El desempeño de las nanopartículas se ve afectado por su composición, tamaño, temperatura y salinidad del medio. Los nanofluidos no sólo tienen un impacto en la recuperación de hidrocarburos, sino, también en otras operaciones, algunos ejemplos se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3 – Operaciones en las que se aplican los nanofluidos. Modificado [4].

Aplicación	Descripción
Pérdida de fluido (Lodo de perforación)	Previene la filtración del lodo de perforación al pozo en el caso de yacimientos con presión y temperatura elevadas. Las NPs que se han utilizado para esta aplicación son de sílice y óxido de zinc.
Fluidos de perforación	Se adicionan NPs a los lodos de perforación base agua mejorando las propiedades reológicas, lo cual promueve la estabilización del pozo. Las NPs utilizadas para esta aplicación son de sílice.
Fracturamiento hidráulico	Se forman nano-esponjas que se dispersan en el líquido al fracturar el medio para evitar que los finos generados bloqueen el flujo de hidrocarburos durante el proceso.

Además de las aplicaciones que se encuentran en la tabla anterior, D. Langevin menciona que los nanofluidos pueden utilizarse para formar emulsiones tipo Pickering [14]. La estabilidad de las emulsiones incrementa cuando el tamaño de la partícula disminuye y es afectada por la salinidad, pH, temperatura y la concentración de las NPs. Igualmente, el tamaño de las nanopartículas permite penetrar en las zonas del yacimiento donde el tamaño del poro es pequeño y de esta manera facilita el desplazamiento del aceite residual (**Figura 8**).

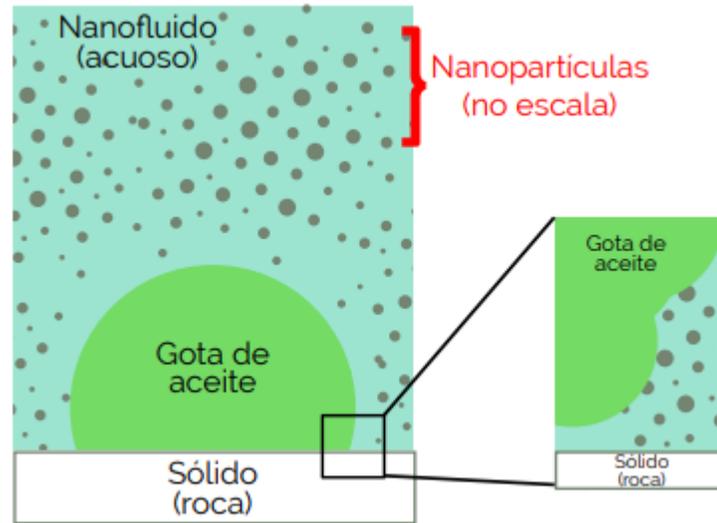


Fig. 8 – Discontinuidad de presión creada por la interacción de NP en la cuña formada en las interfaces petróleo-acuoso-roca. Modificado [6].

Para cEOR, el tipo de nanopartícula es crucial. En la última década se han desarrollado estudios que han demostrado que el uso de nanofluidos que contengan (SiO_2) han mejorado la recuperación de aceite en núcleos (roca de carbonato no homogéneo, *silurian dolomite*) debido a que contienen grupos hidroxilo (-OH) que genera interacciones tipo puente de hidrógeno con el surfactante y eso controla la absorción en el medio poroso [17].

Lárez Velásquez et al. mencionan que la recuperación de aceite se ve afectada por el tipo de óxido de las nanopartículas y el fluido en el cual está dispersa; además se ha reportado que las NPs de silicio dan lugar a un incremento recuperación de petróleo en relación con sistemas que emplean agua destilada como fluido desplazante del 26% al cambiar la concentración de 0.1% hasta 0.3% en peso [4]. También, Arguijo D. reiteró que las NPs más comunes son las de sílice que favorecen una recuperación de aceite de más del 20% en areniscas [13]².

2.3.3. Emulsiones

Una emulsión se constituye por dos líquidos inmiscibles que por medio de agitación y un agente estabilizante (surfactante, sólidos, arcillas) permite formar una mezcla homogénea. Montañó J. mencionó que las emulsiones contienen dos fases; una dispersa y otra continua; donde la fase dispersa (también conocida como interna o discontinua) se presenta en pequeñas gotas, y la fase continua, (conocida como externa o dispersa) es donde las gotas se encuentran dispersas (**Figura 9**) [9].

² Si se desea conocer pruebas de desplazamiento realizadas con nanopartículas de sílice consultar la referencia [13].

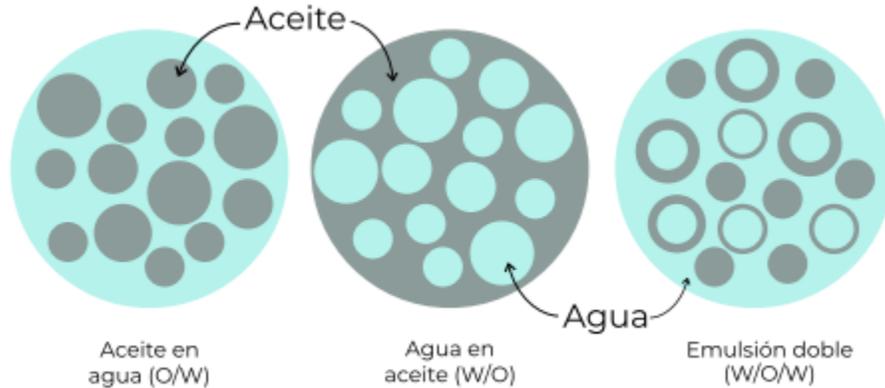


Fig. 9 – Tipos de emulsión. Modificado [5].

Es fundamental conocer el tipo de emulsión formada para llevar a cabo su clasificación. El tipo de emulsión depende de diferentes factores. De acuerdo con S. Sanz, las emulsiones se pueden clasificar con su fase continua y dispersa. Una emulsión es aceite en agua (O/W, O/A) cuando la fase externa es acuosa y la interna oleosa, en cambio es agua en aceite (W/O, A/O) cuando la fase externa es oleosa y la interna acuosa y por último las emulsiones múltiples (W/O/W) cuentan con una fase acuosa pequeña que se incluye en otra oleosa más grande, que a su vez está dispersa en una zona acuosa [18].

Asimismo, las emulsiones se clasifican por su tamaño de gota (**Tabla 4**), el cual depende de la tensión interfacial, el surfactante empleado, presencia de sólidos, la velocidad y tiempo de agitación, así como la relación de los fluidos que constituyen a la mezcla.

Tabla 4 – Clasificación de emulsiones de acuerdo con el tamaño de gota. Modificado [4], [19].

Tipo de emulsión	Radio [μm]	Cantidad de surfactante	Aplicación en la industria petrolera
Macroemulsión	1.1 – 100 [μm]	Moderado, de bajo a medio.	A nivel yacimiento para mejorar el control de la movilidad de los fluidos.
Nanoemulsión	10 – 100	Bajo a medio (<10%).	Alteración de roca en medio poroso para control de movilidad.
Microemulsión	2 – 50	Moderadamente bajo (>10-20%).	Recuperación mejorada y limpieza de pozo.

La formación y estabilidad de las emulsiones dependen de diversos factores, como el volumen de la fase dispersa, la distribución del tamaño de la gota, la energía de mezcla, los sólidos disueltos totales, la temperatura, la presión, entre otros [9]. Ya que en este trabajo se consideraron las propiedades viscosidad, rendimiento (estabilidad) y distribución de tamaño de gota para el seguimiento y análisis de las emulsiones formadas con los agentes emulsificantes empleados, a continuación, se describirán dichas propiedades:

Estabilidad: Después de formar una emulsión mediante agitación, las fases que la conforman pueden separarse en sus componentes, este proceso puede ser lento o rápido dependiendo del sistema. Las emulsiones débiles se separan en pocos minutos y el agua

separada se denomina agua libre. Las emulsiones medias se separan en decenas de minutos. Las emulsiones compactas se separan (a veces sólo parcialmente) en horas o incluso meses [20]. Generalmente, cuanto menor sea el tamaño de la gota <10 nm, mayor será la estabilidad de la emulsión [5].

Para determinar la estabilidad de una emulsión existen diferentes métodos basados en la distribución del tamaño de gota o en la separación de sus fases. J. Montaña menciona que los métodos apoyados en la distribución del tamaño de gota cuantifican el tamaño de gota de las emulsiones con respecto al tiempo por medio de técnicas visuales (microscopía, vídeo, fotografía), Resonancia Nuclear Magnética (RNM), Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIR), técnicas acústicas y electroacústico, distribución de luz, Dispersión de Neutrones en Ángulo Pequeño (SANS) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y los métodos en la separación de fases cuantifican la fracción de las fases dispersas que se separan de la emulsión, el método más común y el cual se utilizó en este proyecto fue el método de la botella (ver **Figura 10a y 10b**).

Distribución y tamaño de gota: Por medio del tamaño de las gotas de la fase dispersa es posible determinar la estabilidad y comportamiento reológico. La distribución del tamaño de las gotas en la formación de una emulsión depende de varios factores, incluidos la tensión interfacial (TIF), la naturaleza y la cantidad de surfactantes, la presencia de sólidos y las propiedades de volumen del aceite y el agua [5].

La estabilidad y la viscosidad de la emulsión depende de la distribución del tamaño de las gotas [5]; por lo que se cuentan con varios métodos para cuantificar el tamaño de gota de las emulsiones (estos se mencionan en la sección de estabilidad). En este proyecto se utilizaron técnicas visuales y estadísticas para conocer la distribución y tamaño de gota. A continuación, se muestra el procedimiento que se siguió; (1) se tomó una gota de la emulsión con ayuda de una pipeta, (2) se colocó la gota en un portaobjetos y se cubrió con un cubreobjetos, (3) se situó la muestra en el microscopio OMAX para realizar cuatro fotografías con un aumento de lente de 40x, (4) con la aplicación ImageJ se obtuvo el tamaño de gota, y finalmente (5) se realizó un histograma para un mejor análisis (ver **Figura 10c**)

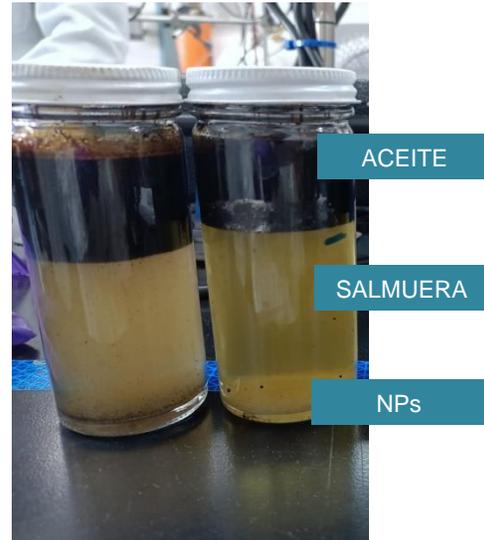
Viscosidad: La viscosidad cambia de acuerdo con el tipo de emulsión (W/O, O/W), el tamaño de gota, la salinidad, la velocidad de corte, entre otros. En el caso del tamaño de gota, las más pequeñas pueden acomodarse entre las intersecciones de otras más grandes, reduciendo así las interacciones y, por consiguiente, la viscosidad [20]. Las gotas pueden cambiar con respecto al tiempo debido a la estabilidad de la emulsión puesto que hay emulsiones que se rompen a los minutos de ser formadas.

Los valores de viscosidad en este trabajo se obtuvieron por medio de la implementación del viscosímetro Brookfield; (1) se configuró el equipo para que realizará mediciones a 30, 45, 60, 120, 200 y 250 [rpm], (2) el husillo se introducía en la emulsión con ayuda de un soporte, (3) se comenzaba la medición tomando en cuenta que el torque estuviera en un rango del 10% al 90% para asegurar una buena medición, si el torque se encontraba por

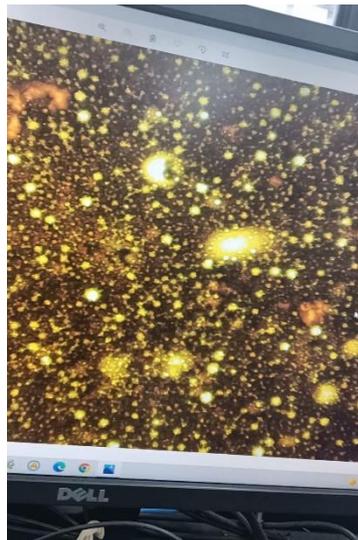
fuera del rango mencionado se hacía un cambio de husillo y se realizaba una nueva medición (ver **Figura 10d**).



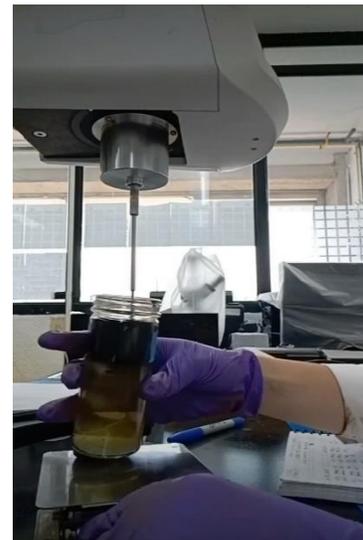
10a. Emulsión de aceite extrapesado. Agentes estabilizadores: surfactante y NPs. Día 0.



10b. Emulsión de aceite extrapesado. Agentes estabilizadores: surfactante y NPs. Día 7.



10c. Gotas observadas por el microscopio OMAX de una emulsión de aceite extrapesado. Día 0.



10d. Medición de viscosidad con viscosímetro Brookfield de una emulsión de aceite extrapesado. Día 7.

Fig. 10 – Toma de propiedades de las emulsiones de este proyecto

CAPÍTULO III

Premisas y Desarrollo

3.1. Premisas

Para este trabajo se consideraron las condiciones de la **Tabla 5**. Para la elaboración de la emulsión se utilizó un fluido compuesto por; salmuera, surfactante con/sin nanopartículas (agentes surfactantes) y aceite mineral o aceite extrapesado; para la caracterización de las emulsiones se determinó la distribución del tamaño de gota utilizando un microscopio OMAX y la aplicación ImageJ, y se midió la viscosidad con el equipo Brookfield. El rendimiento se determinó visualmente por medio de la prueba de la botella. Estas propiedades se tomaron en un rango de tiempo de 30 días.

Para la elaboración de las emulsiones se consideraron dos casos: (1) surfactante no iónico (nonilfenoletoxilado) y (2) surfactante no iónico (nonilfenoletoxilado) más + nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂).

Para la preparación de las emulsiones con aceite mineral se emplearon dos tipos de nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂). Por practicidad se nombraron de la siguiente manera; (1) NPs-I, estas nanopartículas son no porosas y (2) NPs-II, las cuales son modificadas con grupo amino. Si se desea conocer más sobre estas nanopartículas se puede consultar su hoja de seguridad en el **Anexo 2** de este trabajo.

Para las emulsiones con aceites extrapesados (KTIA y Jurásico) se utilizaron salmueras provenientes de campo con salinidades de 1,411 [ppm] y 44,251 [ppm], por razones prácticas se denominaron M1 y M2, respectivamente. Con las dos muestras de agua se realizaron 3 mezclas donde se varió la proporción (25/75, 50/50 y 75/25) de cada una de las salmueras dando como resultado un total 5 salmueras con diferente salinidad.

Tabla 5 – Condiciones para la elaboración de las emulsiones.

Condiciones	Aceite mineral (vaselina líquida)		KTIA (Cretácico Inferior)	Jurásico Superior
Número de emulsiones realizadas	33		30	30
Tipo de nanopartícula	NPs-I y NPs-II		NPs-I	NPs-I
Viscosidad [cP] a 25 °C	55 @120 [rpm]		3,660 @10 [rpm]	31,140 @10 [rpm]
Densidad [gr/cm ³]	0.839		0.96	0.98
°API	37.15		14.4	10.1
Salinidad [ppm]	MgCl ₂	1,000	1,411	
	NaCl	8,000	12,121	
	CaCl ₂	15,000	22,831	
	Agua de mar	35,000	33,541	
	sintética		44,251	
Concentración de surfactante [v/v]	1 %			
Concentración de nanopartícula [peso]	0.1 %			

Volumen de muestra [mL]	100
Tiempo de agitación [min]	10
Velocidad de agitación [rpm]	1,000
Temperatura [°C]	25

Es importante mencionar que para el caso de las emulsiones con KTIA sólo se cuenta con datos de viscosidad y rendimiento; mientras que para Jurásico se tienen datos de viscosidad y tamaño de gota. La falta de datos se debió a que existen diferentes archivos creados por personas distintas, los cuales fueron localizados y organizados en diferentes plataformas.

3.2. Desarrollo

Una vez que se organizó y seleccionó la información disponible, ésta se almacenó y comenzó el diseño del menú que permitirá la visualización de los datos. En la **Figura 11** se muestran los pasos que se siguieron para cumplir con el objetivo de este trabajo.



Fig. 11 – Procedimiento para la elaboración del proyecto.

Como se mencionó previamente, los datos que se trataron para la elaboración de este documento se obtuvieron por el equipo de trabajo de LIRFFF. Las emulsiones se prepararon con diferentes salmueras, aceite mineral o aceite crudo extrapesado, y combinaciones de agentes emulsificantes (nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂) y surfactante no-iónico). Es importante mencionar que no se forman emulsiones únicamente

con nanopartículas, debido a que no reducen la tensión interfacial considerablemente, por esta razón se utiliza surfactante o surfactante + nanopartículas para preparar las emulsiones. Los resultados experimentales de las emulsiones consisten en rendimiento, tamaño de gota y viscosidad que se tomaron en un barrido de tiempo.

La información se recopiló en archivos *.xlsx* y *.docx.*, se organizó y depuró en una carpeta para generar un índice general en Excel (*.xlsx*). También se dividió la información para extraerla de manera sencilla. Se planeó la programación de la aplicación *AIM Emulsions* y con ayuda de la herramienta *guide* de MATLAB® se diseñaron las interfaces que representan los menús que contienen los resultados organizados. Cada menú se presenta de forma anidada y con anotaciones sobre los datos experimentales de cada emulsión caracterizada, para su consulta. Después de diseñar todas las interfaces, se extrajeron los datos del archivo *.xlsx*. Finalmente, se empleó *application compiler* para crear una aplicación que permita a los usuarios ingresar a los resultados experimentales en cualquier equipo de cómputo, sin la instalación del compilador (MATLAB®).

En el capítulo siguiente, se presentan algunos ejemplos de los menús generados, los cuales se pueden consultar con la aplicación *AIM Emulsions*. De manera general, se pueden observar los resultados de la caracterización de emulsiones de aceite mineral y crudos extrapesados del proyecto: Plataforma yacimiento en miniatura para estudios de EOR mediante nanofluidos inteligentes en campos maduros y no convencionales en México. En este trabajo se identificaron tendencias, similitudes y diferencias a partir de los distintos parámetros experimentales empleados y se realizó una discusión sobre algunos casos, con ayuda de la aplicación generada.

CAPÍTULO IV

Resultados de la Aplicación

A continuación, se muestran capturas de pantalla de la aplicación *AIM Emulsions* para apreciar los resultados experimentales que se pueden consultar en cada sección: aceite mineral, KTIA y Jurásico. El primer menú mostrado (**Figura 12**) es la división entre emulsiones realizadas con aceite mineral y aceite crudo extrapesado de dos formaciones distintas (KTIA y Jurásico). En el extremo inferior derecho se presenta un vídeo como evidencia que las nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2) no forman emulsiones por sí solas.



Fig. 12 – Menú principal.

4.1. Aceite mineral

Al seleccionar la pestaña amarilla (aceite mineral) se despliega otro menú mostrando las opciones para consultar los resultados de emulsiones formadas con este aceite (**Figura 13**). En el nuevo menú se exhiben los resultados de viscosidad, tamaño de gota y rendimiento de las emulsiones, las cuales se prepararon con salmuera de cloruro de magnesio (MgCl_2), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de sodio (NaCl). La concentración de salmuera varió entre; 1,000, 8,000, 15,000 [ppm]. También se utilizó una salmuera de mar sintética con salinidad aproximada de 35,000 [ppm]. Las mediciones de viscosidad, rendimiento y tamaño de gota se realizaron a distintos tiempos, esto es, desde el día 1 hasta el 30 aproximadamente. El usuario podrá seleccionar la información que quiere consultar.

Es importante mencionar que cada menú presentado en esta sección cuenta con botones de color blanco cuya función es dirigir al usuario al menú principal, a un menú anterior o al menú general de aceite mineral si así lo desea.

EMULSIONES DE ACEITE MINERAL

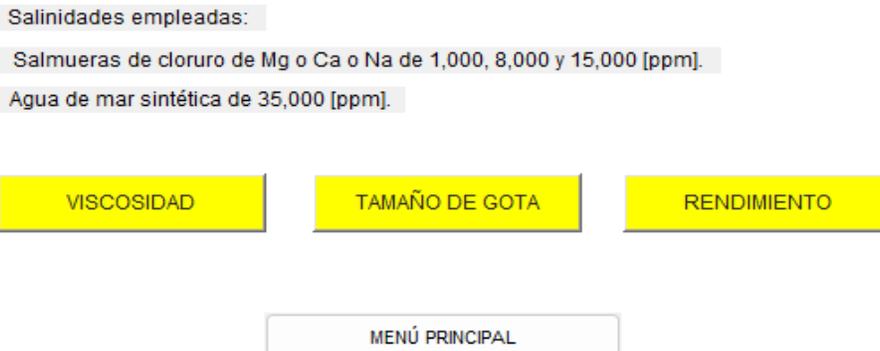


Fig. 13 – Menú general de emulsiones de aceite mineral.

Cada uno de los botones presentados en el menú de la **Figura 13** dirige a gráficas y tablas donde se observan los resultados. Ahora bien, si se selecciona la opción de “viscosidad” se despliegan tres opciones: (1) surfactante, (2) surfactante + nanopartícula y (3) comparación entre (1) y (2), ver **Figura 14**. En cada sección, se presentan botones que dirigen a gráficas de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Algunos ejemplos de lo que contiene este menú se analizan en la sección de discusión de resultados.

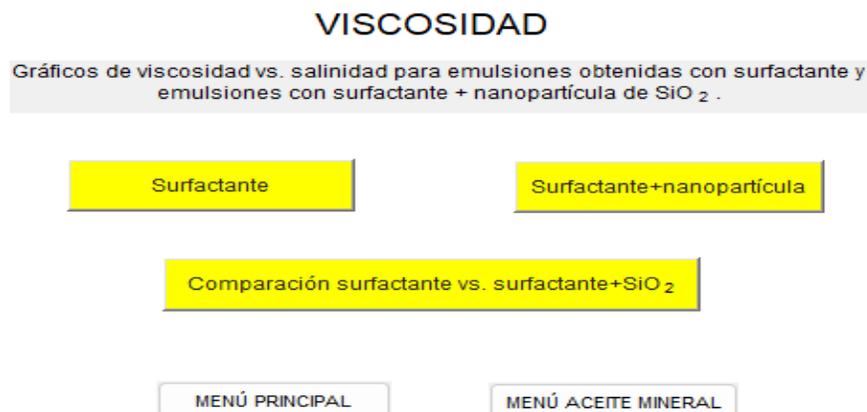


Fig. 14 – Viscosidad de aceite mineral.

En la **Figura 15** se observan botones que dirigen a los resultados de viscosidad de las emulsiones elaboradas sólo con surfactante. Los parámetros se pueden consultar en el recuadro gris. Es posible apreciar en este menú un ejemplo de la complejidad de la recopilación de algunos resultados. Para las emulsiones con aceite mineral no se presentan datos de la relación 30% aceite mineral – 70% salmuera debido a que estas emulsiones son bastante difíciles de caracterizar con el viscosímetro.

