

Effect of surfactant type on electrostatic desestabilization of W/O emulsions

María Alejandra Rodríguez^{1,2}; Ramnier Gómez²; José Ángel Sorrentino²

¹Universidad Metropolitana, Venezuela, marodriguezded@unimet.edu.ve

²Universidad Central de Venezuela, Venezuela, ramnier95@gmail.com

²Universidad Central de Venezuela, Venezuela, jose.angel.sorrentino@gmail.com

Abstract– *The effect of different types of surfactants on the electrostatic destabilization of water-in-oil (W/O) emulsions is the focus of the present research. To this end, W/O emulsions are formulated with a non-ionic surfactant (Span 80) and with an amphoteric surfactant (Soy lecithin) at 3% w/w of the surfactant in the oil phase (paraffin), considering emulsions with two water/oil phase ratios (20/80 and 40/60), the emulsions are characterized according to dilution, bulk density and apparent viscosity test; a direct current (DC) electric field is applied in the observation cell of flat copper electrodes and the Global Destabilization Factor (FDG) is determined as the response variable. The results show that the impact of the electric field on the emulsion depends on its initial stability. The greater the proportion of the dispersed phase, the greater the average droplet size and the wider the droplet size distribution, the greater the destabilization achieved by the electrical treatment, observing a different behavior in the coalescence of the droplets depending on the surfactant. This research is associated with SDG 9.*

Keywords– *Surfactant, W/O emulsion, Electric field, Destabilization, Destabilization factor.*

Efecto del tipo de surfactante en la desestabilización electrostática de emulsiones W/O

María Alejandra Rodríguez^{1,2}; Rannier Gómez²; José Ángel Sorrentino²

¹Universidad Metropolitana, Venezuela, marodriguezded@unimet.edu.ve

²Universidad Central de Venezuela, Venezuela, rannier95@gmail.com

²Universidad Central de Venezuela, Venezuela, jose.angel.sorrentino@gmail.com

Resumen– El efecto de diferentes tipos de surfactantes en la desestabilización electrostática de emulsiones agua en aceite (W/O) es el centro de la presente investigación. Con este fin se formulan emulsiones W/O con un surfactante no iónico (Span 80) y con un surfactante anfotérico (Lecitina de soya) al 3% p/p del surfactante en fase oleosa (parafina), considerando emulsiones con dos relaciones de fases agua/aceite (20/80 y 40/60), se caracterizan las emulsiones según prueba de dilución, densidad aparente y viscosidad aparente; se aplica campo eléctrico de corriente directa (DC) en la celda de observación de electrodos planos de cobre y se determina el Factor de Desestabilización Global (FDG) como variable respuesta. Los resultados muestran que el impacto del campo eléctrico en la emulsión depende de la estabilidad inicial de la misma. A mayor proporción de la fase dispersa, mayor el tamaño de gota promedio y más amplia la distribución de tamaño de gotas, mayor es la desestabilización alcanzada por el tratamiento eléctrico, observando un comportamiento distinto en la coalescencia de las gotas en función del surfactante. Esta investigación está asociada al ODS 9.

Palabras clave– Surfactante, Emulsión W/O, Campo Eléctrico, Desestabilización, Factor de Desestabilización.

I. INTRODUCCIÓN

Se han estudiado diversos tipos de emulsiones, entre las cuales se tienen las emulsiones de aceite en agua (O/W) las cuales son predominantes en la industria de alimentos y cosmética; también se tienen emulsiones de agua en aceite (W/O) las cuales son comunes en la etapa de producción dentro de la industria petrolera, las cuales originan diversos problemas operativos, por lo que su estudio genera interés.

Diversas universidades, entre las que se encuentran la Universidad Central de Venezuela (UCV) y la Universidad Metropolitana de Caracas (UNIMET), se han propuesto como tarea buscar soluciones a la problemática asociada a la separación de fases de las emulsiones W/O en la industria petrolera, para lo cual han estudiado y aplicado distintas tecnologías físicas. Es por ello que el presente trabajo busca una mayor comprensión del comportamiento de estas emulsiones cuando se varía alguna propiedad, ya sea una variable de composición, de formulación o un factor fluido-mecánico.

Las emulsiones son un sistema disperso, donde una fase se dispersa en forma de gotas en una fase continua, siendo ambas fases líquidas inmiscibles entre sí [1]. Estos sistemas

son termodinámicamente inestables; sin embargo, alcanzan estabilidad al incorporar al sistema sustancias denominadas surfactantes, las cuales presentan actividad interfacial. Los distintos tipos de emulsiones están presentes en industrias como farmacéutica, cosméticas, alimenticia, petrolera, petroquímica, textil, limpieza, entre otras.

La estabilidad de las emulsiones se debe entre otros factores, a los surfactantes presentes en este sistema, los cuales sirven de puente de unión entre las fases inmiscibles, al ubicarse en la interfase entre la gota (fase dispersa) y la fase continua; forman micelas alrededor del área de contacto entre ambas fases, logrando con ello evitar la coalescencia [1].

Dependiendo de las aplicaciones y usos, es conveniente lograr una mayor estabilidad en una emulsión o bien desestabilizarla y separar sus fases. En la industria petrolera es de interés desestabilizar la emulsión de agua en crudo, para evitar efectos negativos e indeseables aguas abajo en el proceso de refinación, cómo problemas de corrosión en tuberías y equipos.