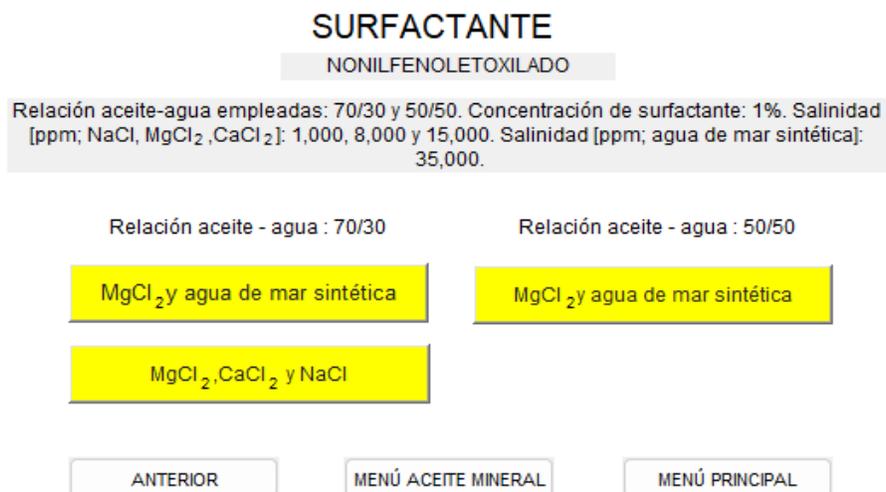


Fig. 15 – Opciones de gráficos viscosidad [cP] vs [rpm]: surfactante.

En la opción de surfactante + nanopartícula (**Figura 16**), se pueden consultar las viscosidades de las emulsiones que se presentan en la **Tabla 5**, donde los parámetros se exhiben en el recuadro gris y también se hace distinción del tipo de agentes surfactantes que se utilizan, es decir, nanopartículas de óxido de silicio tipo I y tipo II. También en este menú es posible apreciar la complejidad de la recopilación de datos pues no fue posible recuperar los datos de CaCl₂ y NaCl para el caso de 50% aceite mineral – 50% salmuera, tampoco para 30% aceite mineral – 70% salmuera.

Por último, se pueden consultar las comparaciones entre las emulsiones con surfactante y surfactante + nanopartículas con respecto al tiempo para la relación 70% aceite mineral – 30% salmuera, así como 50% aceite mineral – 50% salmuera con salinidad variable de 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 [ppm]. La **Figura 17** muestra una captura del menú de viscosidad con las comparaciones posibles para los días 0, 7, 15, 20, 22 y 28. Cabe resaltar que es posible volver al menú principal o regresar al menú anterior con los botones blancos de abajo.

SURFACTANTE + NANOPARTÍCULA

(A) NONILFENOLETEOXILADO + NPs-I

(B) NONILFENOLETEOXILADO + NPs-II

Relación aceite-agua empleadas: 70/30, 50/50 y 30/70. Concentración de surfactante: 1%. Concentración de nanopartículas: 0.1%. Salinidad [ppm; NaCl, MgCl₂, CaCl₂]: 1,000, 8,000 y 15,000. Salinidad [ppm; agua de mar sintética]: 35,000.

Relación aceite - agua : 70/30

MgCl₂ (A)

MgCl₂ (B)

CaCl₂ (B)

NaCl (B)

35000 [ppm] (A) (B)

Relación aceite - agua : 50/50

MgCl₂ (A)

35000 [ppm] (A) (B)

Relación aceite - agua : 30/70

35000 [ppm] (B)

NOTA: Se cuentan con datos de emulsiones con agua destilada pero no se presentan debido a que no son representativos de campo.

ANTERIOR

MENÚ ACEITE MINERAL

MENÚ PRINCIPAL

Fig. 16 – Opciones de gráficos viscosidad [cP] vs [rpm]: surfactante + SiO₂.

COMPARACIÓN SURFACTANTE VS. SURFACTANTE + NANOPARTÍCULAS

NONILFENOL ETOXILADO + ÓXIDO DE SÍLCIO (SiO₂) NPs-I

Relación aceite-agua empleadas: 70/30 y 50/50. Concentración de surfactante: 1%. Concentración de nanopartículas: 0.1%. Salinidad [ppm; MgCl₂]: 1,000, 8,000 y 15,000. Salinidad [ppm; agua de mar sintética]: 35,000.

70%aceite-30%agua

Día 0

Día 7

Día 15

Día 22

50%aceite-50%agua

Día 0

Día 5

Día 20

Día 28

ANTERIOR

MENÚ ACEITE MINERAL

MENÚ PRINCIPAL

Fig. 17 – Comparación de resultados de viscosidad entre las relaciones 70%aceite-30%agua y 50%aceite-50%agua.

Cada uno de los botones presentados en los menús previamente mencionados dirige a las gráficas con los datos organizados de acuerdo con el menú específico que se consulte. Por ejemplo, en la **Figura 18** se presentan los datos de viscosidad para la relación 70% aceite mineral – 30% salmuera (MgCl₂) donde se aprecian las gráficas de velocidad de corte contra

viscosidad a distintos tiempos (arriba), o bien, con variación de la salinidad (abajo), para las emulsiones aceite en agua (O/W).

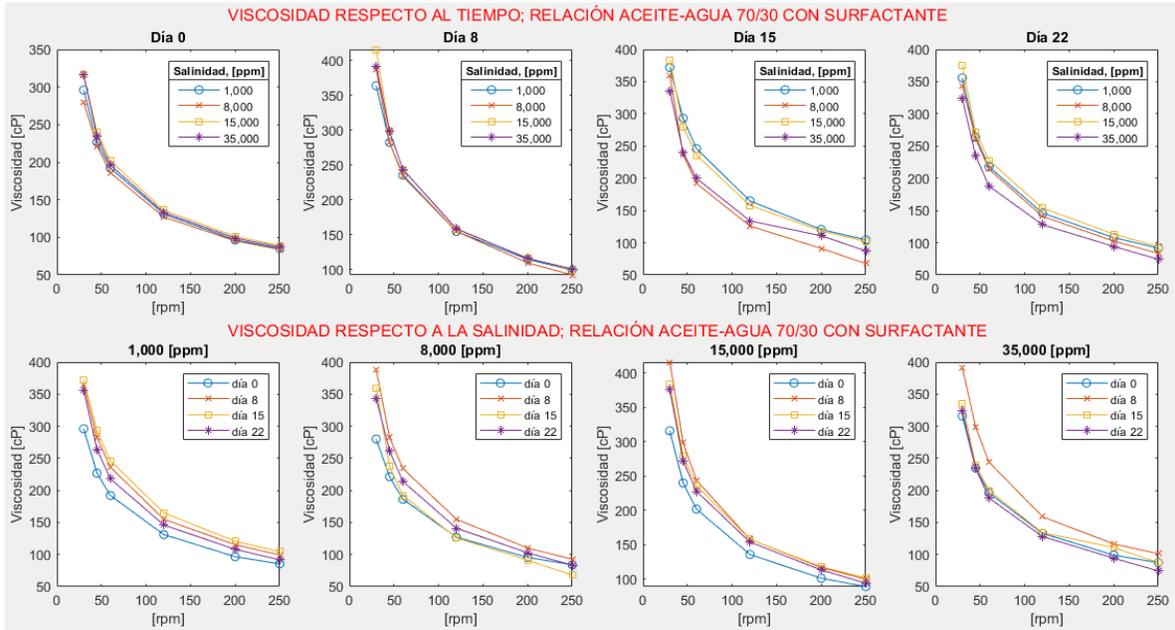


Fig. 18 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.

Se cuenta con algunas herramientas en la aplicación desarrollada para apreciar mejor los resultados. Por ejemplo, el usuario puede hacer un acercamiento en la gráfica con la lupa con signo positivo, también puede hacer un alejamiento con la lupa de signo negativo, así como mover la gráfica con “la manita” y conocer los valores en cada punto de la gráfica con el icono de cuadrado amarillo y equis negra (ver recuadro rojo de la **Figura 19**).

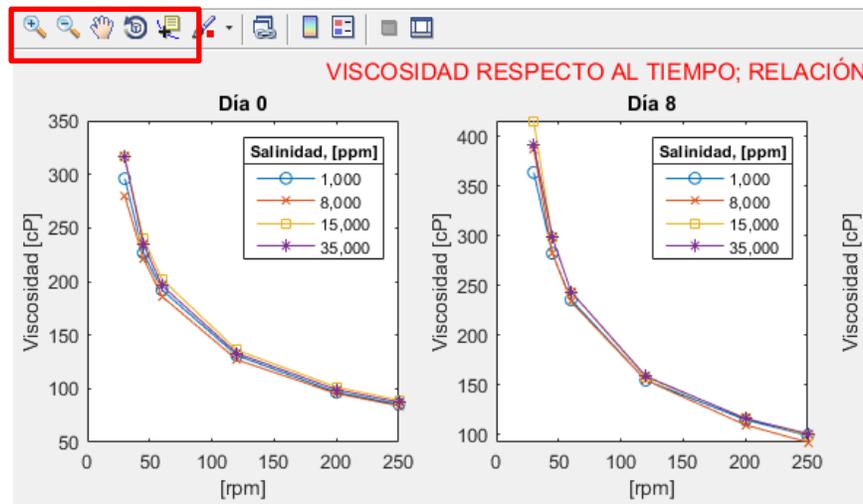


Fig. 19 – Herramientas para la visualización de gráficas.

También, es viable tener varias ventanas abiertas con diferentes resultados y en cada una de ellas se puede visualizar qué datos contienen usando como guía el título, localizado en la parte superior, facilitando la comparación y el análisis de los resultados que se van desplegando (**Figura 20**).

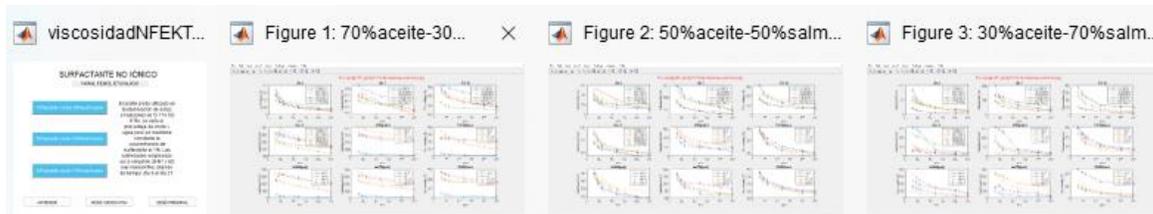


Fig. 20 – Ejemplo de ventanas abiertas simultáneamente.

Retomando las opciones que se despliegan en el menú “emulsiones de aceite mineral” presentado en la **Figura 13**, también es posible consultar el tamaño de gota (diámetro) y el rendimiento de las emulsiones generadas. Para el tamaño de gota se presenta un menú (**Figura 21**) donde se exhiben los resultados de acuerdo con la relación aceite-agua por día. Los parámetros se encuentran en el recuadro gris; cada botón contiene la distribución de tamaño de gota la cual se ordenó por salinidad para las emulsiones con surfactante, así como surfactante + nanopartículas como agentes emulsificantes. Al seleccionar una opción del menú de la **Figura 21** se despliegan los histogramas generados con la distribución del tamaño de gota promedio [μm]. Un ejemplo esto se presenta en la **Figura 22**.

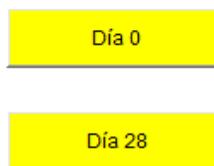
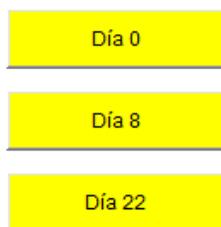
TAMAÑO DE GOTA

Relación aceite-agua empleadas: 70/30, 50/50 y 30/70. Concentración de surfactante: 1%.
 Concentración de nanopartículas: 0.1%. Salinidad [ppm; NaCl, MgCl₂, CaCl₂]: 1,000, 8,000 y 15,000. Salinidad [ppm; agua de mar sintética]: 35,000.

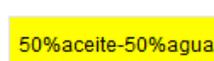
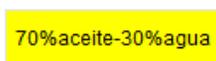
Distribución de frecuencias para surfactante y surfactante + NPs-; acumulada absoluta y densidad:

Relación aceite - agua : 70/30

Relación aceite - agua : 50/50



Gráficas tamaño de gota promedio vs. salinidad [MgCl₂]:



MENÚ ACEITE MINERAL

MENÚ PRINCIPAL

Fig. 21 – Menú de tamaño de gota para aceite mineral.

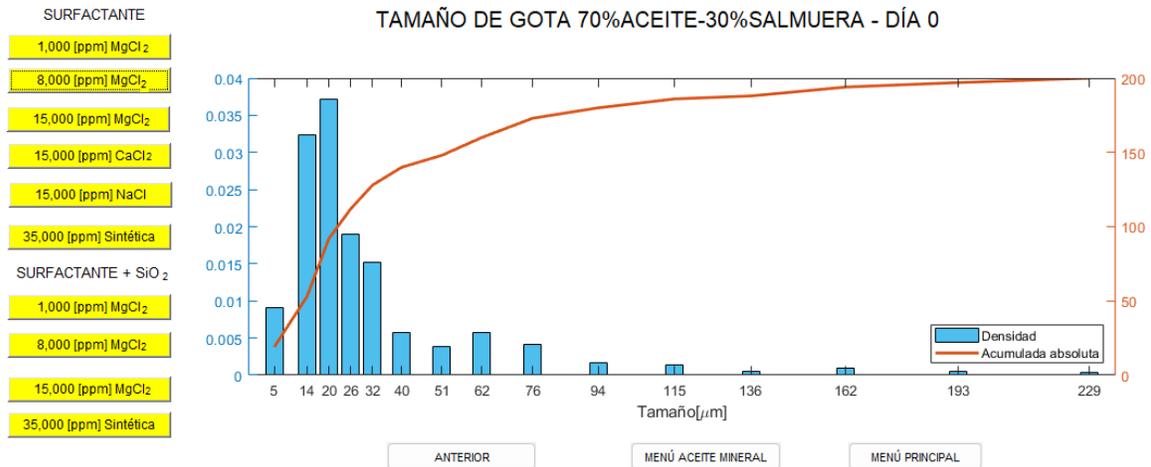


Fig. 22 – Ejemplo de la visualización de la distribución de tamaño de gota para una emulsión 70% aceite – 30% agua, salinidad 8,000 [ppm].

El último botón del menú “emulsiones de aceite mineral” mostrado en la **Figura 13** dirige a una tabla donde se muestran los resultados sobre el rendimiento de las emulsiones elaboradas con salmuera de MgCl₂ a 1,000, 8,000 y 15,000 [ppm] de salinidad y para agua sintética de mar (35,000 [ppm]) (ver **Figura 23**). En la primera columna se presenta la salinidad del agua seguida de las letras (A) o (B), las cuales corresponden a surfactante y surfactante + nanopartículas, respectivamente. La primera fila muestra las relaciones agua-aceite empleadas.

RENDIMIENTO

(A) NONILFENOL ETOXILADO

(B) NONILFENOL ETOXILADO + ÓXIDO DE SILICIO (SiO₂) NPs-I

Relación agua-aceite empleadas: 30/70, 50/50 y 70/30. Concentración de surfactante: 1%. Concentración de nanopartículas: 0.1%. Salinidad [ppm; MgCl₂]: 1,000, 8,000 y 15,000. Salinidad [ppm; agua de mar sintética]: 35,000.

Rendimiento en [%] respecto al volumen de agua de la emulsión. Volumen de agua/aceite.

Salinidad [ppm]	DÍA 0			DÍA 7		
	30/70	50/50	70/30	30/70	50/50	70/30
1,000 (A)	79.6000	55.1000	36	77.5500	53.0600	32
1,000 (B)	79.6000	51.1000	38	57.5100	51.0600	34
8,000 (A)	79.6000	55.1000	36	75.5100	51.0200	32
8,000 (B)	79.6000	51.1000	34	75.5100	51.0600	34
15,000 (A)	NaN	57.1000	36	NaN	51.0200	34
15,000 (B)	83.7000	51.1000	38	77.5500	51.0600	34
35,000 (A)	NaN	59.2000	38	NaN	55.1000	32
35,000 (B)	81.6000	51.1000	34	75.5100	51.0600	34

Nota: después del 7 las emulsiones no presentan un cambio en el rendimiento.

Botones: MENÚ ACEITE MINERAL, VER RENDIMIENTO, MENÚ PRINCIPAL

Fig. 23 – Rendimiento para emulsiones de aceite mineral para el día 0 y 7.

4.2. Crudos extrapesados (KTIA Y Jurásico)

En la **Tabla 5** se presentan los datos obtenidos para el aceite extrapesado de dos formaciones; KTIA y Jurásico, seleccionando el botón correspondiente del menú principal (**Figura 12**) se desplegará un submenú mostrando las propiedades viscosidad, tamaño de gota y rendimiento para cada tipo de aceite. A continuación, se muestran las capturas de pantalla de la aplicación *AIM Emulsions*; se tomó como ejemplo para viscosidad las emulsiones con KTIA, debido a que este aceite es similar al del Jurásico, para tamaño de gota se tomó el menú de Jurásico y en rendimiento de KTIA.

Al igual que para el menú de aceite mineral, esta sección cuenta con botones en la parte inferior para dirigir al usuario al; menú principal, menú anterior o menú general del aceite. La **Figura 24** muestra el menú para el aceite KTIA donde se pueden consultar los datos de viscosidad y rendimiento de las emulsiones con aceite crudo extrapesado KTIA, las cuales se prepararon con salmueras de campo. La concentración de salmuera varió entre; 1,411 y 44,251 [ppm]. Las mediciones de viscosidad y rendimiento se realizaron con respecto a un tiempo de 21 días.

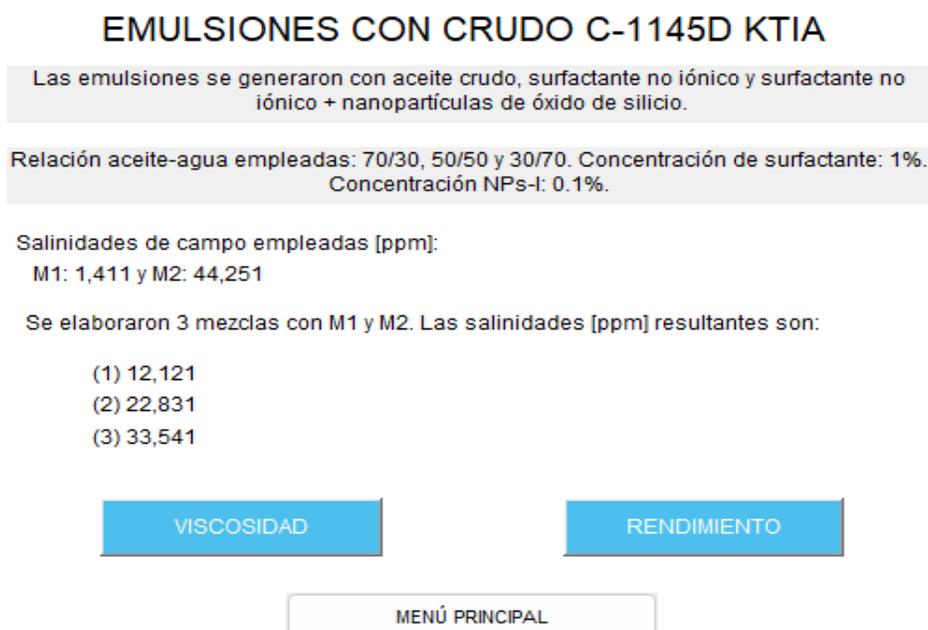


Fig. 24 – Menú principal para aceite KTIA.

El apartado de “viscosidad” se clasifica en; (1) surfactante y (2) surfactante + nanopartículas no porosas, así como la comparación entre estos (**Figura 25**). Para los casos (1) y (2) el menú es muy similar, en la **Figura 26** se presenta el menú para el caso (2), en el cual es posible consultar las gráficas de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] para distintas relaciones de aceite y agua al variar la salinidad. Estas gráficas están organizadas con respecto al tiempo y por salinidad para mejor visualización de los resultados obtenidos. También, se pueden consultar las condiciones que se consideraron para la elaboración de las emulsiones.

VISCOSIDAD

Gráficos de viscosidad vs salinidad para emulsiones obtenidas con surfactante y emulsiones con surfactante + nanopartículas de SiO₂.



Fig. 25 – Menú de viscosidad para emulsiones con aceite KTIA.

SURFACTANTE + NANOPARTÍCULAS

NONILFENOL ETOXILADO + ÓXIDO DE SILICIO (SiO₂) NPs-I

Relación aceite-agua empleadas: 70/30, 50/50 y 30/70. Concentración de surfactante: 1%. Concentración de nanopartículas no porosas: 0.1%. Salinidades de campo [ppm]; M1: 1,411 y M2: 44,251. Salinidad [ppm; mezclas]: 12,121, 22,831 y 33,541.

Datos organizados en barrido de tiempo:



Datos organizados por salinidad:

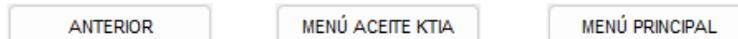


Fig. 26 – Viscosidad para emulsiones preparadas con surfactante + nanopartículas a distintas relaciones agua-aceite.

En la **Figura 27** se presenta el menú de “comparación de viscosidad de las emulsiones de surfactante y surfactante + nanopartículas” donde se exhiben las pestañas (opciones) para consultar los resultados de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] de las diferentes relaciones aceite-agua organizados con respecto al tiempo. Cada botón contiene las gráficas ordenadas por salinidad para analizar el comportamiento de las emulsiones estabilizadas con surfactante y en conjunto; surfactante + nanopartículas.

COMPARACIÓN SURFACTANTE VS. SURFACTANTE + NANOPARTÍCULAS

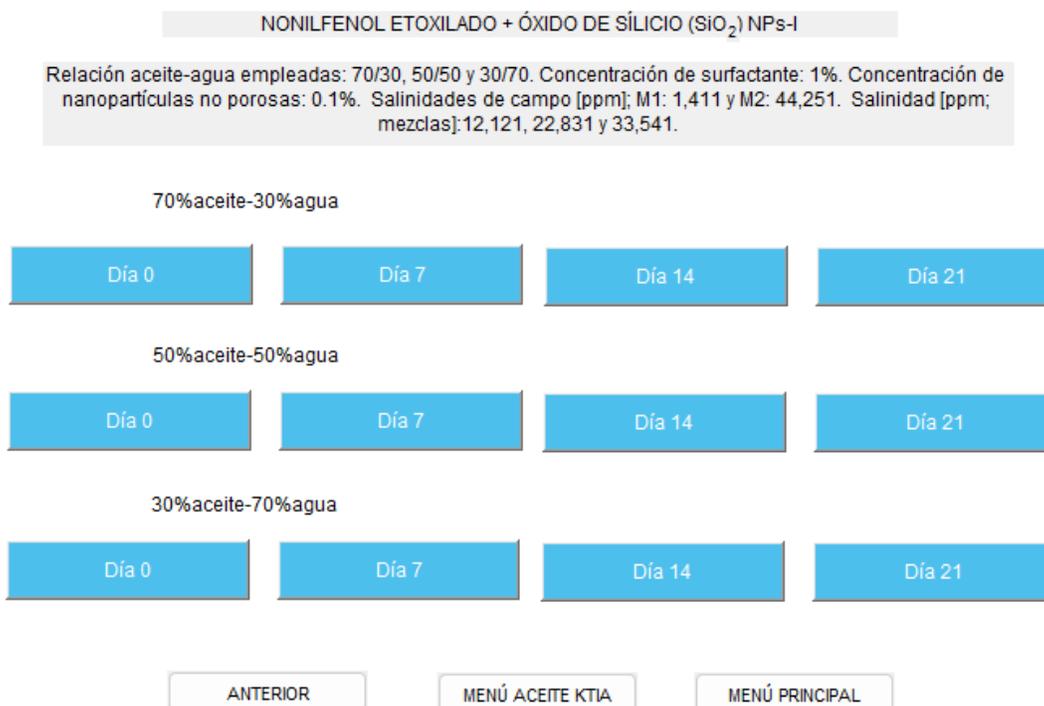


Fig. 27 – Comparación de la viscosidad entre emulsiones estabilizadas con agente emulsificante (1) y (2) con respecto al tiempo.

Semejante al menú de “emulsiones con aceite mineral”, las gráficas de viscosidad tienen las mismas herramientas para mejor visualización de los resultados. Por otro lado, para la consulta del tamaño de gota se despliega el menú de las emulsiones con aceite Jurásico mostrado en la **Figura 28** donde se exhiben las condiciones experimentales consideradas, así como las opciones para consultar los histogramas del tamaño de gota promedio [µm] con respecto al cambio en la salinidad. Los histogramas son similares a los presentados en la **Figura 22** para el aceite mineral. La discusión de los resultados se abarca en la sección siguiente de este trabajo.

Por último, el rendimiento de las emulsiones con aceite KTIA se muestra en la **Figura 29**. En la primera columna se presenta la salinidad del agua seguida de las letras (A) o (B), las cuales corresponden a surfactante y surfactante + nanopartículas, respectivamente. La primera fila muestra las relaciones agua/aceite empleadas. El rendimiento se muestra sólo para el día 0 y 7. Por ejemplo; el rendimiento al día 7 para 30% aceite – 70% agua a una salinidad de 12,121 [ppm] realizada con surfactante y nanopartículas se encuentra en el recuadro rojo de la **Figura 29**. También, se pueden observar los parámetros experimentales utilizados para la elaboración de las emulsiones.

TAMAÑO DE GOTA

Relación aceite-agua empleadas: 70/30, 50/50 y 30/70. Concentración de surfactante: 1%. Concentración de nanopartículas no porosas: 0.1%. Salinidades de campo [ppm]; M1: 1,411 y M2: 44,251. Salinidad [ppm; mezclas]: 12,121, 22,831 y 33,541.

Distribución de frecuencias para surfactante y surfactante + NPs-I; acumulada absoluta y densidad para el día 0:

70%aceite crudo-30%salmuera

50%aceite crudo-50%salmuera

30%aceite crudo-70%salmuera

Gráficas tamaño de gota promedio vs. salinidad:

70%aceite crudo-30%salmuera

50%aceite crudo-50%salmuera

30%aceite crudo-70%salmuera

MENÚ CRUDO JURÁSICO

MENÚ PRINCIPAL

Fig. 28 – Menú tamaño de gota para emulsiones con aceite Jurásico.

RENDIMIENTO

(A) NONILFENOL ETOXILADO

(B) NONILFENOL ETOXILADO + ÓXIDO DE SILICIO (SiO₂) NPs-I

Relación agua-aceite empleadas: 70/30, 50/50 y 30/70. Concentración de surfactante: 1%. Concentración de nanopartículas: 0.1%. Salinidad [ppm; agua de campo]: 1,411 y 44, 251. Salinidad [ppm; mezclas]: 12,121, 22,831 y 33,541.

Rendimiento en [%] respecto al volumen de agua de la emulsión. Volumen de agua/aceite.

Salinidad [ppm]	DÍA 0			DÍA 7		
	70/30	50/50	30/70	70/30	50/50	30/70
1,411 (A)	93.8776	61.2245	45.8333	67.3469	57.1429	35.4167
1,411 (B)	70.5882	60.7843	55.7692	58.8235	47.0588	34.6154
12,121 (A)	80	62	39.5833	60	54	31.2500
12,121 (B)	84.3137	58.8235	60.7843	66.6667	50.9804	39.2157
22,831 (A)	78.2609	56.0000	37.5000	67.3913	50	33.3333
22,831 (B)	86.2745	42.0000	60.3774	66.6667	38	35.8491
33,541 (A)	80	55.1020	44.6809	66.0000	46.9388	34.0426
33,541 (B)	84.6154	60.4167	60.7843	65.3846	50	33.3333
44,251 (A)	82.2222	54	52.9412	64.4444	48	33.3333
44,251 (B)	88.2353	51.9231	53.0612	64.7059	46.1538	30.6122

Nota: después del 7 las emulsiones no presentan un cambio en el rendimiento.

MENÚ ACEITE KTIA

VER RENDIMIENTO

MENÚ PRINCIPAL

Fig. 29 – Rendimiento de emulsiones con aceite KTIA.

CAPÍTULO V

Discusión de Resultados

En esta sección, se discuten las tendencias encontradas al recopilar, organizar y comparar los resultados de: viscosidad, tamaño de gota y rendimiento de las emulsiones de aceite mineral y crudos extrapesados con ayuda de la aplicación *AIM Emulsions*.

Primero, se analizaron las gráficas de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Las mediciones de viscosidad se realizaron a; 30, 60, 120, 200 y 250 [rpm] hasta por un periodo de 30 días para las emulsiones de aceite mineral y las emulsiones de aceite Jurásico. Después, se examinaron los resultados de tamaño de gota (aceite mineral y Jurásico). Por último, el rendimiento (aceite mineral) permitió conocer la cantidad de emulsión formada. De manera general, las emulsiones de aceite mineral son estables por más de 30 días (prueba de la botella); sin embargo, las emulsiones de aceite crudo resultaron mucho menos estables y después del día 7 ó menos, éstas se rompen. En algunos casos las emulsiones se rompen a pocos minutos de su preparación. El análisis de los datos presentados en este trabajo corresponde a las condiciones que dieron lugar a las emulsiones más estables.

5.1. Aceite mineral

Se presenta el análisis de los resultados de las gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], rendimiento y tamaño de gota para las emulsiones formadas con aceite mineral. Las condiciones experimentales empleadas como; relación agua-aceite, salinidad, concentración de agentes emulsificantes se observan en la **Tabla 5**. Estas emulsiones sirvieron de base para identificar los parámetros esenciales en la elaboración de las emulsiones con aceites extrapesados. Por ejemplo, se eligió la nanopartícula SiO₂-I. Además, se consideraron los mismos parámetros (ver **Tabla 5**) porque se observó la efectividad de estos para realizar una comparación.

5.1.1. Viscosidad

En este apartado se exhiben los resultados de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] para las emulsiones de aceite mineral a salinidad variable y con respecto al tiempo. Cabe señalar que los resultados se presentan en dos formas distintas; (arriba) gráficos de viscosidad respecto al tiempo y (abajo) viscosidad respecto a la salinidad, para que el usuario tenga a su disposición formas distintas de comparación. La discusión se divide en cuatro secciones; 1. surfactante, 2. surfactante + nanopartículas como agentes emulsificantes, 3. comparación de nanopartículas NPs-I y NPs-II, y 4. comparación entre 1 y 2.

1. Surfactante

El surfactante nonilfenoletoxilado 10 M es de tipo no-iónico y se utilizó como agente emulsificante. Como se mencionó anteriormente, los surfactantes tienen la capacidad de reducir la tensión interfacial entre el agua y el aceite, promoviendo la formación de

emulsiones. Se discuten a continuación, los resultados de emulsiones con relación aceite-agua de 70%-30% y 50%-50%.

70% aceite mineral – 30% salmuera

En la **Figura 30** se muestran las gráficas de viscosidad para las emulsiones con respecto al tiempo (arriba) hasta por 22 días y la viscosidad con respecto a la salinidad (abajo) desde 1,000 hasta 35,000 [ppm]. Es posible observar que la viscosidad de las emulsiones es menor (ca. 280 a 320 [cP]) en el día de su preparación (día 0). Para el día 8 la viscosidad aumenta y alcanza un valor máximo (ca. 360 a 420 [cP]) en todas las emulsiones con excepción de la emulsión preparada con salmuera de 1,000 [ppm], que alcanza su viscosidad máxima al día 15. Para el día 22 la viscosidad de todas las emulsiones disminuye (ca. 330 a 380 [cP]), pero para la emulsión con salinidad de 35,000 [ppm] disminuye aún más que la viscosidad medida en el día 0. El gráfico (**Figura 31**) de salinidad contra viscosidad a velocidad de corte constante muestra mejor lo comentado.

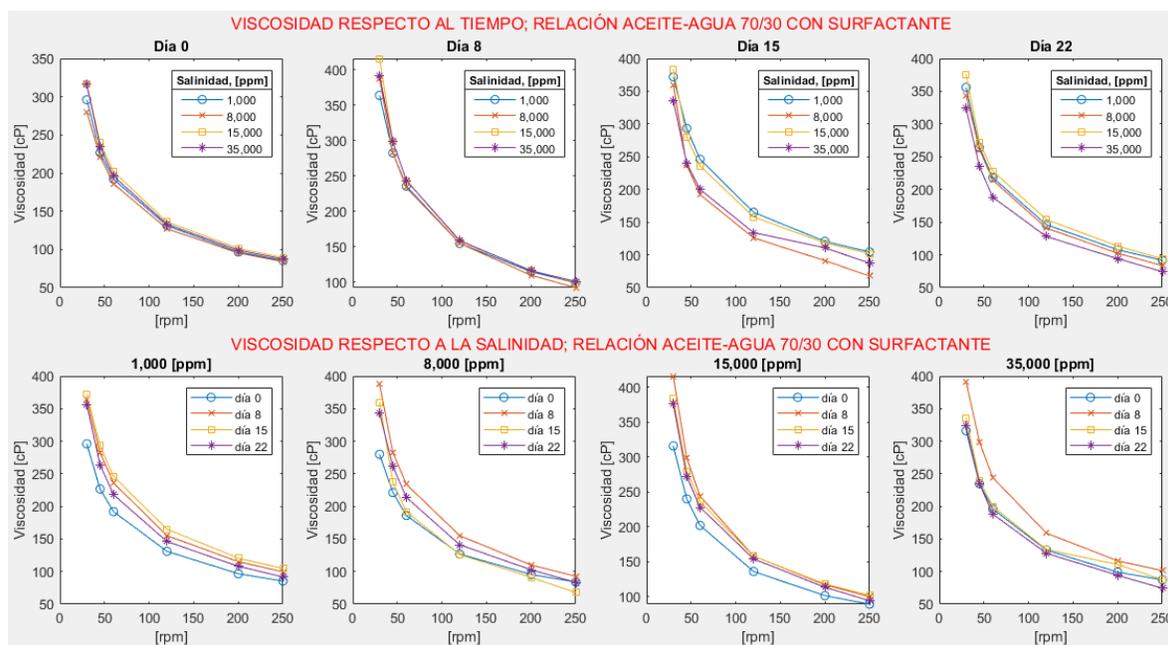


Fig. 30– Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.

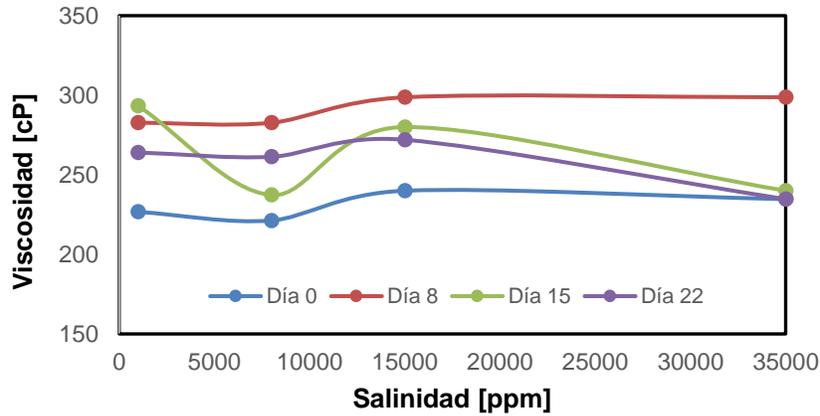


Fig. 31 – Salinidad [ppm] vs. viscosidad [cP] a revolución constante (@45 [rpm]).

En la **Figura 32** se presentan gráficos donde se compara la viscosidad de las emulsiones variando el tipo de ión presente en la salmuera. Se aprecia que las emulsiones elaboradas con salmueras de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} a 1,000, 8,000, 15,000 y 35,000 [ppm], presentan la tendencia general, esto es, la viscosidad incrementa con respecto al tiempo. Las emulsiones con salmuera de sodio y calcio presentan mayor viscosidad sin importar el tiempo en comparación con las emulsiones de salmuera de magnesio. Por ejemplo, esto es bastante notorio para las emulsiones preparadas con salmueras de Na^+ y Ca^{2+} cuya viscosidad máxima es de aproximadamente 1,000 [cP] a los 22 días de preparación. Mientras que para la emulsión con salmuera de Mg^{2+} su valor máximo es de 400 [cP] aproximadamente (ver viscosidad respecto a tipo de ión).

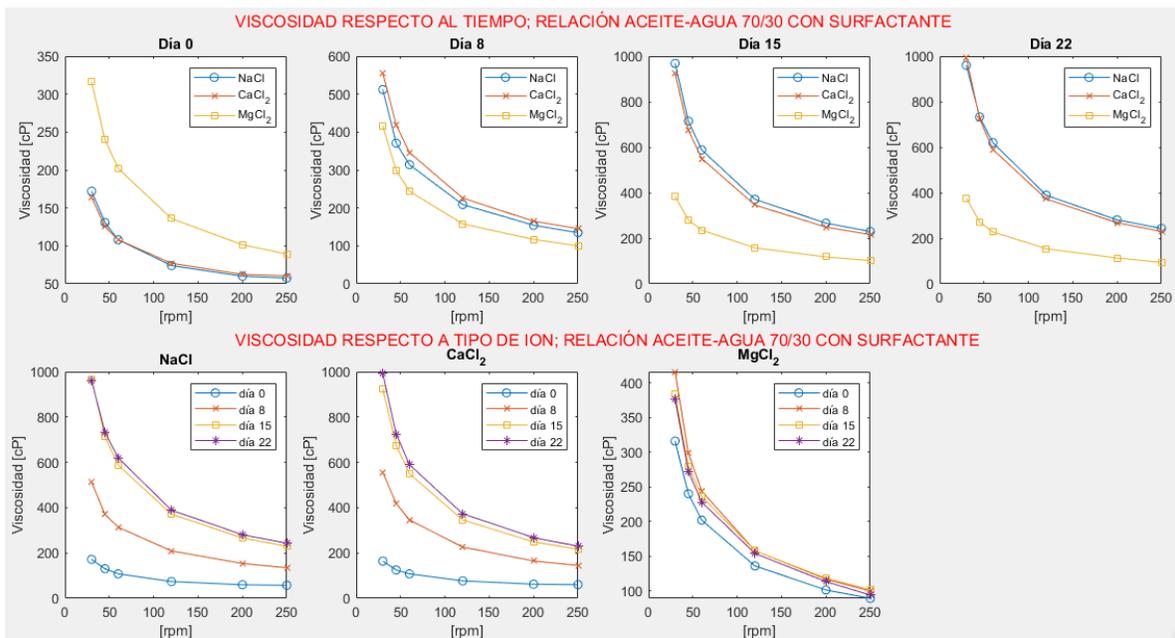


Fig. 32 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera. Comparación de iones (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}).

50% aceite mineral – 50% salmuera

En la **Figura 33** se muestran las gráficas de viscosidad para las emulsiones con respecto al tiempo (arriba), hasta por 28 días, y la viscosidad con respecto a la salinidad (abajo), desde 1,000 hasta 35,000 [ppm]. Es posible observar que la viscosidad de las emulsiones es menor (ca. 180 a 290 [cP]) en el día de su preparación (día 0). Para las emulsiones con salinidades de; 1,000, 15,000 y 35,000 [ppm], la viscosidad máxima (ca. 520 a 630 [cP]) se presenta en el día 15 y disminuye (ca. 480 a 510 [cP]) para el día 22. Para la emulsión con 8,000 [ppm] de salinidad, su viscosidad máxima se observa los días 15 y 22, sin presentar una disminución en la viscosidad.

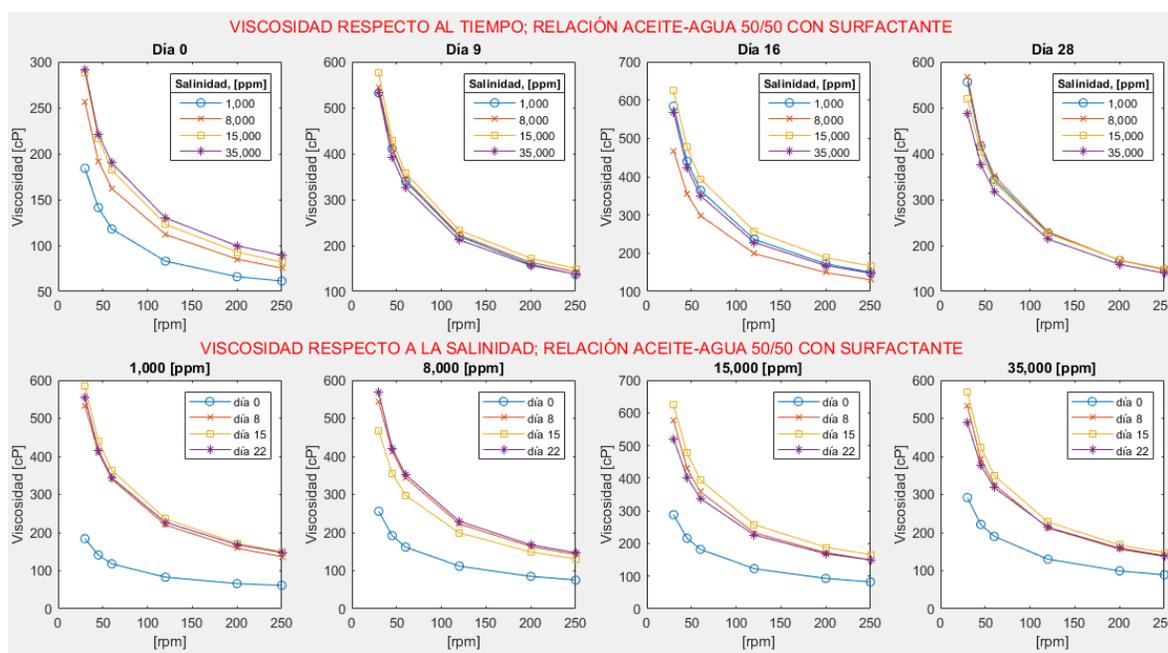


Fig. 33 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.

A diferencia de las emulsiones con relación aceite-salmuera de 70%-30%, en las emulsiones 50%-50% puede identificarse que la emulsión preparada con menor salinidad es la que presenta menor viscosidad al día 0; sin embargo, para el día 28 de seguimiento la viscosidad es muy similar al resto de las emulsiones preparadas. La viscosidad de esta emulsión se triplicó, mientras que para el resto de las emulsiones (preparadas con salmueras de 8,000, 15,000 y 35,000 [ppm]) la viscosidad se duplicó durante el periodo de observación.

Otra particularidad de las emulsiones preparadas con surfactante es que a mayor volumen de aceite (70%) la viscosidad de las emulsiones resultó ser similar en el día de la preparación, pero, en general, el incremento de viscosidad con respecto al tiempo fue menor comparada con las emulsiones con volumen de aceite de 50%.

2. Surfactante + nanopartícula

Una vez que se evaluó el desempeño del surfactante como único agente emulsificador, el siguiente paso consistió en combinar el surfactante con nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2). Como se mencionó previamente, en este trabajo se emplearon dos tipos de nanopartículas (NPs-I y NPs-II). Se ha reportado que algunas nanopartículas son auxiliares en la disminución de la tensión interfacial; sin embargo, varios autores han reportado que las nanopartículas inhiben la absorción de los surfactantes en el medio poroso, con lo cual se hace más eficiente el desempeño de los surfactantes. A continuación, se presentan y discuten los resultados de emulsiones preparadas con relación aceite-agua de 70%-30% y 50%-50%.

70% aceite mineral – 30% salmuera

Para la preparación de estas emulsiones se utilizaron las nanopartículas NPs-I. En la **Figura 34**, se exhiben las gráficas de viscosidad para las emulsiones con respecto al tiempo (arriba), hasta por 28 días, y la viscosidad con respecto a la salinidad (abajo), desde 1,000 hasta 35,000 [ppm]. De manera general, se observa que la viscosidad de las emulsiones es menor (ca. 300 a 400 [cP]) el día de su elaboración (día 0) y alcanza su valor máximo (ca. 1,400 a 1,500 [cP]) al día 5 para todas las salinidades estudiadas. Posteriormente, el día 12 la viscosidad disminuye (ca. 800 a 900 [cP]) sin alcanzar el valor del día 0. El valor de viscosidad del día 12 y del día 28 son muy semejantes, por lo que se decidió no continuar con el monitoreo del tiempo.

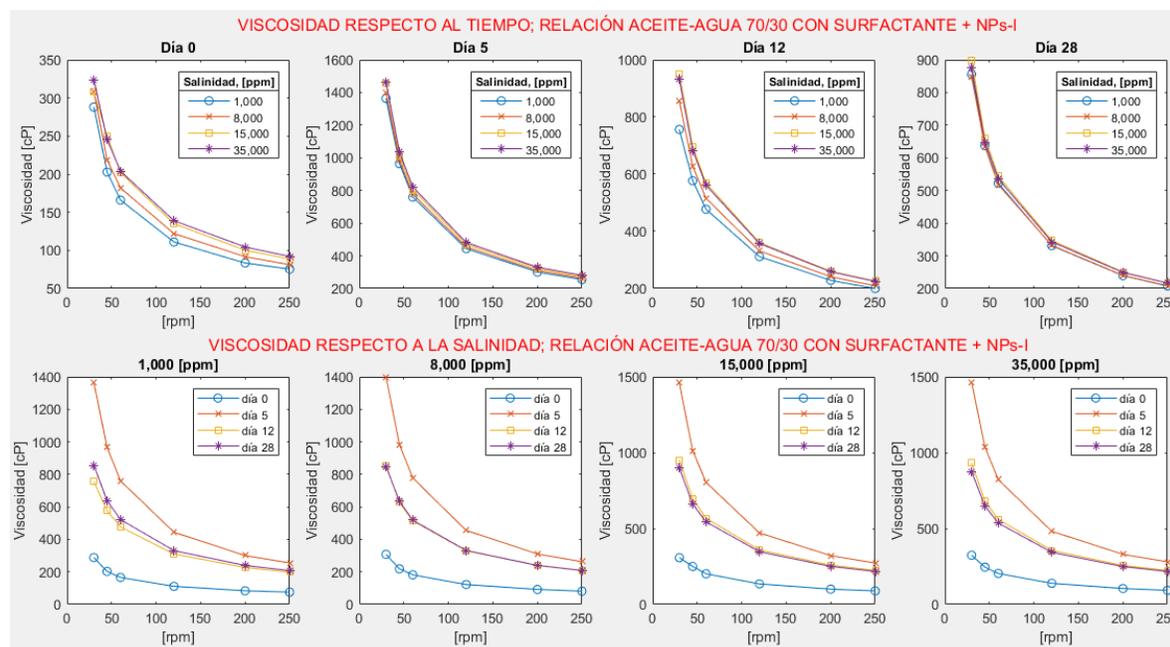


Fig. 34 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.

Para la preparación de estas emulsiones se utilizaron las nanopartículas NPs-II para evaluar el desempeño del tipo de ión presente en la salmuera, por cuestiones de practicidad

sólo se presentan los gráficos de las emulsiones con salmuera de magnesio. Los demás resultados se pueden consultar en la aplicación de su sección correspondiente (ver **Figura 16**). Para esta comparación se consideraron las emulsiones con la relación 70% aceite mineral – 30% salmuera debido a que con este volumen las emulsiones son más estables.

Las emulsiones elaboradas con las salmueras de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , presentan su menor valor de viscosidad en el día de su preparación (día 0). Para las emulsiones elaboradas con salmueras de calcio y magnesio después del día 0 aumenta su viscosidad y al día 13 disminuye, pero para el último día de medición la viscosidad vuelve a aumentar (ver **Figura 35**). En cambio, para las emulsiones elaboradas con salmuera de sodio la viscosidad aumenta con el paso del tiempo; sin embargo, el cambio en la viscosidad no es considerable, ya que las emulsiones elaboradas con los tres tipos de salmueras presentan valores en el mismo intervalo de viscosidad.

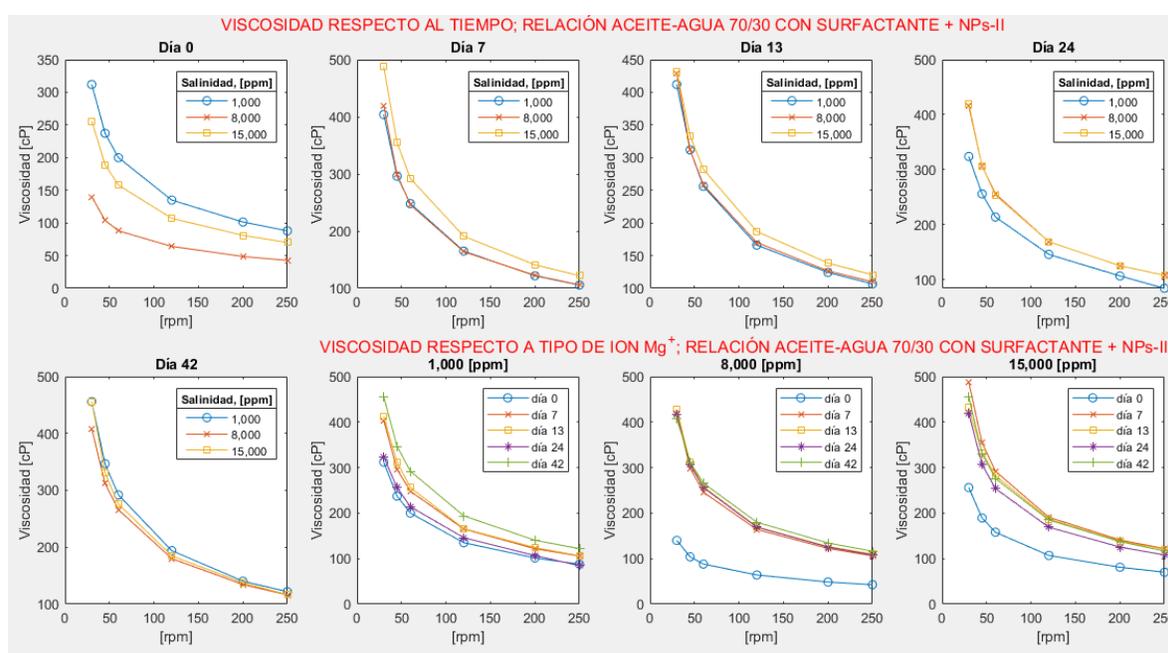


Fig. 35 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera, con salmuera de magnesio.

50% aceite mineral – 50% salmuera

En la **Figura 36** se muestran las gráficas de viscosidad para las emulsiones preparadas con nanopartículas NPs-I con respecto al tiempo (arriba), hasta por 27 días, y la viscosidad con respecto a la salinidad (abajo), desde 1,000 hasta 35,000 [ppm]. La viscosidad de las emulsiones es menor (ca. 300 a 480 [cP]) en el día 0, alcanzando su máximo (ca. 500 a 570 [cP]) en el día 5. Para las emulsiones con salinidad de 8,000 a 35,000 [ppm], la viscosidad incrementa desde el día 5 y no hay variación importante después. La viscosidad de la emulsión preparada con salmuera de 1,000 [ppm], es la menos viscosa de todas las emulsiones de la relación 50% aceite mineral – 50% salmuera en el día 27 y llega a alcanzar un valor de viscosidad al día 0 de 120.5 [cP] @250 [rpm].

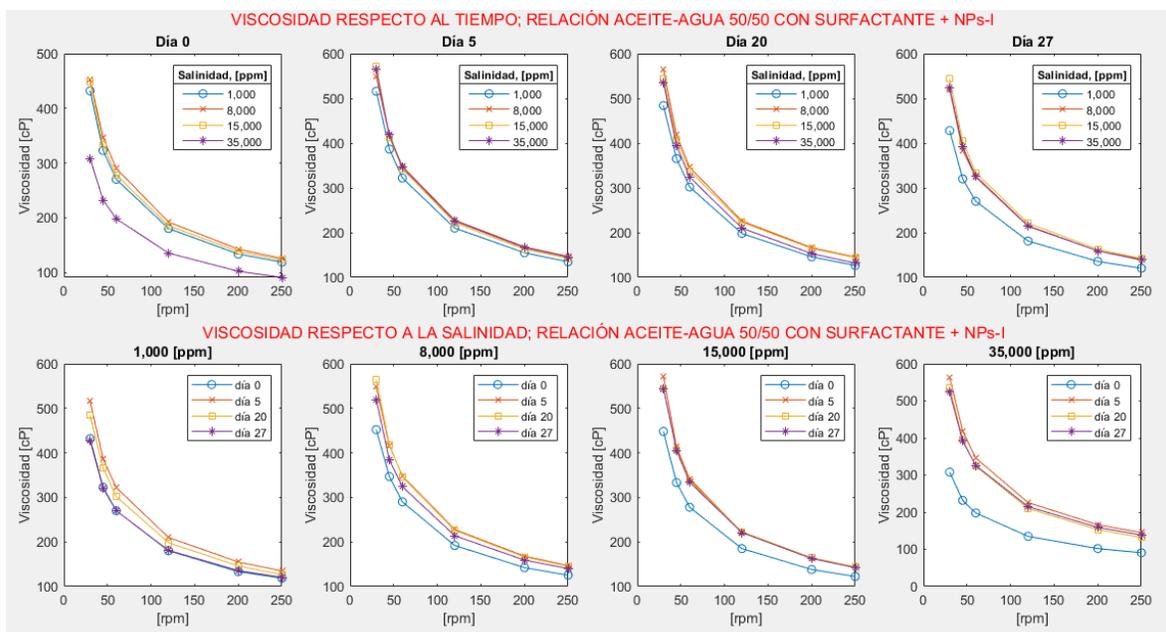


Fig. 36 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.

De forma general, todas las emulsiones de aceite mineral (cualquier volumen agua-aceite) elaboradas con los dos agentes emulsificantes presentan un comportamiento similar en su viscosidad; teniendo su valor mínimo el día de su preparación, después aumenta con el tiempo y en su última medición vuelve a disminuir. Es importante recalcar que las emulsiones con nanopartículas con relación 50%-50% presentan un rango menor de viscosidad comparadas con las de relación 70%-30%.

3. Comparación de nanopartículas NPs-I y NPs-II

Se realizó una comparación con emulsiones elaboradas con agua sintética de mar (35,000 [ppm]) para ver el comportamiento de las nanopartículas NPs-I y II. En esta comparación se varió la relación aceite-agua y se observan los resultados en las **Figuras 37, 38 y 39**.

En la **Figura 37** se presenta la comparación de las dos nanopartículas de óxido de silicio empleadas. Las emulsiones preparadas con surfactante + NPs-I o NPs-II presentan su menor valor de viscosidad al día 0 y su mayor valor en el día 5 para las emulsiones con relación 70% aceite mineral – 30% salmuera. Posteriormente, la viscosidad disminuye. Además, es notable que las emulsiones con NPs-II presentan una menor viscosidad en los días 0 y 5, con valores de 59.9 y 253. 4 [cP] @250 [rpm], respectivamente, pero en los últimos días de seguimiento (12 y 28) se observa una viscosidad mayor respecto a las emulsiones que contienen NPs-I.

Por otro lado, las emulsiones preparadas con relación 50% aceite mineral – 50% salmuera se exhiben en la **Figura 38** y presentan el mismo comportamiento que en la relación 70%-30%; sin embargo, sólo en la primera medición (día 0) las emulsiones con NPs-II presentan una menor viscosidad en comparación con NPs-I. Es importante mencionar que en esta

relación todas las emulsiones presentan una menor (hasta 800 [cP] menos) viscosidad comparada con la relación 70%-30% sin importar el tiempo en el que se comparen.

En la **Figura 39** se observa una gráfica que muestra el comportamiento de la emulsión 30% aceite – 70% salmuera con NPs-II, la cual se analizó por 28 días. La emulsión tiene su menor viscosidad al día 0 (72.96 [cP] @250 [rpm]) y aumenta en el día 12 (112.3 [cP] @250 [rpm]); después la viscosidad disminuye al día 28. Esta emulsión presenta la menor viscosidad comparada con las emulsiones con relación 70% - 30% y 50%-50%, sin importar el tiempo en el que se comparen.

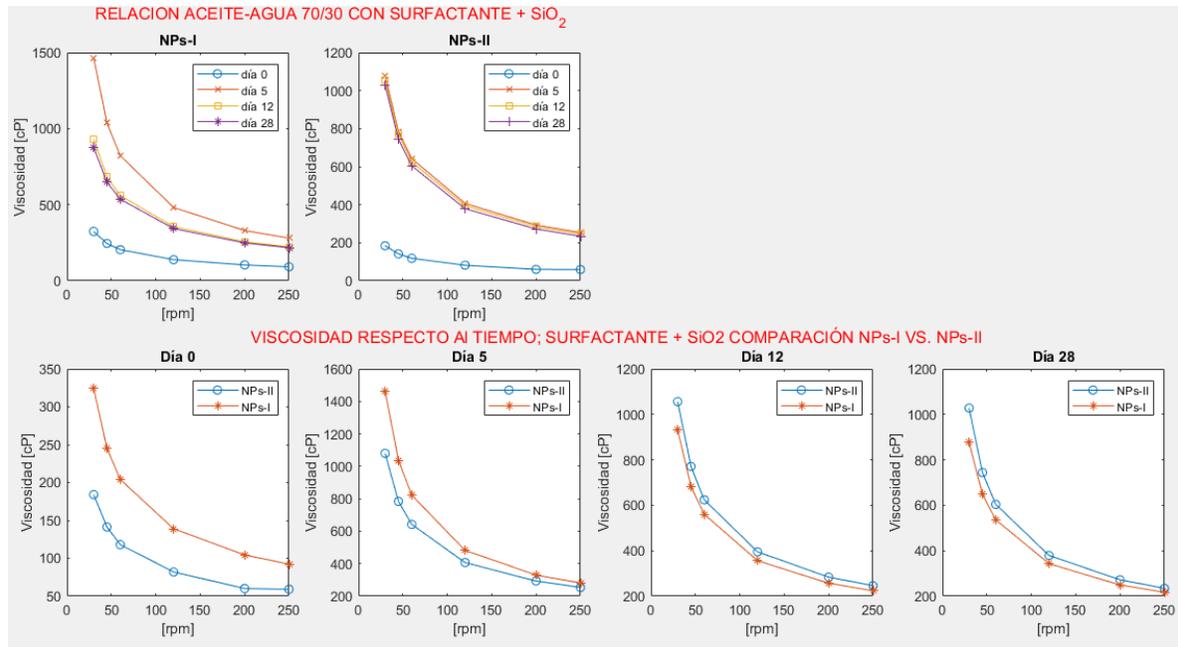


Fig. 37 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I o NPs-II, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.

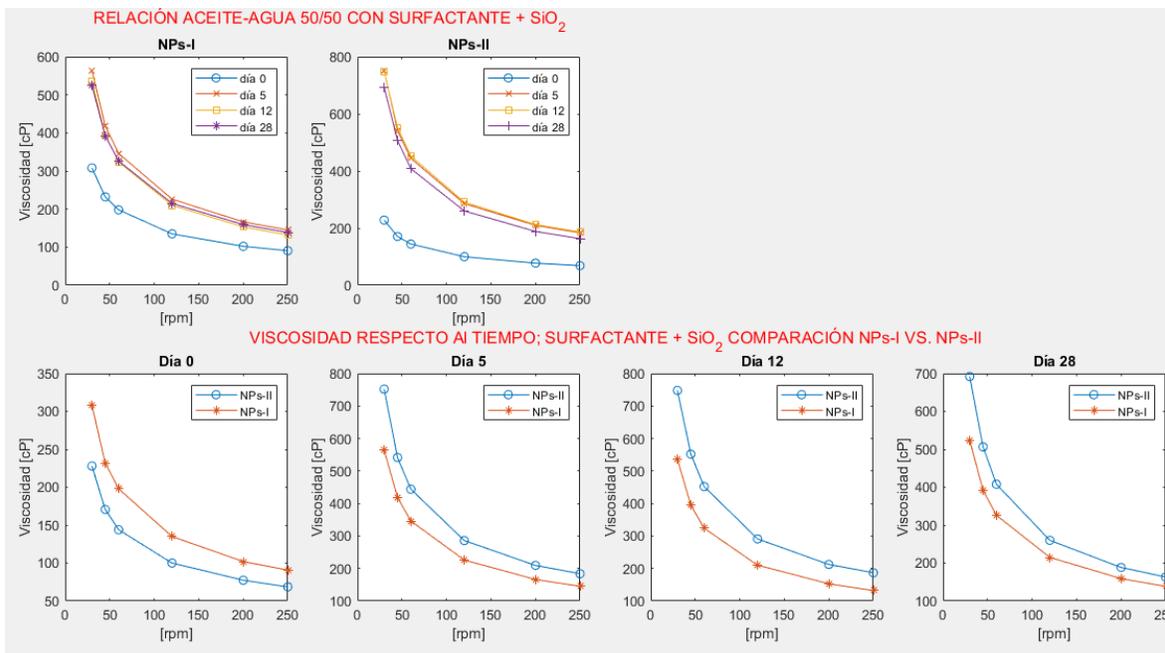


Fig. 38 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I o NPs-II, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.

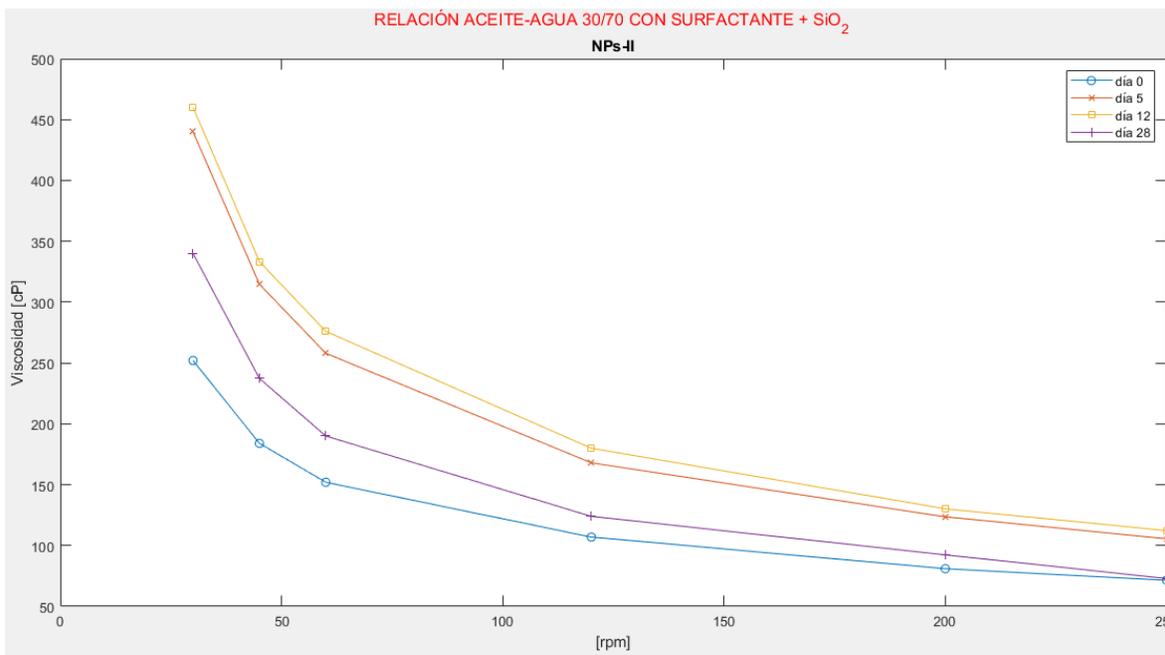


Fig. 39 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-II, relación: 30% aceite mineral – 70% salmuera.

4. Comparación de emulsiones preparadas con surfactante y surfactante+NPs-I

Con la aplicación desarrollada se realizaron gráficos de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] para comparar el comportamiento de las diferentes combinaciones de agentes emulsificantes; (1) surfactante y, (2) surfactante + nanopartículas de óxido de silicio (NPs-

l). Este análisis se realizó para las emulsiones elaboradas con salmuera de $MgCl_2$ a 1,000, 8,000 y 15, 000 [ppm] y agua sintética de mar de 35,000 [ppm] desde el día 0 y hasta el día 22. Por practicidad sólo se muestra el comportamiento de viscosidad de las emulsiones que se obtuvieron al día 7 en la **Figura 40** para la relación 70% aceite mineral – 30% salmuera. Con el paso del tiempo se observó que en el día 0 todas las emulsiones presentan viscosidad menor (ca. 300 a 324 [cP]) y al día 7 alcanzan su valor máximo (ca. 400 a 1,500 [cP]) y disminuye en los últimos días de medición (ca. 320 a 950 [cP]). Aunque para el día 0 la viscosidad de las emulsiones sin importar el agente emulsificante presenta casi el mismo valor, con el paso del tiempo las emulsiones preparadas únicamente con surfactante exhiben menor viscosidad que aquellas preparadas con surfactante + nanopartículas.

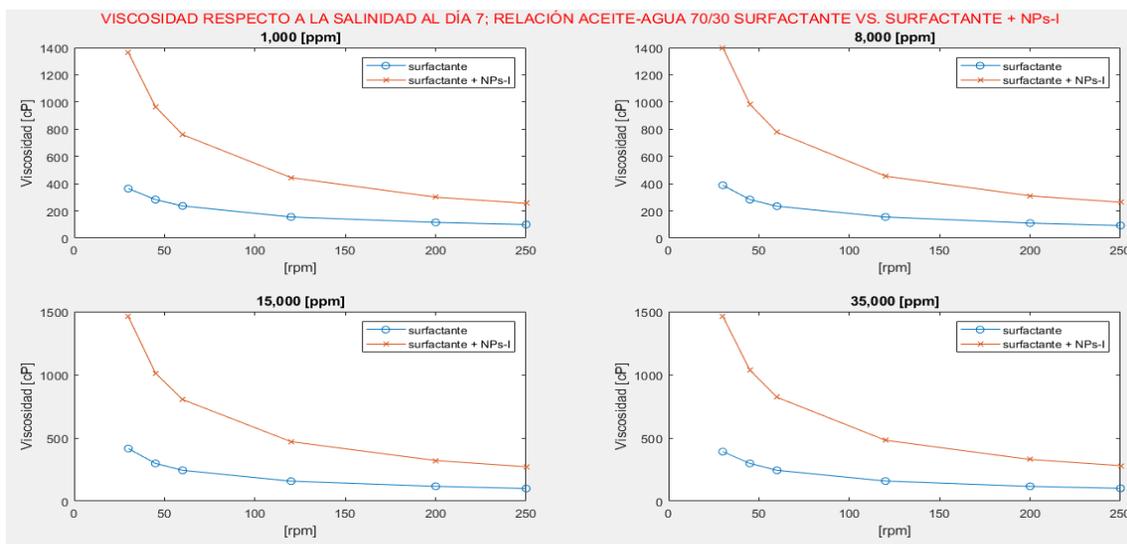


Fig. 40 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.

En la **Figura 41** se puede observar la viscosidad (sólo del día 28) para las emulsiones 50% aceite mineral – 50% salmuera preparadas con las combinaciones de agentes emulsificantes; (1) surfactante y, (2) surfactante + nanopartículas de óxido de silicio (NPs-I). Este análisis se realizó para las emulsiones elaboradas con salmuera de $MgCl_2$ a 1,000, 8,000 y 15, 000 [ppm] y agua sintética de mar de 35,000 [ppm] desde el día 0 y hasta el día 28. Todas las emulsiones presentan viscosidad mínima en el día de su elaboración, día 0 (ca. 150 a 450 [cP]); además, para este día la viscosidad es menor para las emulsiones preparadas únicamente con surfactante en comparación con las preparadas con surfactante + nanopartículas. En el día 5 la viscosidad de las emulsiones de los dos casos es similar (ca. 500 a 600 [cP]). Para el día 20 las emulsiones elaboradas con salmueras de 1,000, 15,000 y 35,000 [ppm] y surfactante tienen una mayor viscosidad que las emulsiones con los agentes emulsificantes, y para la emulsión de 8,000 [ppm] hay una inversión en el comportamiento de la viscosidad. En el día 28 de medición, las emulsiones de 15,000 y 35000 [ppm] ambas combinaciones de agentes emulsificantes presentan el mismo comportamiento, en cambio las emulsiones con salinidades de 1,000 y 8,000 [ppm] presentan una menor viscosidad las que contienen ambos agentes emulsificantes. Por

último, sin importar el tiempo la relación 50%-50% presenta menor viscosidad en comparación con la relación de 70%-30%.

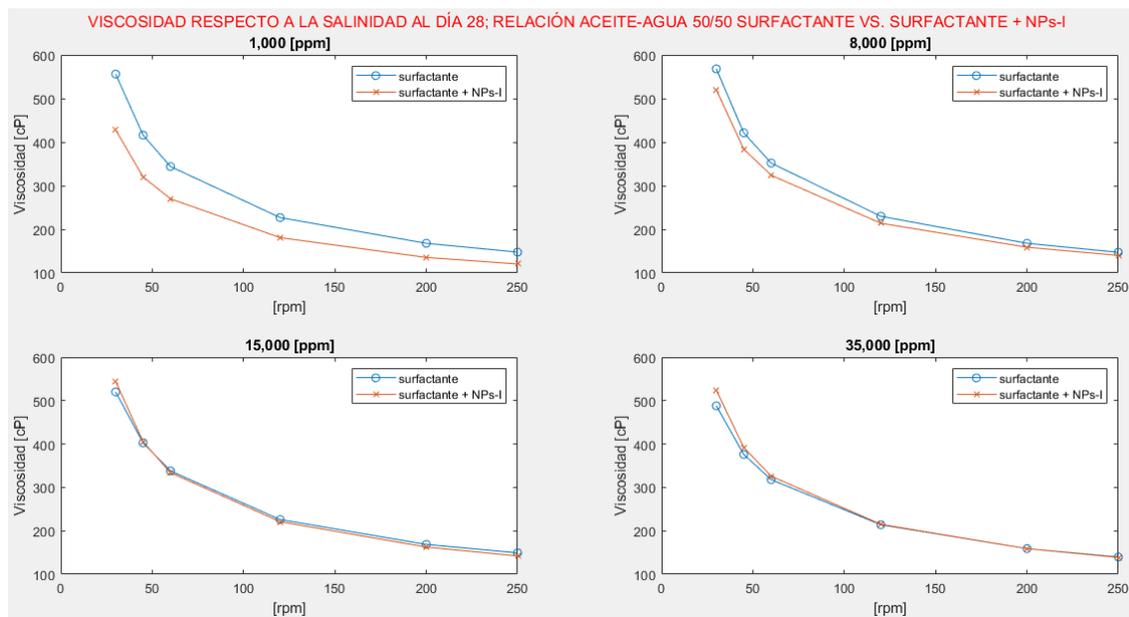


Fig. 41 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.

5.1.2. Tamaño de gota

A continuación, se presenta el análisis del tamaño de gota con respecto a la salinidad para las emulsiones elaboradas con salmueras de $MgCl_2$ a 1,000, 8,000 y 15,000 [ppm] empleando relaciones de 70% aceite mineral – 30% salmuera y 50% aceite mineral – 50% salmuera. En estas gráficas se puede comparar el comportamiento del surfactante sólo y surfactante + NPs-I. Es importante mencionar que el tamaño de gota se asocia con la estabilidad de las emulsiones, y se atribuyen tamaños de gota pequeños a emulsiones más estables, mientras que las emulsiones menos estables tendrán tamaño de gota más grande. A través de la determinación del tamaño de gota es posible conocer el tipo de emulsión, es decir, macroemulsión, nanoemulsión y microemulsión [4], [19].

Para las emulsiones que contienen sólo surfactante y una relación 70% aceite mineral – 30% salmuera ($MgCl_2$) a 8,000 y 15,000 [ppm]; el tamaño de gota disminuye del día 0 (43.26 μm) y 31.11 μm], respectivamente) al día 8 (24.89 μm) y 30.7 μm], respectivamente) y aumenta al día 22 (55.66 μm) y 57.87 μm], respectivamente). Sin embargo, la emulsión con la salmuera de 1,000 [ppm] aumenta el tamaño de gota del día 0 (40.13 μm) al día 8 (51.81 μm) pero disminuye para el día 22 (42.86 μm). Por último, para las emulsiones preparadas con salmuera de 1,000 y 8,000 [ppm] con surfactante y nanopartículas, aumentan el valor del tamaño de gota con respecto al tiempo (ver **Figura 42**).

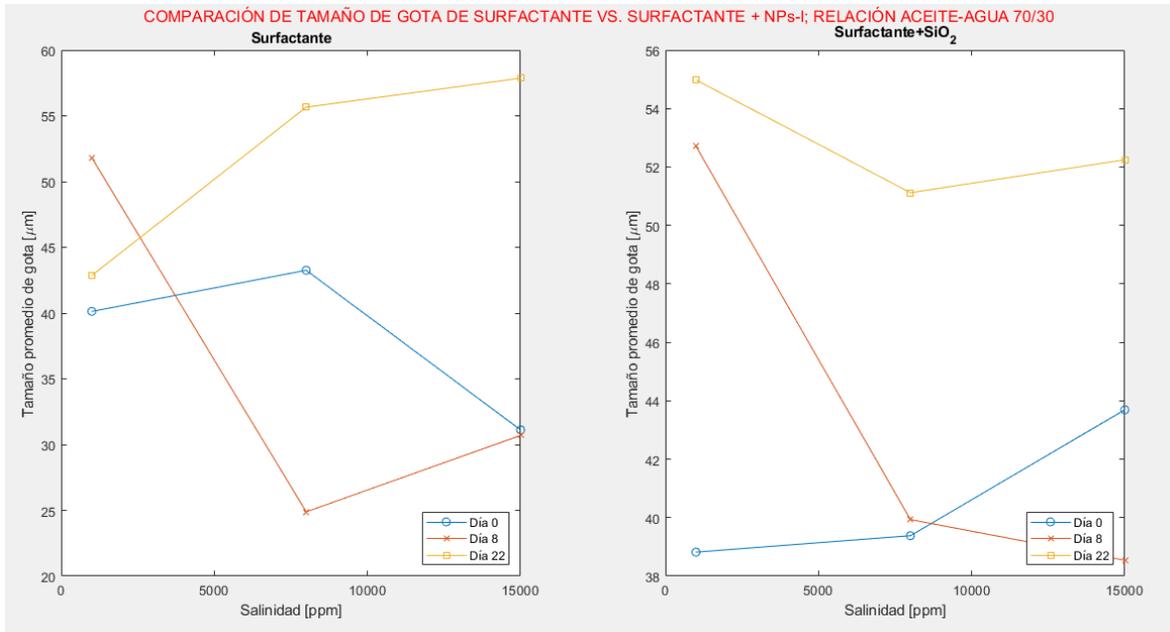


Fig. 42 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad, MgCl₂ [ppm], relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.

En la **Figura 43** se aprecia la variación de tamaño de gota para las emulsiones de la relación 50% aceite mineral – 50% salmuera (MgCl₂). Las emulsiones que contienen sólo surfactante el tamaño de gota disminuyen del día 0 (57.72 [μm] para la emulsión de 1,000 [ppm] y 60.07 [μm] para la emulsión de 8,000 [ppm]) al día 28 (49.9 [μm] para la emulsión de 1,000 [ppm] y 42.96 [μm] para la emulsión de 8,000 [ppm]), excepto para la emulsión preparada con salmuera de 15,000 [ppm] que en el día 0 presenta su menor tamaño de gota (41.62 [μm]), pero aumenta muy poco al día 28 (42.68 [μm]). En el caso de las emulsiones preparadas con surfactante + nanopartículas el tamaño de gota disminuye conforme incrementa la salinidad y conforme transcurre el tiempo (de 0 a 28 días).

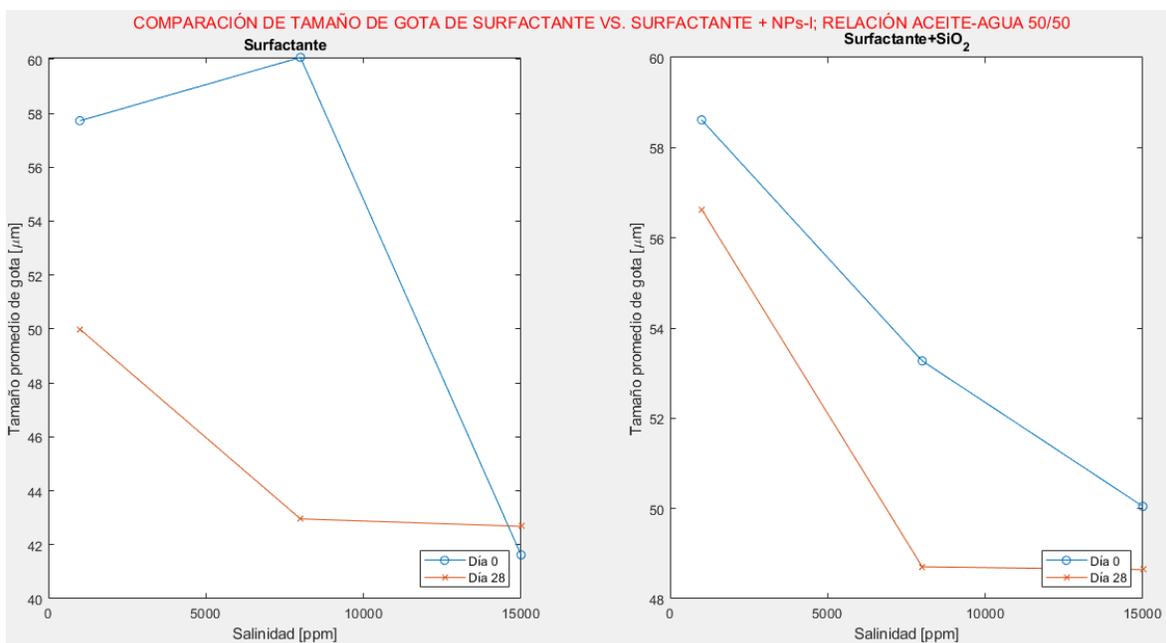


Fig. 43 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad, MgCl_2 [ppm], relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.

El tamaño de gota se obtuvo midiendo el diámetro de la gota, este dato se dividió entre 2 para conocer el radio (ver **Tabla 6**) y usando los valores de referencia reportados por C. Lárez et al. y J. Montaña clasificaron las emulsiones analizadas. Todas las emulsiones tienen un tamaño de gota de 19 a 30 [μm] y de acuerdo con la clasificación presentada en la **Tabla 4** todas emulsiones se clasificaron como macroemulsiones.

Tabla 6 – Media del tamaño de gota de emulsiones elaboradas con aceite mineral.

Relación aceite-agua	Tipo	Salinidad, MgCl_2 [ppm]	Tiempo [día]	Media tamaño de gota (radio) [μm]
70/30	Surfactante	1,000	0	20.07
			8	25.91
			22	21.43
		8,000	0	21.63
			8	12.43
			22	27.83
	15,000	0	15.56	
		8	15.20	
		22	28.94	
	Surfactante + NPs-I	1,000	0	19.41
			8	26.36
			22	27.49
8,000		0	19.69	
		8	19.97	
		22	25.56	
15,000		0	21.85	
		8	19.27	
		22	26.13	
50/50	Surfactante	1,000	0	28.86

		8,000	28	25.00	
			0	30.04	
		15,000	28	21.48	
			0	20.81	
		Surfactante + NPs-I	1,000	28	21.34
				0	29.31
	8,000		28	28.32	
			0	26.64	
	15,000		28	24.36	
			0	25.03	
			28	24.32	

5.1.3. Rendimiento

En la **Tabla 7** se presenta el porcentaje de agua emulsionada para el día 0 y 7 de las emulsiones de aceite mineral elaboradas con salinidad ($MgCl_2$) de 1,000, 8,000, 15,000 [ppm] y agua sintética de mar 35,000 [ppm] para las relaciones aceite mineral-salmuera de: 70%-30%, 50%-50% y 30%-70%.

Los resultados sólo se muestran hasta el día 7 debido a que el rendimiento de las emulsiones no cambió después de este día. Las emulsiones se observaron hasta por 30 días. El volumen de agua emulsionada disminuye del día 0 al día 7 para las emulsiones de aceite mineral. Hay pocas emulsiones donde el volumen de agua emulsionada no disminuye sólo se mantiene constante.

Tabla 7 – Concentración de agua emulsionada [%] con respecto al tiempo para las emulsiones de aceite mineral. *surfactante y **surfactante + NPs-I.

Salinidad [ppm]	Tipo	Día 0			Día 7		
		Relación agua/aceite					
		30/70	50/50	70/30	30/70	50/50	70/30
1,000	1*	9	5	6	7	3	2
	2**	9	1	8	5	1	4
8,000	1*	9	5	6	5	1	2
	2**	9	1	4	5	1	4
15,000	1*	-	7	6	-	1	4
	2**	13	1	8	7	1	4
35,000	1*	-	9	8	-	5	2
	2**	11	1	4	5	1	4

5.1.4. Análisis general

Todas las emulsiones con aceite mineral presentan viscosidad mínima cuando se prepararon (día 0) y ésta aumenta con el tiempo. Hacia el final del seguimiento la viscosidad llega a disminuir nuevamente, pero no alcanza la viscosidad original. Al último día se mantiene el valor máximo o disminuye sin alcanzar el valor de viscosidad inicial (día 0); excepto para la emulsión de relación 70%-30% elaborada con salmuera de 35,000 [ppm] y surfactante, la cual exhibe un valor de viscosidad al día 0 de 87.36 [cP] @250 [rpm] pero al día 22 de 74.4 [cP] @ 250 [rpm].

El volumen de aceite-salmuera influye en el valor de viscosidad que presenta la emulsión ya que todas las emulsiones que contienen sólo surfactante exhiben una viscosidad menor para la relación 70%-30% en comparación con las emulsiones 50%-50%; en cambio, para el caso de las emulsiones elaboradas con surfactante + nanopartícula las emulsiones de relación 50%-50% son las que presentan un menor rango en su viscosidad.

Al comparar los tipos de agentes emulsificantes para la relación 70%-30% se identificó que el uso de las nanopartículas da lugar a emulsiones más viscosas desde el día 0, pero la viscosidad se mantiene relativamente constante. Aunque para la relación 50%-50% no se aprecia una tendencia clara, todas las emulsiones presentan una menor viscosidad comparada con la relación 70%-30%.

Las emulsiones preparadas con NPs-I de relación; 70%-30% y 50%-50% son menos viscosas que las emulsiones preparadas con NPs-II para una salinidad de 35,000 [ppm]. A pesar de que la relación 30%-70% sólo cuenta con los datos de emulsiones preparadas con NPs-II éstas presentan menor viscosidad que las emulsiones con relación de 70%-30% y 50%-50%.

También se identificó que el tipo de salmuera influye en la viscosidad de las emulsiones, esto es, la salmuera de cloruro de magnesio dio como resultado viscosidades más bajas en comparación con las salmueras de sodio y calcio al utilizar únicamente surfactante como agente emulsificante. Sin embargo, al utilizar surfactante + nanopartícula no se presentó un cambio notable en la viscosidad de las emulsiones al trabajar con salmueras de distintos iones.

Es importante mencionar que todas las emulsiones presentan una viscosidad mayor comparada con la viscosidad del aceite mineral de partida (55 @ 120 [rpm]) sin importar el tiempo. Además, no se aprecia un cambio significativo en el valor de viscosidad al aumentar la salinidad en la salmuera para la elaboración de las emulsiones.

En el análisis del tamaño de gota arrojó que todas las emulsiones elaboradas con aceite mineral son macroemulsiones; además, podemos relacionar el tamaño de gota con la viscosidad porque al día que disminuye su valor la viscosidad aumenta y viceversa. Las emulsiones son relativamente estables ya que no se rompen después de 28 días y su rendimiento se mantuvo constante (agua libre medida) no cambia luego del 7.

5.2. Aceite extrapesado Jurásico

Se presenta el análisis de los resultados de las gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] y tamaño de gota para las emulsiones formadas con crudo extrapesado de la formación Jurásico (33,541 @ 10 [rpm]) y salmueras provenientes de la Región Norte (1,411 a 44.251 [ppm]). Las condiciones experimentales empleadas se observan en la **Tabla 5**.

5.2.1. Viscosidad

Se exhiben los resultados de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] para las emulsiones de aceite extrapesado Jurásico a salinidad variable y con respecto al tiempo. Los resultados en la aplicación *AIM Emulsions* se presentan en dos formas distintas;

gráficos de viscosidad respecto al tiempo y viscosidad respecto a la salinidad, para que el usuario tenga a su disposición formas distintas de comparación. La discusión se divide en tres secciones; 1. surfactante y 2. surfactante + nanopartículas como agentes emulsificantes y 3. comparación entre los agentes emulsificantes.

1. Surfactante

A continuación, se discuten los resultados de emulsiones que contienen como agente emulsificante surfactante nonilfenoletoxilado con relación aceite-salmuera de 70%-30%, 50%-50% y 30%-70%.

70% aceite – 30% salmuera

En la **Figura 44** se muestran las gráficas de viscosidad con respecto a la salinidad desde 1,411 a 44,251 [ppm]. La viscosidad de las emulsiones es muy semejante al día 0 y 7 (ca. 1,200 a 1,400 [cP]) para el día 14 está aumentada (ca. 1,600 a 2,200 [cP]). El día 21 de seguimiento la viscosidad disminuye (ca. 800 a 1,100 [cP]) por debajo de la medida al día 0. Este comportamiento no define a la emulsión elaborada con salmuera de 22,831 [ppm] porque la viscosidad disminuye con el paso del tiempo, al día 0 tiene una viscosidad de 352.8 [cP] @ 250 [rpm] y en el día 21, de 247.2 [cP] @ 250 [rpm].

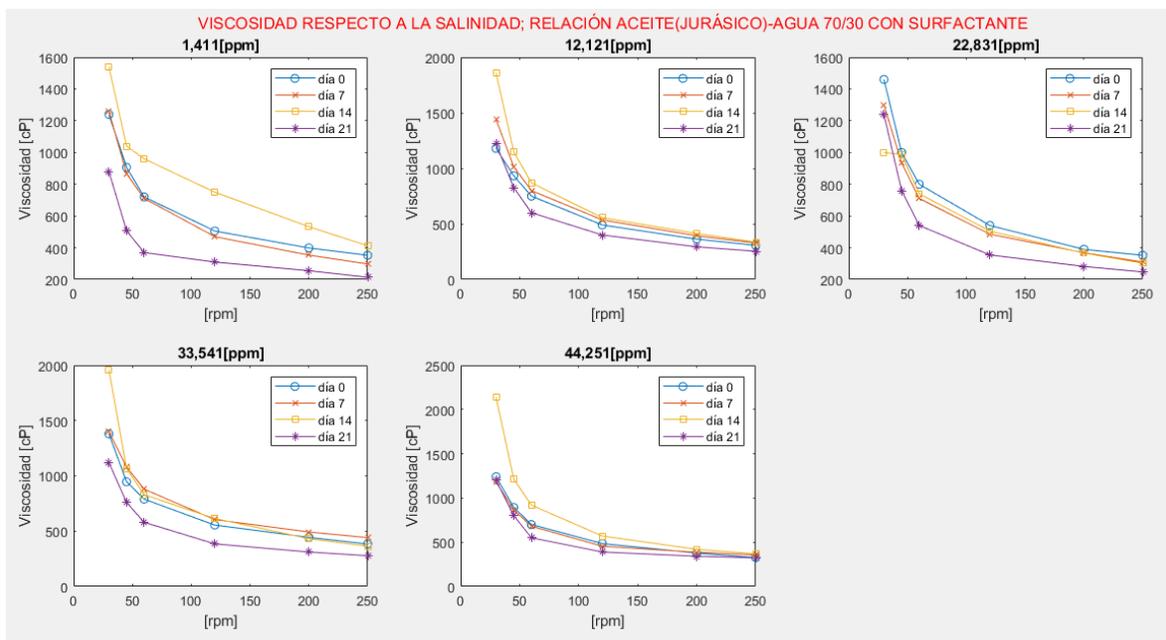


Fig. 44 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite – 30% salmuera.

50% aceite – 50% salmuera

Se observan las gráficas de viscosidad con respecto a la salinidad desde 1,411 a 44,251 [ppm] en la **Figura 45**. Aunque al día 0 el comportamiento de viscosidad no presenta una tendencia, @250 [rpm] las emulsiones presentan el menor valor de viscosidad (ca. 220 a 270 [cP]). La viscosidad aumenta teniendo su máximo (ca. 2,300 a 2,450 [cP]) al día 7, día

14 para la emulsión con salmuera de 44,251 [ppm], y para el último día de medición (día 21) la viscosidad disminuye (ca. 1,700 a 2,600 [cP]) por debajo de los resultados del día 14 (ca. 2,200 a 2,850 [cP]).

30% aceite – 70% salmuera

En la **Figura 46** se muestran las gráficas de viscosidad con respecto a la salinidad desde 1,411 a 44,251 [ppm]. Todas las emulsiones presentan su menor valor de viscosidad al día 0 (ca. 700 a 2,580 [cP]). Con el paso del tiempo la viscosidad aumenta (ca. 2,400 a 3,740 [cP]) y se aprecia que tiene un comportamiento similar a los días 14 y 21, excepto para la emulsión con salmuera de 1,411 [ppm] donde la viscosidad aumenta al día 7 y después disminuye.

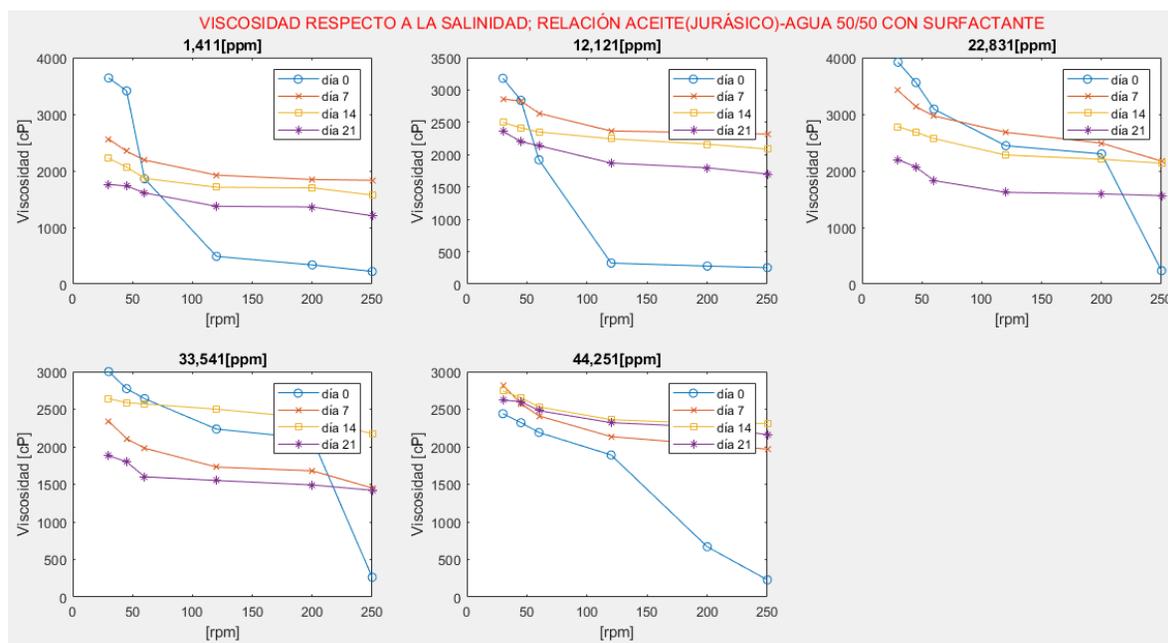


Fig. 45 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 50% aceite – 50% salmuera.

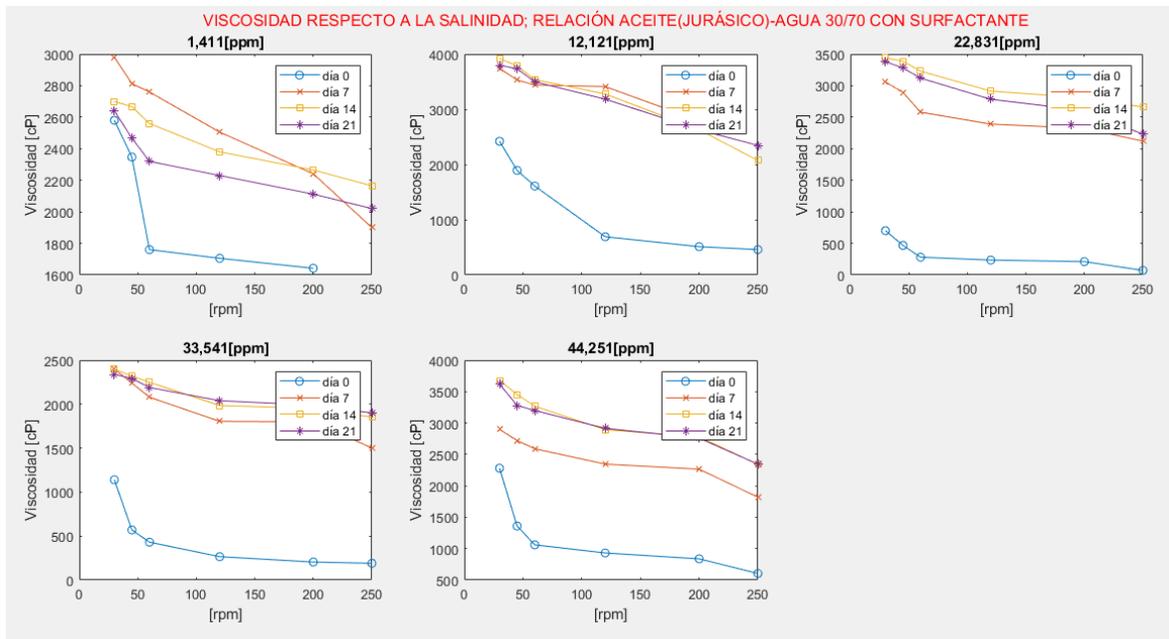


Fig. 46 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 30% aceite – 70% salmuera.

Todas las emulsiones elaboradas con surfactante presentan su menor valor de viscosidad al día 0, y a pesar de que aumenta la viscosidad no se alcanza la viscosidad de aceite Jurásico. También, el rango de viscosidad es menor en las emulsiones de relación 70%-30% comparada con las relaciones 50%-50% y 30%-70%.

2. Surfactante + nanopartícula

A continuación, se presenta la discusión de los resultados de las emulsiones elaboradas con surfactante no iónico + NPs-I. Se seleccionó esta nanopartícula porque se comprobó, con las emulsiones de aceite mineral, que este tipo de nanopartícula en presencia de nonilfenoletoxilado genera emulsiones menos viscosas comparadas con las nanopartículas NPs-II.

70% aceite – 30% salmuera

En la **Figura 47** se muestran las gráficas de viscosidad con respecto a la salinidad desde 1,411 a 44,251 [ppm]. Estas emulsiones (excepto la elaborada con salmuera de 22,831 [ppm]) presentan un comportamiento similar en la viscosidad (ca. 1,100 a 1,450 [cP]) al día 0 y 7; después la viscosidad aumenta (ca. 1,500 a 2,150 [cP]) al día 14 para disminuir al día 21 (ca. 880 a 1,250 [cP]) por debajo de la viscosidad obtenida al día 0. En la emulsión elaborada con salmuera de 22,831 [ppm] después del día de su preparación (352.8 [cP] @250 [rpm]) la viscosidad disminuye (302.4 [cP] @250 [rpm]) y no tuvo un aumento en su valor. Todas las emulsiones presentan la viscosidad más baja en el día 21.

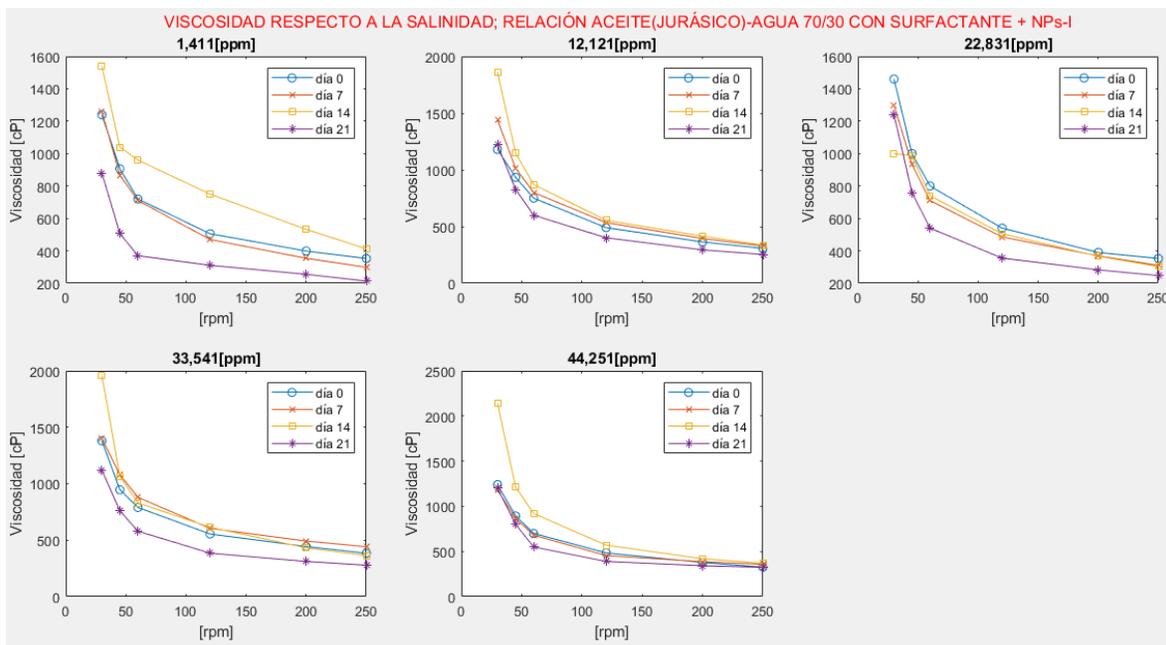


Fig. 47 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera.

50% aceite – 50% salmuera

Las gráficas presentadas en la **Figura 48** muestra la viscosidad para las emulsiones con respecto a la salinidad desde 1,411 a 44,251 [ppm]. Aunque no se aprecia una tendencia clara en la viscosidad de las emulsiones en su día de preparación (día 0), @250 [rpm] todas presentan su menor valor (ca. 220 a 260 [cP]). Para las emulsiones con salinidad de 1,411, 12,121 y 22,831 [ppm], su mayor valor de viscosidad se presenta en el día 7 (ca. 2,500 a 3,500 [cP]) y después disminuye al día 21 (ca. 1,700 a 2,400 [cP]). En cambio, para la emulsión con salinidad de 33,541 [ppm], su viscosidad máxima se presenta en el día 14. Finalmente, para la emulsión con 44,251 [ppm] su viscosidad aumenta con el paso del tiempo y es muy similar en sus últimas dos mediciones (día 14 y 21).

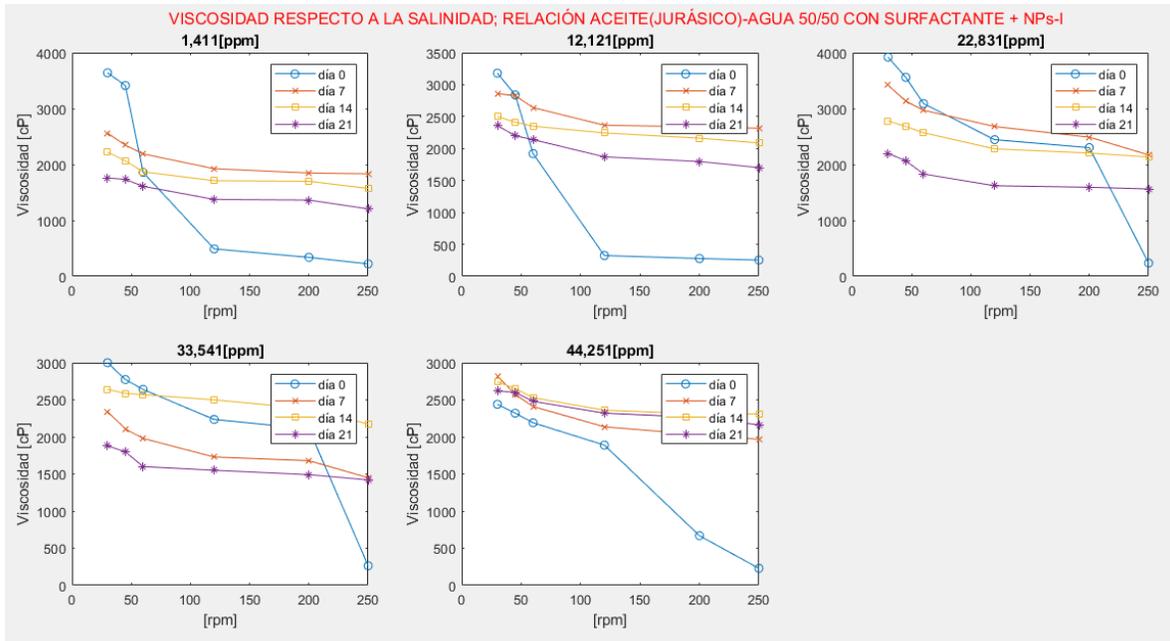


Fig. 48 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite – 50% salmuera.

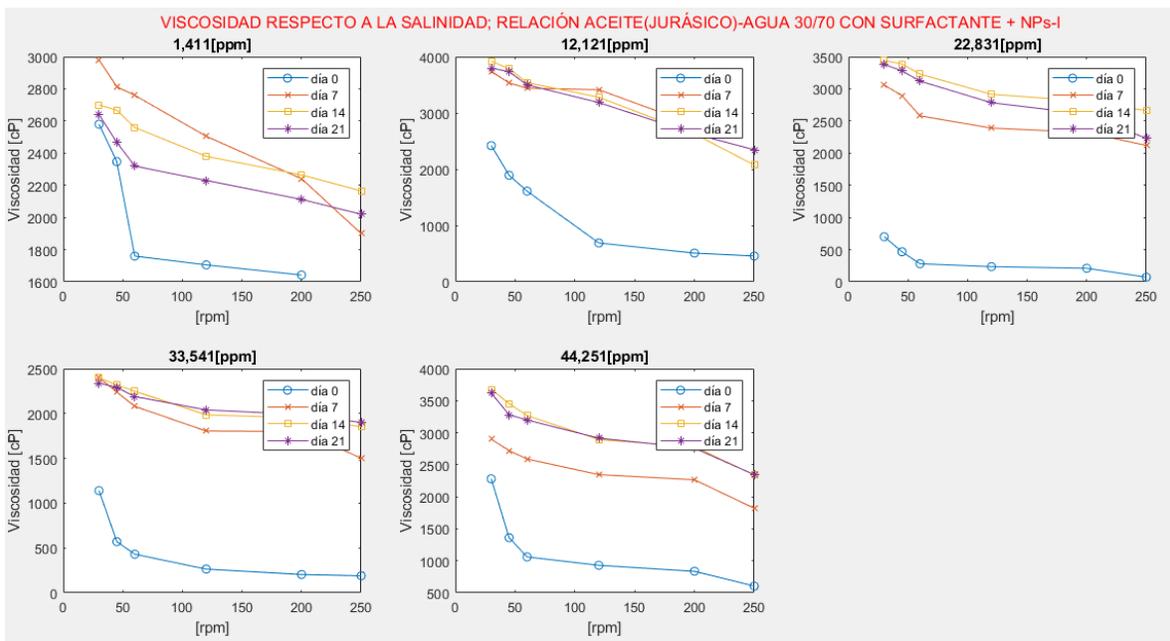


Fig. 49 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 30% aceite – 70% salmuera.

30% aceite – 70% salmuera

En la **Figura 49** se muestran las gráficas de viscosidad con respecto a la salinidad desde 1,411 a 44,251 [ppm]. Al día 0 las emulsiones tienen el valor más bajo de su viscosidad (ca. 700 a 2,600 [cP]). Después, su viscosidad aumenta teniendo su mayor (ca. 2,400 a 3,900

[cP]) valor al día 7 u 14. Finalmente, su viscosidad disminuye al día 21 (sin alcanzar el valor del día 0) con excepción de las emulsiones elaboradas con las salmueras de 33,541 y 44,251 [ppm] ya que la viscosidad de éstas se mantiene constante desde el día 14.

La viscosidad de las emulsiones con surfactante + nanopartículas presentan el comportamiento que las que se realizaron sólo con surfactante, y también en la relación 70%-30% es donde se observa un menor rango de viscosidad.

3. Comparación de surfactante y surfactante + NPs-I

Con la aplicación desarrollada se realizaron gráficos de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] para comparar el comportamiento de las diferentes combinaciones de agentes emulsificantes; (1) surfactante y, (2) surfactante + nanopartículas de óxido de silicio (NPs-I). Este análisis se realizó para las emulsiones elaboradas con las salmueras provenientes de campo de 1,411 a 44,251 [ppm] desde el día 0 y hasta el día 21. Por practicidad se muestra el comportamiento de viscosidad de un sólo día para las relaciones aceite-agua 70%-30%, 50%-50% y 30%-70%; los demás gráficos se pueden observar en la aplicación.

70% aceite – 30% salmuera

En los días 0 y 21 el comportamiento de la viscosidad es muy similar en los dos casos, pero en el día 0 (ca. 1,200 a 1,450 [cP]) se presenta una mayor viscosidad comparada con el día 21 (ca. 880 a 1,200 [cP]). Para los días 7 y 14 las emulsiones elaboradas sólo con surfactante presentan menor viscosidad que las de surfactante + nanopartículas. En la **Figura 50** se presentan los gráficos para el día 0.

50% aceite – 50% salmuera

Al día 0, no se logra apreciar una tendencia clara, pero @250 [rpm] las emulsiones elaboradas con surfactante presentan una menor viscosidad (ca. 220 a 270 [cP]) comparadas con las de surfactante + nanopartículas (ca. 480 a 730 [cP]). En el día 7 las emulsiones con ambos agentes emulsificantes presentan una menor viscosidad que las emulsiones con surfactante, a excepción de la emulsión elaborada con salmuera de 33,541 [ppm], que el comportamiento es de forma inversa. En el día 14, las emulsiones con surfactante presentan una menor viscosidad, a excepción de las emulsiones elaboradas con salmueras de 33,541 y 22,831 [ppm] donde las emulsiones de menor viscosidad son las contienen nanopartículas. Finalmente, las emulsiones más viscosas en el día 21 son las de surfactante + nanopartículas duplicando el valor de viscosidad comparadas con las de surfactante (ver **Figura 51**).

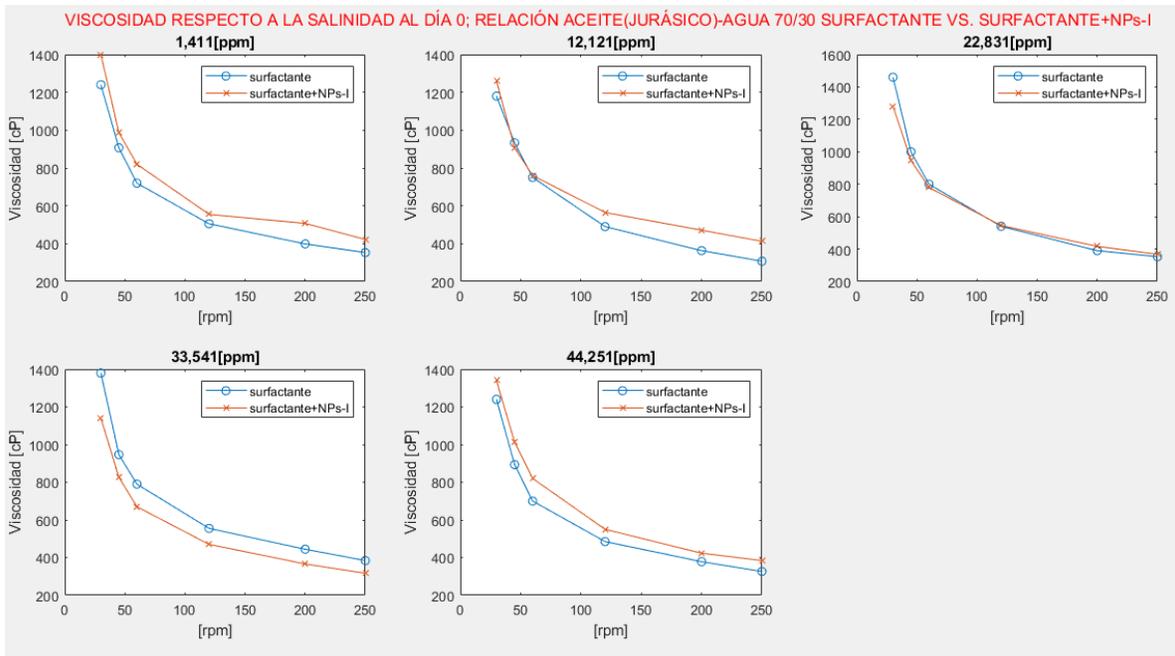


Fig. 50 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera.

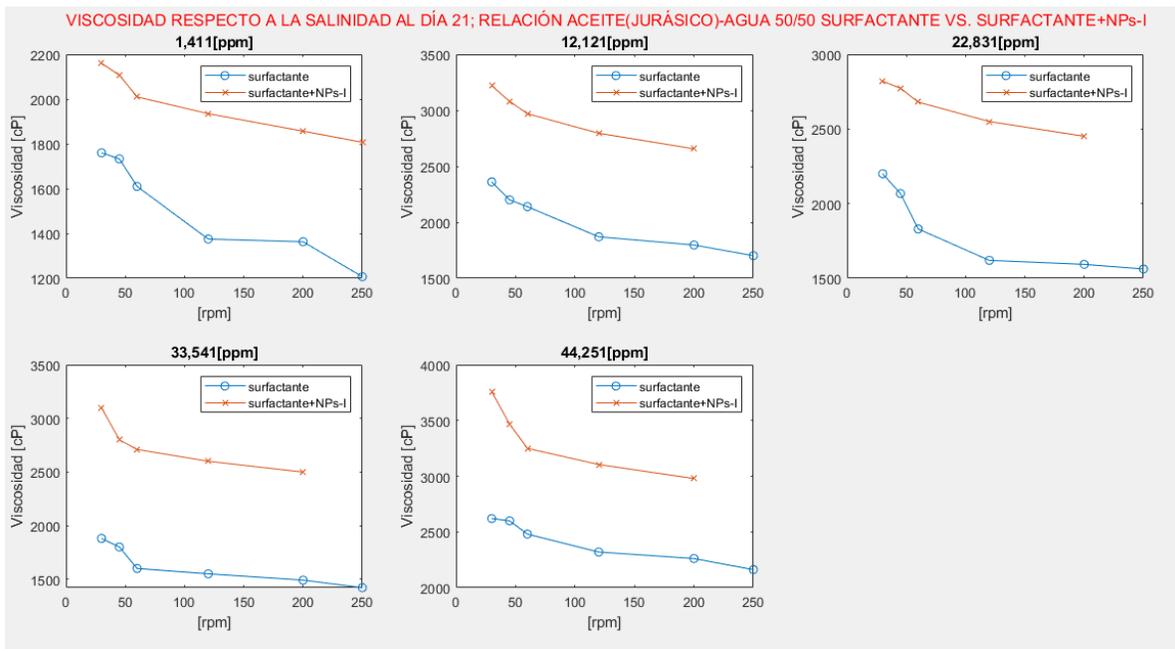


Fig. 51 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite – 50% salmuera.

30% aceite – 70% salmuera

Al día de su preparación (día 0) las emulsiones elaboradas con los dos agentes emulsificantes son más viscosas, duplicando el valor de las emulsiones con sólo surfactante (ver **Figura 52**). Para el día 7 se mantiene el mismo comportamiento presentado en el día

0 para las emulsiones con salinidad de 1,411 y 12,121 [ppm]; las otras emulsiones presentan mayor viscosidad sólo con surfactante. En las últimas dos mediciones (día 14 y 21), las emulsiones con surfactante son más viscosas comparadas con las emulsiones con surfactante + nanopartículas.

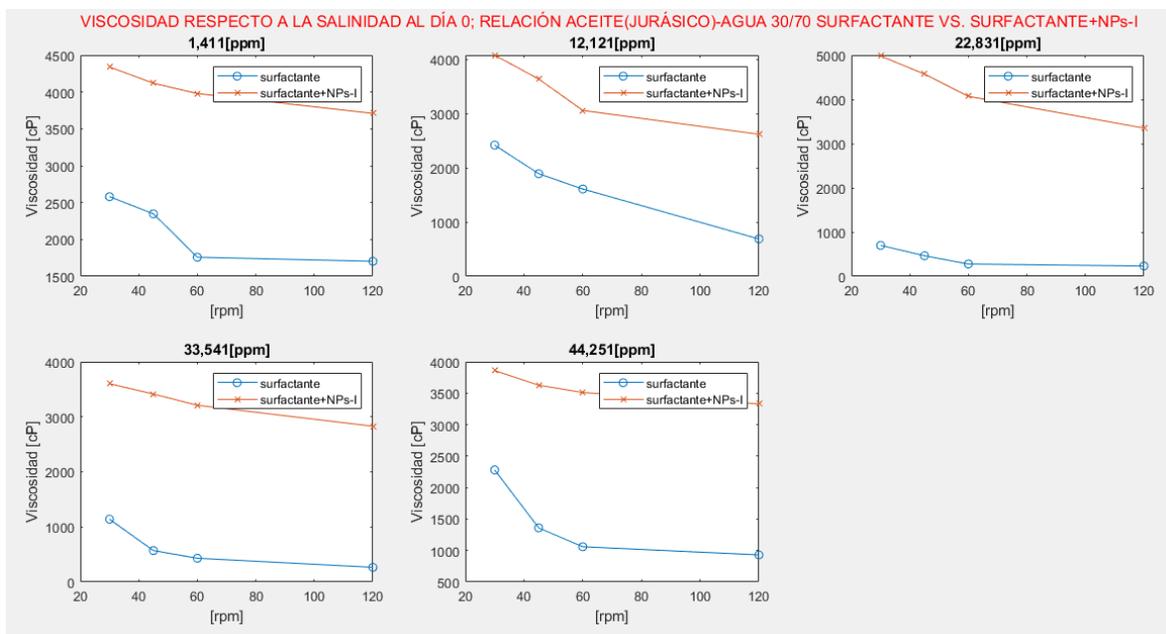


Fig. 52 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 30% aceite – 70% salmuera.

De manera general se aprecia que las emulsiones preparadas con mayor proporción de aceite (sin importar la salinidad de ésta) son las que presentaron menor viscosidad, conforme incrementa la proporción de agua, las emulsiones se vuelven más viscosas. Otra particularidad es que las emulsiones preparadas con la combinación surfactante + nanopartículas dan como resultado una viscosidad mayor en todos los casos, sin importar la relación aceite-salmuera ni la salinidad. En algunos casos se observa que la viscosidad de las emulsiones resultantes llega a duplicarse o triplicarse cuando se usa surfactante + NPs-I en comparación con sólo surfactante.

5.2.2. Tamaño de gota

A continuación, se presenta el análisis para el tamaño de gota con respecto a la salinidad para las emulsiones elaboradas con salmueras de campo a 1,411, 12,121, 22,831, 33,451 y 44,251 [ppm] para las relaciones de 70% aceite – 30% salmuera, 50% aceite – 50% salmuera y de 30% aceite – 30% salmuera. En estas gráficas se puede comparar el comportamiento del surfactante y surfactante + NPs-I. Es importante mencionar que solamente se cuenta con información obtenida al día 0.

En la **Figura 53** se observa el comportamiento de tamaño de gota para las emulsiones con una relación 70% aceite – 30% salmuera a 1,411 a 44,251 [ppm]. Las emulsiones elaboradas con surfactante + nanopartículas y salmuera de 22,831, 33,451 y 44,251 [ppm]

presentan un mayor tamaño de gota duplicando el valor de las emulsiones con surfactante. A pesar de que ocurre el mismo comportamiento con las emulsiones de 1,411 y 12,121 [ppm], cuando se cuenta con surfactante se tienen los valores de 6.07 y 8.00 [μm] respectivamente y con surfactante + nanopartículas se tiene un aumento muy pequeño; 6.42 y 8.02 [μm] respectivamente.

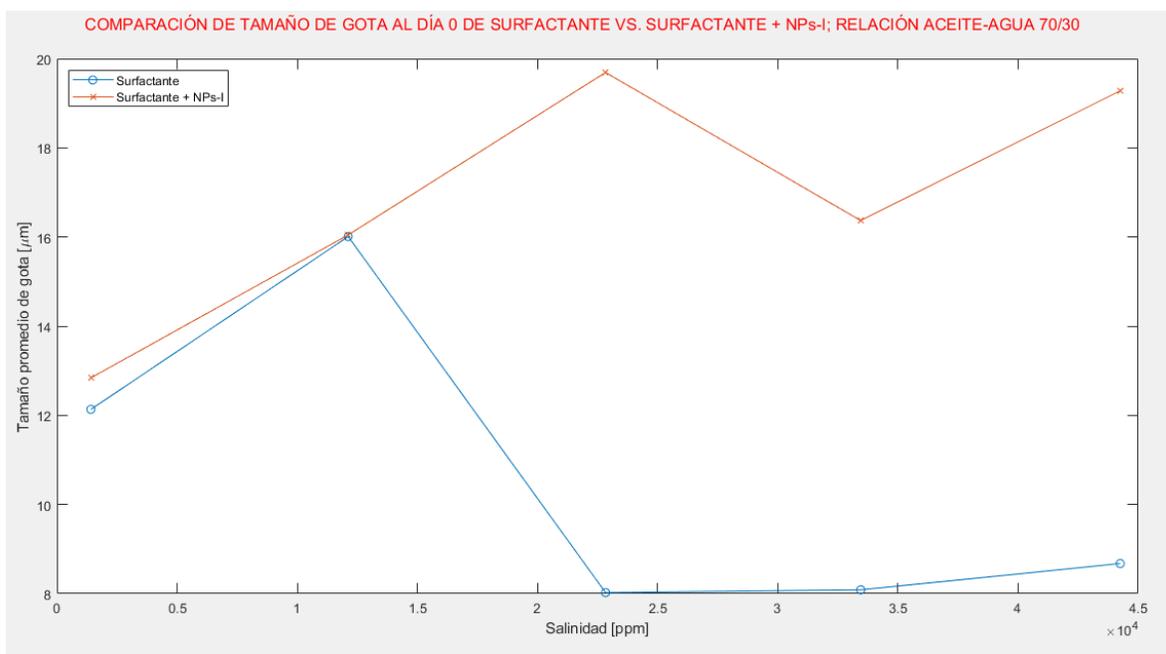


Fig. 53 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad [ppm], relación: 70% aceite – 30% salmuera.

Las emulsiones que contienen surfactante y salmuera de 12,121, 33,451 y 44,251 [ppm] presentadas en la **Figura 54** para la relación 50% aceite – 50% salmuera, exhiben un valor de tamaño de gota mayor comparado con las de surfactante + nanopartículas. En cambio, las emulsiones con salinidad de 1,411 y 22,831 [ppm] muestran mayor tamaño de gota con surfactante + nanopartículas.

En la **Figura 55** se observa el comportamiento de tamaño de gota para las emulsiones con relación 30% aceite – 70% salmuera a 1,411 a 44,251 [ppm]. Las emulsiones con salinidad de 22,831 [ppm] de ambos casos presentan un tamaño de gota similar (ca. 18.27 a 18.29 [μm]). La emulsión con surfactante + nanopartícula con salinidad de 44,251 [ppm] exhibe un mayor tamaño de gota comparada con la emulsión con surfactante. Sin embargo, para las emulsiones con salinidad de 1,411, 12,121 y 33,451 y 22,831 [ppm] presentan un tamaño de gota mayor cuando contienen sólo surfactante.

Además, del análisis de las gráficas es posible conocer el tipo de emulsión por medio del tamaño de gota. El tamaño de gota se obtuvo midiendo el diámetro de la gota por lo que se dividió el valor para conocer el radio (ver **Tabla 8**). Todas las emulsiones se encuentran en un rango de 4 a 24 [μm] y por medio de la clasificación presentada en la **Tabla 4**, las emulsiones se pueden clasificar como macroemulsiones. Cabe destacar que a pesar de

tener un tamaño de gota promedio menor a las emulsiones con aceite mineral de la sección anterior (19 a 30 μm), las emulsiones con aceite extrapesado resultaron menos estables.

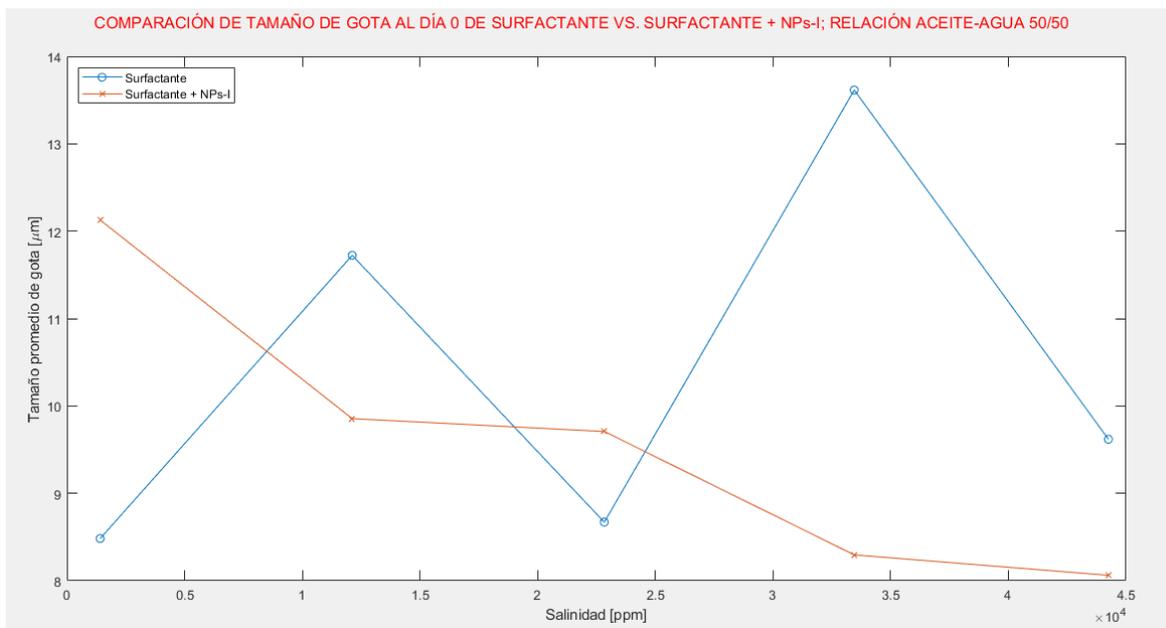


Fig. 54 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad [ppm], relación: 50% aceite – 50% salmuera.

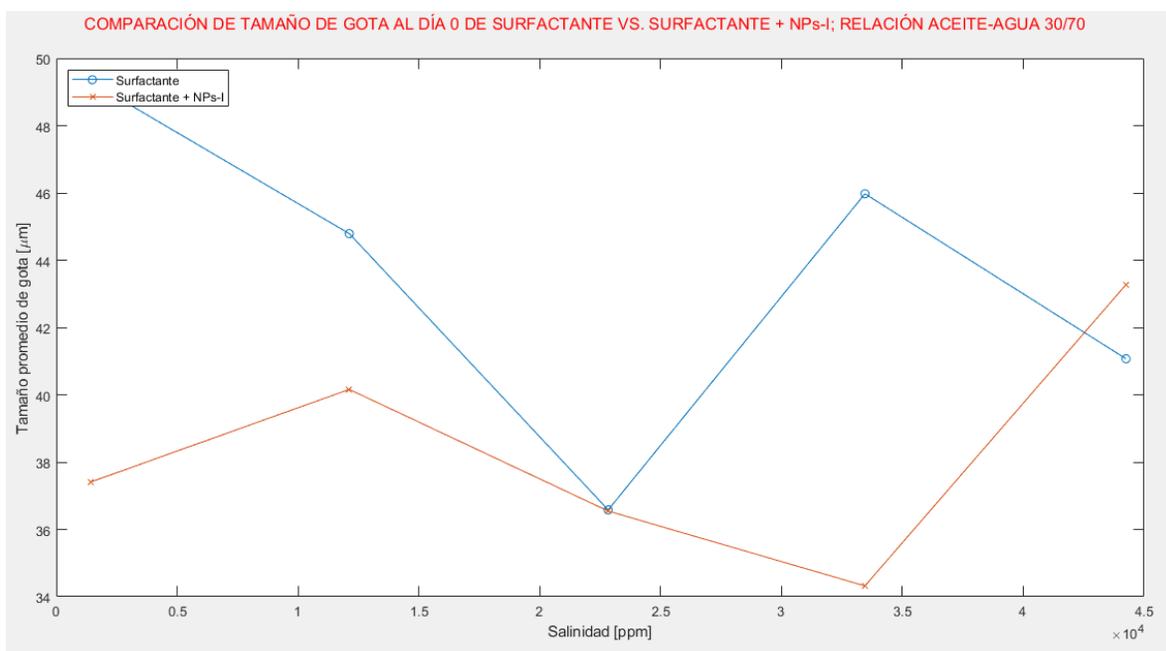


Fig. 55 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad [ppm], relación: 30% aceite – 70% salmuera.

A pesar de que no se identifica una tendencia clara del tamaño de gota con respecto a la salinidad al considerar las relaciones aceite-salmuera se percibe que las emulsiones con

menor tamaño de gota son las de 70%-30% y 50%-50%, el tamaño de gota para estas emulsiones oscila entre 4.01 a 9.85 [µm]; mientras que las emulsiones con relación 30%-70% exhiben valores de 18.27 a 24.65 [µm]. Si bien no hay una tendencia aparente se percibe que cuando se utilizan nanopartículas como agente emulsificante el tamaño de gota tiene una tendencia un poco más definida, esto es, para las emulsiones con relación 70%-30% el tamaño de gota aumenta con la salinidad; pero para las emulsiones con relación 50%-50% y 30%-70%, el tamaño de gota disminuye con la salinidad.

Tabla 8 – Media del tamaño de gota de emulsiones elaboradas con aceite Jurásico al día 0.

relación aceite-agua	Tipo	Salinidad, [ppm]	Media tamaño de gota (radio) [µm]
70/30	Surfactante	1,411	6.07
		12,121	8.00
		22,831	4.01
		33,451	4.04
		44,251	4.34
	Surfactante + NPs-I	1,411	6.42
		12,121	8.02
		22,831	9.85
		33,451	8.18
		44,251	9.63
50/50	Surfactante	1,411	4.24
		12,121	5.86
		22,831	4.34
		33,451	6.81
		44,251	4.81
	Surfactante + NPs-I	1,411	6.06
		12,121	4.93
		22,831	4.85
		33,451	4.15
		44,251	4.03
30/70	Surfactante	1,411	24.65
		12,121	22.40
		22,831	18.29
		33,451	22.99
		44,251	20.54
	Surfactante + NPs-I	1,411	18.70
		12,121	20.08
		22,831	18.27
		33,451	17.16
		44,251	21.64

6.2.3. Análisis general

La mayoría de las emulsiones presentan el siguiente comportamiento: al día de su elaboración (día 0) exhiben su menor valor de viscosidad, aumenta con el tiempo y disminuye al último día de su medición sin alcanzar el valor mínimo que es en el día 0. Las emulsiones que no presentan este comportamiento son las de la relación 70% aceite – 30% salmuera para ambos casos porque la última medición de viscosidad está por debajo del día 0 siendo esta su menor valor.

Comparando la viscosidad del aceite de partida (33,541 @10 [rpm]) todas las emulsiones tienen un menor valor de viscosidad sin importar los parámetros. También, el volumen de aceite-agua juega un papel crucial porque para la relación 70% aceite – 30% de ambos casos; las emulsiones presentan una viscosidad menor (aproximadamente de 2,000 [cP]) comparada con las emulsiones de las otras relaciones (aproximadamente 4,000 [cP]).

En la comparación de las emulsiones de ambos agentes emulsificantes; los primeros días de medición no se presentan tendencias en los resultados, pero para el día 21 en las relaciones 70% aceite – 30% salmuera y 50% aceite – 50% salmuera, las emulsiones elaboradas sólo con surfactante presentan una menor viscosidad en comparación con las que contienen nanopartículas, pero el comportamiento es inverso en la relación 30% aceite – 70% salmuera.

El tamaño de gota de las todas emulsiones indica que de acuerdo con la clasificación de la **Tabla 4** son macroemulsiones; que ayudan a nivel yacimiento para mejorar el control de la movilidad de los fluidos [4], [19].

CONCLUSIONES

La implementación de *data science* permitió desarrollar la aplicación *AIM Emulsions* por medio del uso de la herramienta computacional MATLAB. A pesar de las dificultades que se encontraron en la recopilación de datos; se encontraron tendencias en los resultado de viscosidad, tamaño de gota y rendimiento de emulsiones elaboradas con aceite (mineral y extrapesado) y salmueras provenientes de campo.

De acuerdo con las tendencias encontradas se conocieron las similitudes y diferencias de las emulsiones obtenidas con los dos agentes emulsificantes empleados; surfactante no iónico (nonilfenoletoxilado) y nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂).

Las emulsiones elaboradas con aceite mineral que contienen NPs-I presentan una menor viscosidad a 35,000 [ppm] comparadas con las de NPs-II, por lo que se seleccionaron las primeras nanopartículas de óxido de silicio para realizar las emulsiones de crudo extrapesado.

En la comparación de iones presentes en la salmuera, se observó que las emulsiones de aceite mineral con salmuera de cloruro de magnesio y surfactante presentan una menor viscosidad comparadas con las salmueras elaboradas con los iones de Ca²⁺ y Na⁺, aunque en presencia de nanopartículas no hay un cambio significativo en la viscosidad al cambiar el ión presente en la salmuera.

Todas las emulsiones, tanto las de aceite mineral y crudo extrapesado Jurásico, presentadas en este trabajo exhiben un comportamiento similar en su viscosidad; donde al día cero se muestra su menor valor de viscosidad; después aumenta teniendo su valor máximo y en la última medición de viscosidad esta disminuye sin alcanzar el valor del día cero.

En el caso del aceite mineral de partida, la viscosidad de las emulsiones es mayor. Por lo que se refiere a los crudos extrapesados, KTIA y Jurásico, la viscosidad de las emulsiones a cualquier tiempo y salinidad es mucho menor que el aceite de partida.

Además, la relación aceite/agua, así como el tipo de aceite juegan un rol importante en el valor de viscosidad. Para el aceite mineral y Jurásico se presenta un menor valor viscosidad para la relación 70% aceite – 30% salmuera comparada con la relación 50% aceite– 50% salmuera. En cambio, para el aceite KTIA el comportamiento es a la inversa.

Es importante mencionar que el valor de viscosidad no cambia si se aumenta la salinidad para los casos de aceite mineral y Jurásico ya que el intervalo de las gráficas no sufre una alteración. En cambio, para el aceite KTIA al aumentar la salinidad se aprecia una disminución en el valor de viscosidad.

Por medio del tamaño de gota se pudo conocer que todas las emulsiones (aceite mineral y Jurásico) elaboradas son macroemulsiones. Este tipo de emulsiones ayudan a nivel yacimiento para mejorar el control de la movilidad de los fluidos. Con el rendimiento (aceite

mineral y KTIA) se pudo conocer que el agua libre de todas las emulsiones no cambia después del día siete.

Las emulsiones analizadas en este trabajo exhibieron una viscosidad menor que la del aceite de partida (KTIA y Jurásico) por lo que ayudaría a su transporte o producción, a su vez estas emulsiones no son estables (muchas se rompen a los pocos minutos de ser formadas) lo que ayudaría a la recuperación del aceite de la emulsión.

Como agente emulsificante se recomienda utilizar surfactante ya que, aunque en algunas emulsiones no se aprecia bien su comportamiento, se cuenta con un mayor número de emulsiones que presentan una menor viscosidad sólo con el uso de surfactante en comparación con las que cuentan también con nanopartículas.

Finalmente, la aplicación *AIM Emulsions* permitirá ingresar a los usuarios de LIRFFF a los datos del proyecto; Plataforma Yacimiento en miniatura para Estudios de EOR mediante Nanofluidos Inteligentes en Campos Maduros y No Convencionales de México para seguir su desarrollo y la aplicación de nuevos parámetros tomando como base los resultados previamente presentados.

APÉNDICE A:

RESULTADOS DE VISCOSIDAD DE ACEITE EXTRAPESADO KTIA

Se exhiben algunos resultados de viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm] para las emulsiones de aceite extrapesado KTIA a salinidad variable y con respecto al tiempo. Los resultados en la aplicación *AIM Emulsions* se presentan en dos formas distintas; gráficos de viscosidad respecto al tiempo y viscosidad respecto a la salinidad, para que el usuario tenga a su disposición formas distintas de comparación. La discusión se divide en tres secciones; 1. surfactante y 2. surfactante + nanopartículas como agentes emulsificantes y 3. comparación entre los agentes emulsificantes.

1. Surfactante

Viscosidad respecto a la salinidad, relación 70% aceite – 30% salmuera

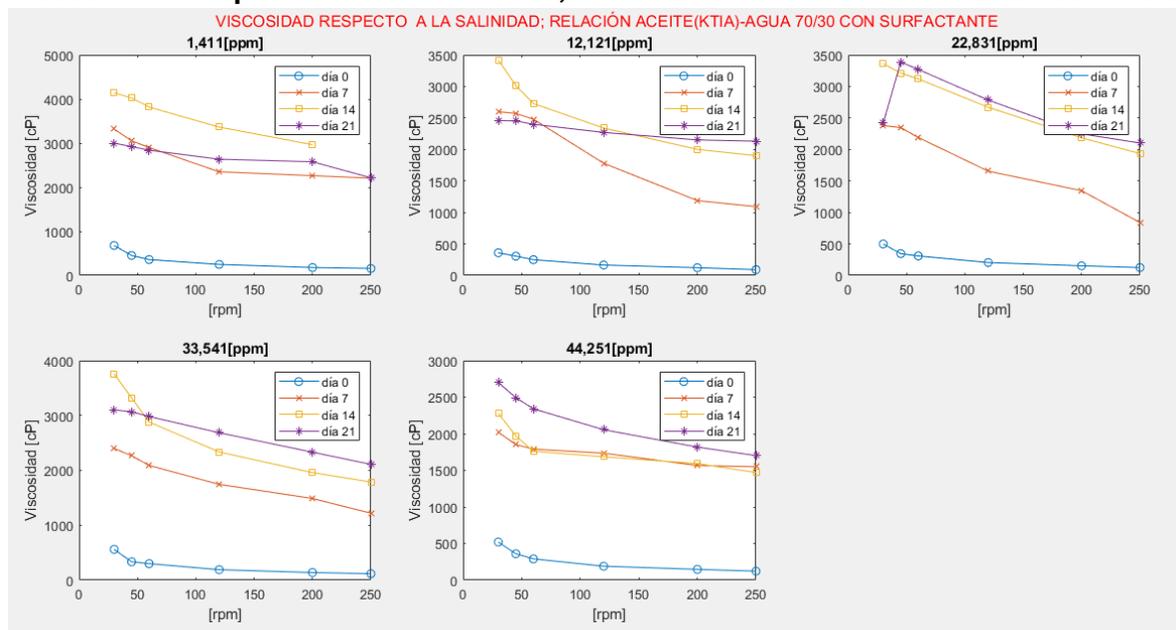


Fig. A. 1 – La viscosidad de las emulsiones aumenta con el paso del tiempo, pero en emulsiones elaboradas con salmueras de 1,411 y 12,121 [ppm] en el día 21 tiene un decremento en el valor de la viscosidad.

Viscosidad respecto a la salinidad, relación 50% aceite – 50% salmuera

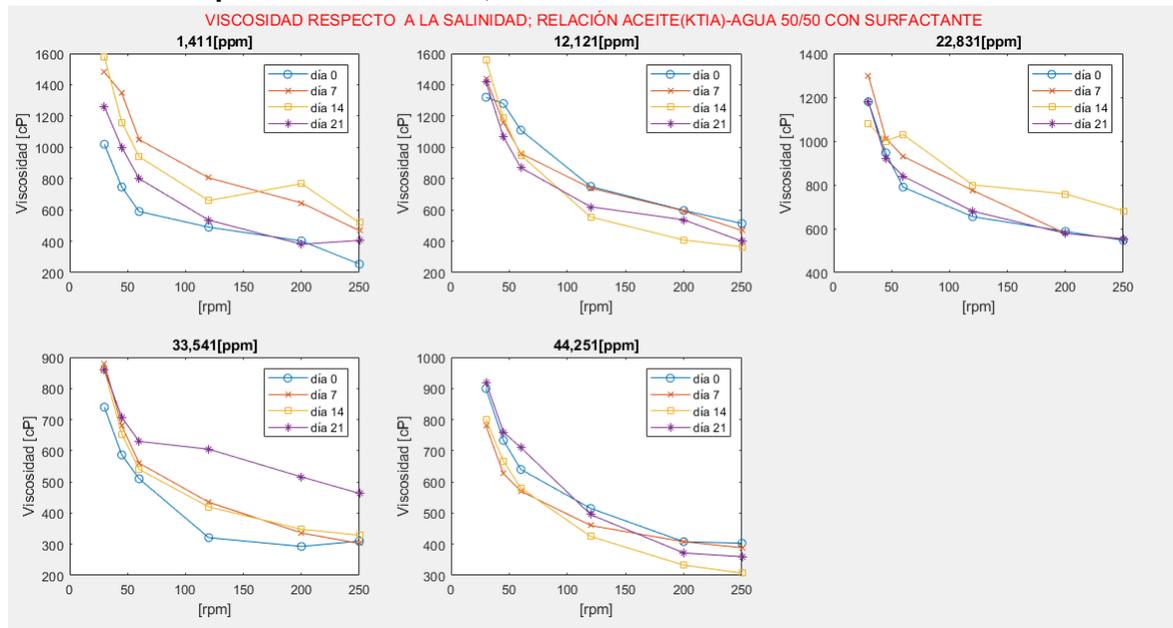


Fig. A. 2 – Para las emulsiones de 1,411 y 33,541 [ppm] la viscosidad aumenta con respecto al tiempo y para las demás emulsiones se puede apreciar un comportamiento similar en el valor de las viscosidades.

Viscosidad respecto a la salinidad, relación 30% aceite – 70% salmuera

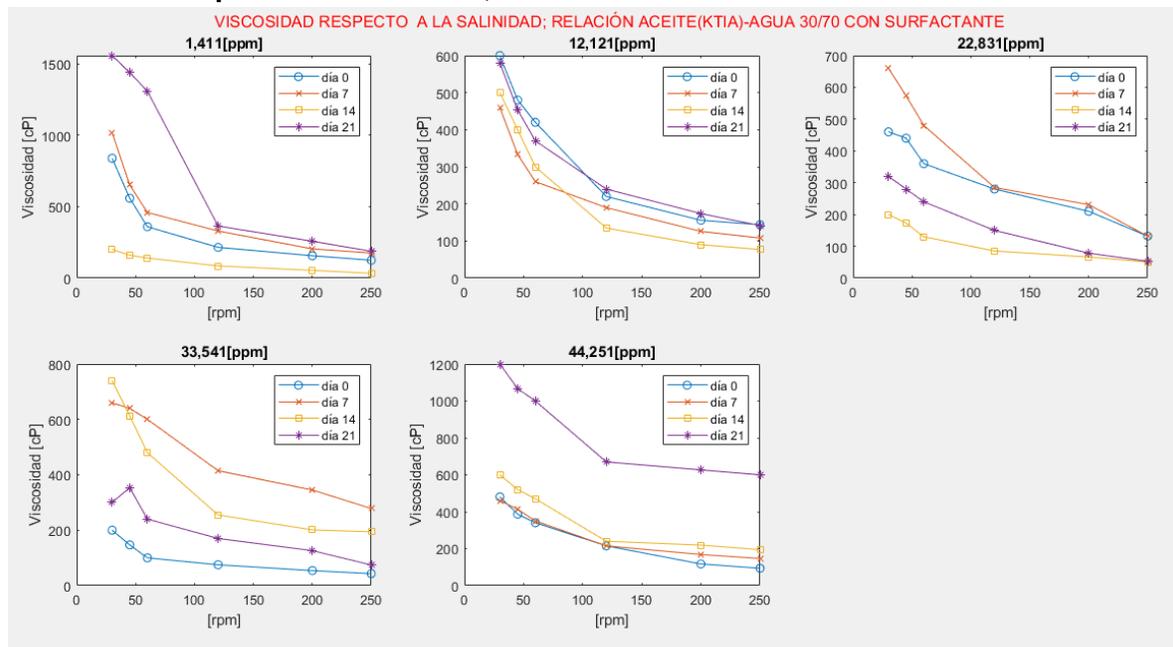


Fig. A. 3 – No se logra apreciar una tendencia clara en estas emulsiones. Lo que pudo ocurrir fue un error en las mediciones porque se tomaron las tres fases aceite, emulsión y agua debido a que en esta relación se cuenta con poco volumen de emulsión para medir.

2. Surfactante + nanopartícula

Viscosidad respecto a la salinidad, relación 70% aceite – 30% salmuera

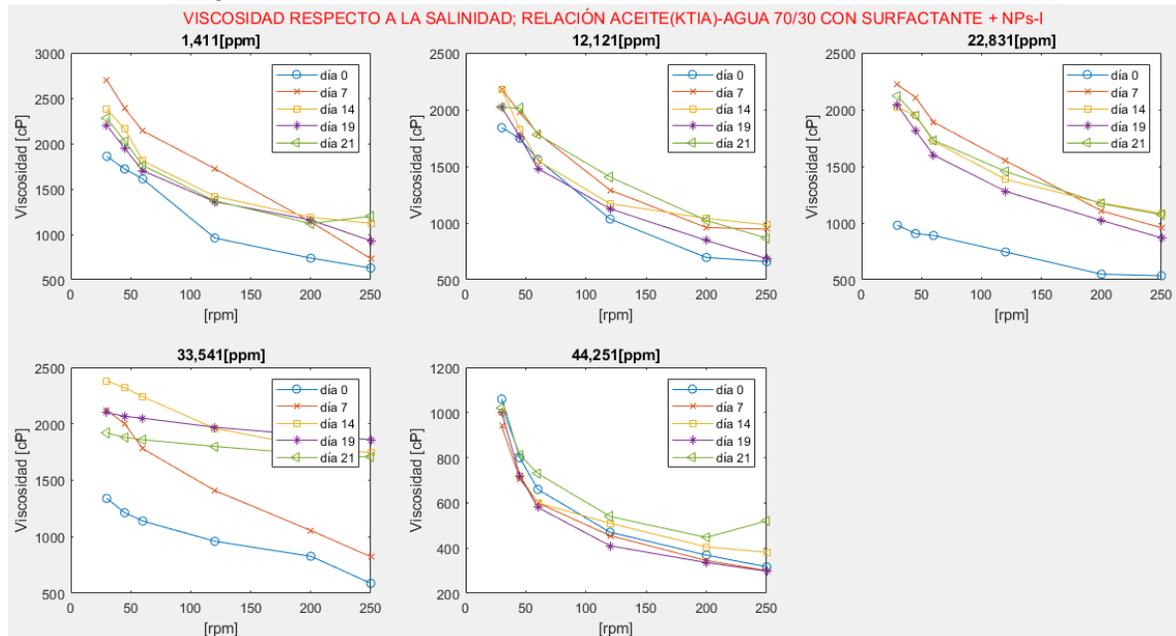


Fig. A. 4 – La viscosidad de las emulsiones tienen su valor mínimo en el día 0; a excepción de la emulsión elaborada con salmuera de 44,251 [ppm]. En todas las emulsiones, después del día 0, aumenta su viscosidad y después disminuye en su última medición.

Viscosidad respecto a la salinidad, relación 50% aceite – 50% salmuera

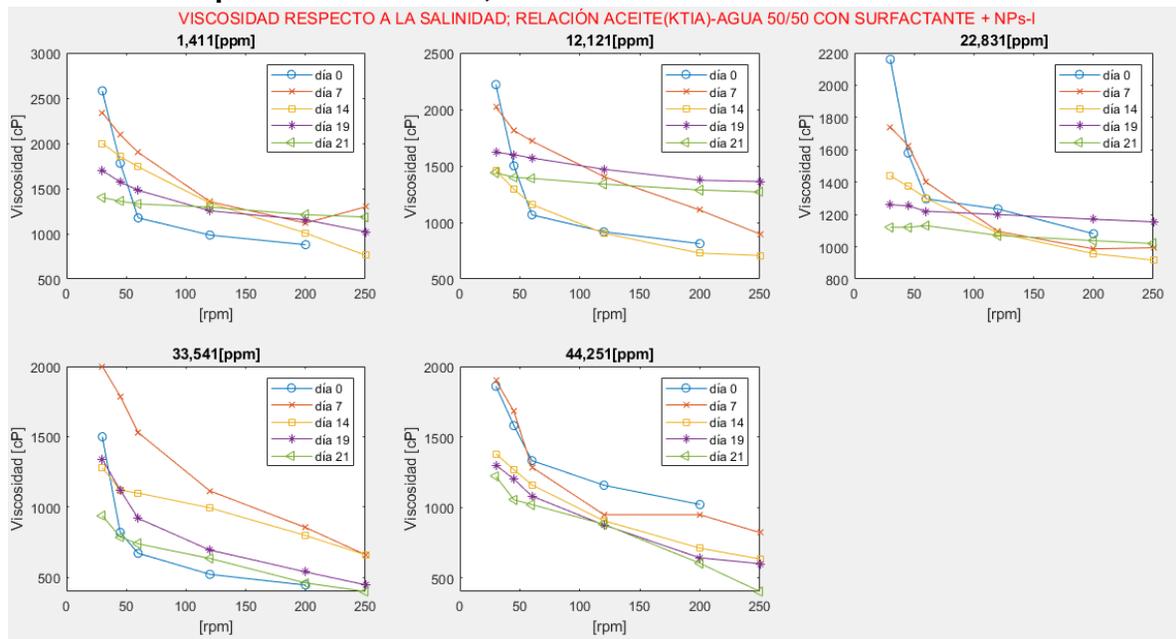


Fig. A. 5 – Aunque no se aprecia una tendencia clara en los resultados a @250 [rpm] todas las emulsiones presentan su mayor valor de viscosidad al día 7 o 14 y después este valor disminuye.

Viscosidad respecto a la salinidad, relación 30% aceite – 70% salmuera

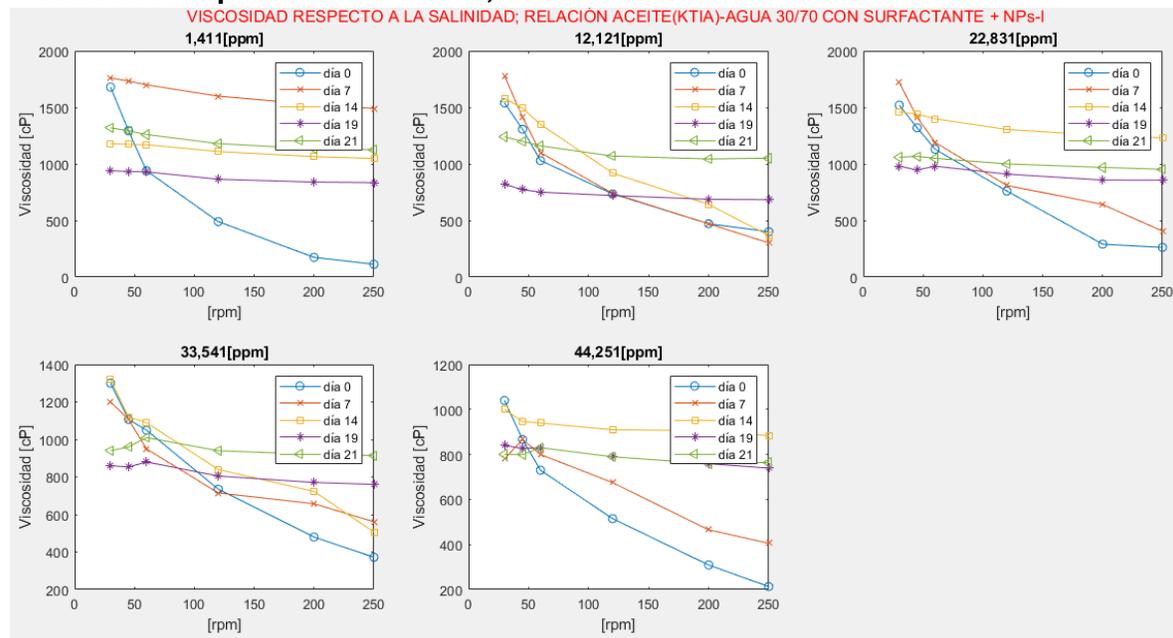


Fig. A. 6 – Para este volumen aceite/agua el análisis es complejo, pero a @250 [rpm] al día 0 las emulsiones tienen su menor valor de viscosidad, a excepción de la emulsión a 12,121 [ppm]. Para todas las emulsiones el comportamiento de la viscosidad aumenta al día 7 y 14; y disminuye para los días 19 y 21.

3. Comparación de surfactante y surfactante + NPs-I

70% aceite mineral – 30% salmuera: Las emulsiones elaboradas con surfactante presentan una menor viscosidad al día 0 (ver **Apéndice 7**). Con el paso del tiempo las emulsiones elaboradas con surfactante + nanopartículas son las que exhiben una menor viscosidad.

50% aceite mineral – 50% salmuera: En comparación con la relación 70% aceite mineral – 30% salmuera las emulsiones elaboradas con surfactante presentan una menor viscosidad en comparación con las que contienen nanopartículas sin importar el día en el que se realice la medición (ver **Apéndice 8**).

30% aceite mineral – 70% salmuera: Al igual que la relación 50% aceite mineral – 50% salmuera las emulsiones con surfactante presentan menor viscosidad comparadas con las que contienen nanopartículas sin importar el día (ver **Apéndice 9**).

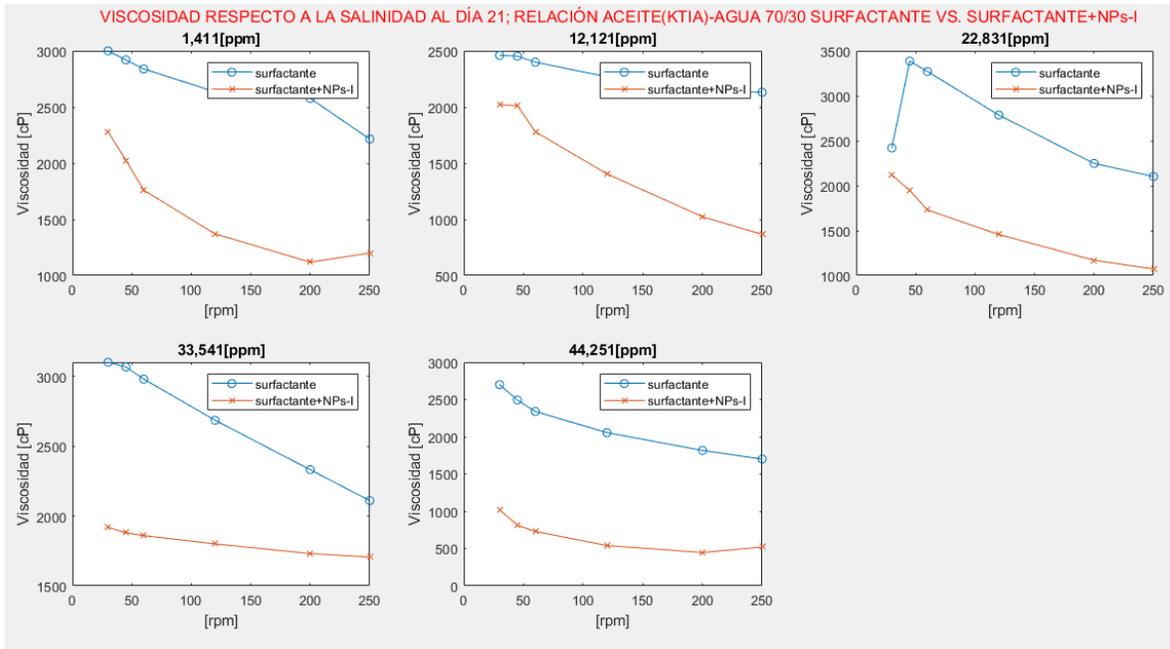


Fig. A. 7 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera.

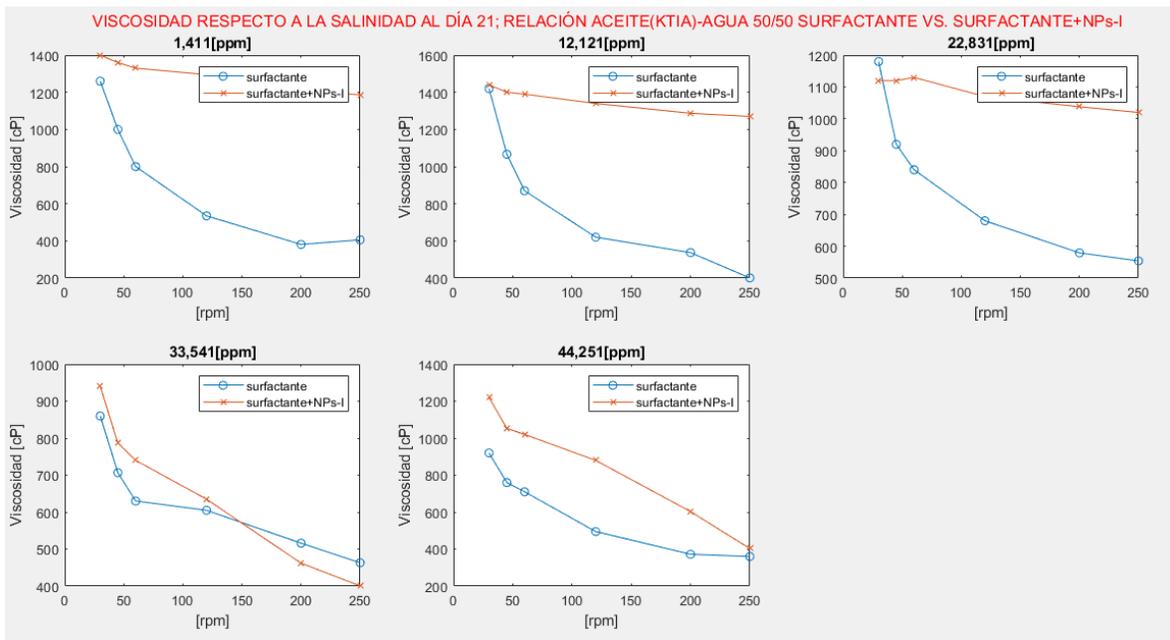


Fig. A. 8 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite – 50% salmuera.

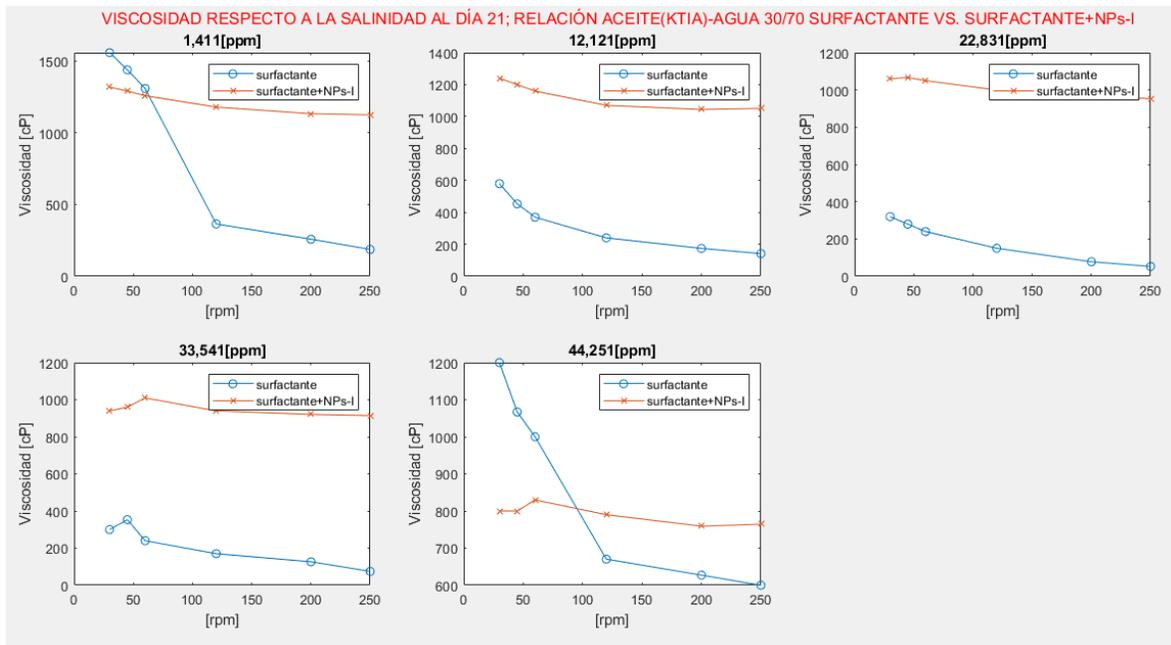


Fig. A. 9 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera.

APÉNDICE B:

SAFETY DATA SHEET

En esta sección se cuenta con el *Safety data sheet* de las nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2) empleadas en la elaboración de las emulsiones presentadas en este trabajo.

Silicon Dioxide Nanoparticles/ Nanopowder (99.5%, 20nm)

Product #: 6808NM
Non-porous White Powder
CAS Number: 7631-86-9
Empirical Formula: SiO_2

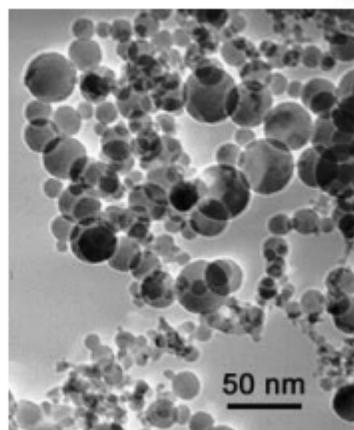
NPs - I

Specifications

Silicon Oxide (SiO_{2-x} , $x = \sim 0.5$, 99.5%), non-porous
White nanopowder, no any surface treatment
APS: 20 nm
SSA: 160 m^2/g
Morphology: spherical
Bulk Density: 0.08-0.10 g/cm^3

Typical Impurities (%):

Al	≤ 0.002	Cl	≤ 0.001
Fe	≤ 0.001		
Ca	≤ 0.002		
Mg	≤ 0.001		



Silicon Oxide Nanoparticles/ Nanopowder (SiO_2 , 99.8%, 10-20 nm, surface modified with amino group, dispersible)

Product #: 6851HN

Form: White Powder

Empirical Formula: SiO_2

NPs - II

Specifications

Purity: 99.8% (before surface treatment)

APS: 10-20 nm

SSA: 90-130 m^2/g

Characteristics:

- surface modified with amino group;
- dispersible in toluene, epoxy resin, unsaturated resin, polymethacrylates, phenolic resin, nylon, and paint;
- reactive with epoxy group and carboxyl group in organics or polymers

Typical Impurities

C	<0.5wt%
Ca:	<1000 ppm
Fe:	<500 ppm
Ti:	<500 ppm
Na	<500 ppm

REFERENCIAS

- [1] Carmona D. and Fernández V., “Caracterización integrada de yacimientos petroleros,” *Universidad Nacional Autónoma de México*, México, 2014. [Online]. Available: <http://132.248.9.195/ptd2014/octubre/0720134/0720134.pdf>
- [2] J. Kelleher and B. Tierney, *Data Science*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2018.
- [3] G. Verma, B. Soni, S. Bourenname, and A. Ramos, *Data Science: Theory, Algorithms, and Applications*. Singapur: Springer, 2021.
- [4] C. Lárez Velásquez, S. Koteich Khatib, and F. López González, *Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones*. Universidad de los Andes, 2015.
- [5] A. Hart, “A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines,” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 4, no. 3. Springer Verlag, pp. 327–336, Sep. 01, 2014. doi: 10.1007/s13202-013-0086-6.
- [6] S. Chowdhury, S. Shrivastava, A. Kakati, and J. S. Sangwai, “Comprehensive Review on the Role of Surfactants in the Chemical Enhanced Oil Recovery Process,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 61, no. 1. American Chemical Society, pp. 21–64, Jan. 12, 2022. doi: 10.1021/acs.iecr.1c03301.
- [7] E. E. Schadt, M. D. Linderman, J. Sorenson, L. Lee, and G. P. Nolan, “Computational solutions to large-scale data management and analysis,” *Nature Reviews Genetics*, vol. 11, no. 9. pp. 647–657, Sep. 2010. doi: 10.1038/nrg2857.
- [8] F. Barclay, A. Bruun, K. Bolding, and J. Camara, “Inversión sísmica: Lectura entre líneas,” California. [Online]. Available: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/inversion-sismica>
- [9] J. Montaña, “Implicaciones de los iones de calcio y magnesio en las propiedades reológicas de emulsiones para transporte del hidrocarburo,” *Universidad Nacional Autónoma de México*, 2021, doi: 10.26226/morressier.5f6c5f439b74b699bf390ad9.
- [10] IBM, “Conceptos básicos de ayuda de CRISP-DM,” Aug. 17, 2021. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=dm-crisp-help-overview> (accessed Aug. 11, 2022).
- [11] M. T. M. Inc. Natick, “MATLAB.” 2018. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/>
- [12] D. Magaña and A. Romero, “Desarrollo y evaluación de nanofluidos con aplicación potencial en recuperación mejorada,” *Universidad Nacional Autónoma de México*, Ciudad de México, 2018. [Online]. Available: <http://132.248.9.195/ptd2018/junio/0775072/Index.html>
- [13] D. Arguijo, “Evaluación de nanofluido para recuperación mejorada de aceite,” *Universidad Nacional Autónoma de México*, Ciudad de México, 2021. [Online]. Available: <http://132.248.9.195/ptd2021/junio/0813171/Index.html>

-
- [14] D. Langevin, S. Poteau, I. Hénaut, and J. F. Argillier, "Crude Oil Emulsion Properties and their Application to Heavy Oil Transportation," *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, vol. 59, no. 5, pp. 511–521, 2004.
- [15] C. Negin, S. Ali, and Q. Xie, "Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery," *Petroleum*, vol. 3, no. 2. KeAi Communications Co., pp. 197–211, Jun. 01, 2017. doi: 10.1016/j.petlm.2016.11.007.
- [16] A. M. Ealias and M. P. Saravana Kumar, "A review on the classification, characterization, synthesis of nanoparticles and their application," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Dec. 2017, vol. 263, no. 3. doi: 10.1088/1757-899X/263/3/032019.
- [17] A. Peralta, C. Villagómez, and P. Gómora, "Determinación del cambio en la tensión superficial y alteración de la mojabilidad en medios porosos usando nanopartículas," *Congreso Mexicano del Petróleo*, pp. 1–26, 2022.
- [18] S. Sanz, "EMULSIONES," 2017. Accessed: Oct. 11, 2022. [Online]. Available: <https://botplusweb.portalfarma.com/documentos/2017/4/11/114468.pdf>
- [19] D. J. McClements, "Edible nanoemulsions: Fabrication, properties, and functional performance.," *Soft Matter*, 2011.
- [20] S. L. Kokal and S. Aramco, "Chapter 12 Crude Oil Emulsions," *Petroleum Engineering Handbook*, pp. 533–569, 2006.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Datos que son posibles consultar en la aplicación AIM Emulsions.	8
Fig. 2 – Metodología para la elección de un surfactante para cEOR. Modificado [6].	11
Fig. 3 – Conjunto de habilidades para un data scientist. Modificado [2].	14
Fig. 4 – Porcentaje de recuperación de aceite de cada etapa de producción. Recuperado [4].	16
Fig. 5 – Surfactante estabilizando una emulsión. Modificado [5].	17
Fig. 6 – <i>Izquierda: perfil de barrido microscópico donde el fenómeno de desplazamiento es dominado por la reología interfacial. Derecha: perfil de barrido vertical durante el proceso de EOR donde el agua se utiliza como un agente de prelavado.</i> Modificado [6].	18
Fig. 7 – Representación de los tipos de surfactantes. Modificado [6].	18
Fig. 8 – <i>Discontinuidad de presión creada por la interacción de NP en la cuña formada en las interfases petróleo-acuoso-roca.</i> Modificado [6].	21
Fig. 9 – Tipos de emulsión. Modificado [5].	22
Fig. 10 – Toma de propiedades de las emulsiones de este proyecto.	24
Fig. 11 – Procedimiento para la elaboración del proyecto.	26
Fig. 12 – Menú principal.	28
Fig. 13 – Menú general de emulsiones de aceite mineral.	29
Fig. 14 – Viscosidad de aceite mineral.	29
Fig. 15 – Opciones de gráficos viscosidad [cP] vs [rpm]: surfactante.	30
Fig. 16 – Opciones de gráficos viscosidad [cP] vs [rpm]: surfactante + SiO ₂	31
Fig. 17 – Comparación de resultados de viscosidad entre las relaciones 70%aceite-30%agua y 50%aceite-50%agua.	31
Fig. 18 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.	32
Fig. 19 – Herramientas para la visualización de gráficas.	32
Fig. 20 – Ejemplo de ventanas abiertas simultáneamente.	33
Fig. 21 – Menú de tamaño de gota para aceite mineral.	33
Fig. 22 – Ejemplo de la visualización de la distribución de tamaño de gota para una emulsión 70% aceite – 30% agua, salinidad 8,000 [ppm].	34
Fig. 23 – Rendimiento para emulsiones de aceite mineral para el día 0 y 7.	34
Fig. 24 – Menú principal para aceite KTIA.	35
Fig. 25 – Menú de viscosidad para emulsiones con aceite KTIA.	36
Fig. 26 – Viscosidad para emulsiones preparadas con surfactante + nanopartículas a distintas relaciones agua-aceite.	36
Fig. 27 – Comparación de la viscosidad entre emulsiones estabilizadas con agente emulsificante (1) y (2) con respecto al tiempo.	37
Fig. 28 – Menú tamaño de gota para emulsiones con aceite Jurásico.	38
Fig. 29 – Rendimiento de emulsiones con aceite KTIA.	38
Fig. 30 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.	40
Fig. 31 – Salinidad [ppm] vs. viscosidad [cP] a revolución constante (@45 [rpm]).	41
Fig. 32 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera. Comparación de iones (Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺).	41
Fig. 33 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.	42
Fig. 34 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.	43

Fig. 35 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera, con salmuera de magnesio.	44
Fig. 36 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.	45
Fig. 37 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I o NPs-II, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.	46
Fig. 38 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I o NPs-II, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.	47
Fig. 39 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-II, relación: 30% aceite mineral – 70% salmuera.	47
Fig. 40 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.	48
Fig. 41 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.	49
Fig. 42 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad, MgCl_2 [ppm], relación: 70% aceite mineral – 30% salmuera.	50
Fig. 43 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad, MgCl_2 [ppm], relación: 50% aceite mineral – 50% salmuera.	51
<i>Fig. 44 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 70% aceite – 30% salmuera.</i>	<i>54</i>
Fig. 45 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 50% aceite – 50% salmuera.	55
Fig. 46 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante, relación: 30% aceite – 70% salmuera.	56
Fig. 47 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera.	57
Fig. 48 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite – 50% salmuera.	58
Fig. 49 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante + NPs-I, relación: 30% aceite – 70% salmuera.	58
Fig. 50 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera.	60
Fig. 51 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite – 50% salmuera.	60
Fig. 52 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm], para emulsiones con surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 30% aceite – 70% salmuera.	61
Fig. 53 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad [ppm], relación: 70% aceite – 30% salmuera.	62
Fig. 54 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad [ppm], relación: 50% aceite – 50% salmuera.	63
Fig. 55 – Gráficas tamaño de promedio de gota [μm] vs. salinidad [ppm], relación: 30% aceite – 70% salmuera.	63
Fig. A. 1 – La viscosidad de las emulsiones aumenta con el paso del tiempo, pero en emulsiones elaboradas con salmueras de 1,411 y 12,121 [ppm] en el día 21 tiene un decremento en el valor de la viscosidad.	68

Fig. A. 2 – Para las emulsiones de 1,411 y 33,541 [ppm] la viscosidad aumenta con respecto al tiempo y para las demás emulsiones se puede apreciar un comportamiento similar en el valor de las viscosidades. 69

Fig. A. 3 – No se logra apreciar una tendencia clara en estas emulsiones. Lo que pudo ocurrir fue un error en las mediciones porque se tomaron las tres fases aceite, emulsión y agua debido a que en esta relación se cuenta con poco volumen de emulsión para medir. 69

Fig. A. 4 – La viscosidad de las emulsiones tienen su valor mínimo en el día 0; a excepción de la emulsión elaborada con salmuera de 44,251 [ppm]. En todas las emulsiones, después del día 0, aumenta su viscosidad y después disminuye en su última medición. 70

Fig. A. 5 – Aunque no se aprecia una tendencia clara en los resultados a @250 [rpm] todas las emulsiones presentan su mayor valor de viscosidad al día 7 o 14 y después este valor disminuye. 70

Fig. A. 6 – Para este volumen aceite/agua el análisis es complejo, pero a @250 [rpm] al día 0 las emulsiones tienen su menor valor de viscosidad, a excepción de la emulsión a 12,121 [ppm]. Para todas las emulsiones el comportamiento de la viscosidad aumenta al día 7 y 14; y disminuye para los días 19 y 21. 71

Fig. A. 7 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera. 72

Fig. A. 8 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 50% aceite – 50% salmuera. 72

Fig. A. 9 – Gráficas viscosidad [cP] vs. velocidad de corte [rpm]. Surfactante vs. surfactante + NPs-I, relación: 70% aceite – 30% salmuera. 73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Tipos de surfactantes. Modificado [6],[15].	19
Tabla 2 – Tipos de nanopartículas. Modificado [16].	19
Tabla 3 – Operaciones en las que se aplican los nanofluidos. Modificado [4].	20
Tabla 4 – Clasificación de emulsiones de acuerdo con el tamaño de gota. Modificado [4], [19].	22
Tabla 5 – Condiciones para la elaboración de las emulsiones.	25
Tabla 6 – Media del tamaño de gota de emulsiones elaboradas con aceite mineral.	51
Tabla 7 – Concentración de agua emulsionada [%] con respecto al tiempo para las emulsiones de aceite mineral. *surfactante y **surfactante + NPs-I.	52
Tabla 8 – Media del tamaño de gota de emulsiones elaboradas con aceite Jurásico al día 0.	64