Cuando se extrae el crudo del yacimiento contiene agua tanto libre como emulsionada, la primera se retira por decantación, pero la emulsionada requiere de técnicas más eficaces de separación, entre las que se encuentran: calentamiento, decantación, campo eléctrico y química deshidratante; por ello es necesario conocer los parámetros a modificar para lograr una mayor desestabilización.

Dentro de los parámetros a modificar se encuentran: tipo de fase oleosa, tipo de surfactante, proporción de las fases, salinidad, velocidad de agitación, tipo de aspa, tiempo de agitación, temperatura y diferencia de densidades entre las fases.

Este trabajo plantea evaluar el efecto del tipo de surfactante en la desestabilización electrostática de las emulsiones W/O; para ello se formularon emulsiones W/O estables, modificando el tipo de surfactante (anfotérico y no iónico) y la cantidad de agua, para luego aplicarles campo eléctrico de corriente directa (DC) como tecnología de desestabilización orientada a mejorar la separación de fases agua-crudo, lo que esta alineado al ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura [2].

Estudios indican que la cantidad mínima de surfactante a agregar para realizar las emulsiones debe estar entre 1,5 y 2,0 %; las emulsiones W/O preparadas con los surfactantes no iónicos presentan mayor estabilidad cuando se cuenta con un balance hidrófilo-lipófilo (HLB) igual a 5,5 (mezcla de surfactantes Span 80 y Arkopal N40), son realizadas con agitación continua a velocidades entre 6.100 y 9.500 rpm, y con tiempos de agitación entre 5 y 10 min [3].

La aplicación del campo eléctrico DC en las emulsiones W/O acelera el proceso de desestabilización de la emulsión, donde la separación de las fases aumenta a medida que incrementa la intensidad del voltaje aplicado, lo que disminuye el tiempo de separación de las fases. Por medio de la microscopía es posible confirmar los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad de las muestras, ya que la emulsión que presenta menor tamaño de gotas es la más estable [4].

Un surfactante es una sustancia química, que presenta doble afinidad conferida por su estructura molecular, constituida por una parte polar (hidrofílica) y otra apolar (lipofílica); se caracteriza por tener actividad interfacial y adsorberse en una interfase de forma orientada, disminuyendo la tensión interfacial y superficial [5]. Los surfactantes se pueden clasificar según su estructura molecular o su ionización en la fase acuosa en: surfactantes no iónicos, iónicos (aniónicos, catiónicos) y anfóteros [5].

Los surfactantes anfóteros son aquellos que tienen combinados dentro de una misma molécula una parte aniónica y otra parte catiónica; en general son costosos y por esta razón su utilización se reduce a aplicaciones particulares. Ciertos anfóteros son insensibles al pH, otros son catiónicos a pH ácido o son aniónicos a pH alto [6].

Los surfactantes no iónicos están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40% del total. En solución acuosa no se ionizan, puesto que ellos poseen grupos hidrófilos del tipo alcohol, fenol, sorbitol, éter o amida. Una alta proporción de estos surfactantes pueden tornarse relativamente hidrofílicos gracias a la presencia de una cadena poli éter del tipo polióxido de etileno [6].

La formulación de las emulsiones trae consigo la selección de dos tipos de variables: las variables de composición, relativas de los constituyentes principales de un sistema, el surfactante, el agua y el aceite; y las variables de formulación fisicoquímicas, incluyen parámetros físicos y químicos como temperatura, presión, naturaleza de los constituyentes principales y aditivos, proporción de aditivos, y todos aquellos parámetros susceptibles de influir sobre el sistema [7].

Se deben tener en cuenta los factores fluido-mecánicos, que involucran los equipos en los cuales se realiza una emulsión, en cada una de ellas se debe tener en cuenta el tiempo de agitación, velocidad de agitación y tipo de aspa con la cual se trabaja.

El HLB (balance lipofílico – hidrofílico) es un método que toma en cuenta el equilibrio entre las dos tendencias (hidrofílica y lipofílica) de los surfactantes. Considera la naturaleza del aceite a través de la noción del “HLB requerido” que corresponde al HLB de la mezcla de surfactantes conducente a la emulsión más estable con el aceite considerado. A pesar de su imprecisión este método es muy utilizado debido a su simplicidad [5]. En la Fig. 1 se presenta el valor de HLB para los surfactantes hidrofílicos e hidrofóbicos según el uso.

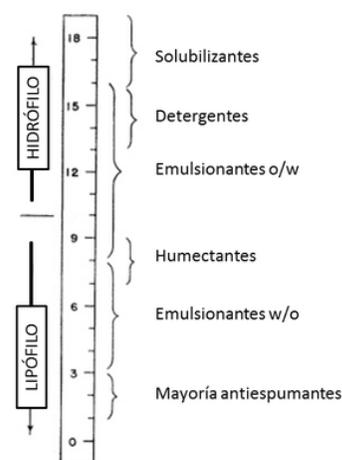


Fig. 1 Clasificación de HLB de surfactantes según su uso [8].

La diferencia hidrofílica–lipofílica (*Hydrophilic Lipophilic Deviation HLD*), es un método de formulación que sirve como herramienta práctica y útil en la optimización de surfactantes; consiste en una expresión que traduce la desviación respecto a la formulación óptima, por lo que es un número adimensional.

El HLB toma en cuenta solo el surfactante, mientras que el HLD es un concepto global que incluye todas las contribuciones fisicoquímicas y emplea una expresión numérica que permite realizar cálculos y predecir las compensaciones entre los efectos de las diferentes variables. Los valores numéricos de esos parámetros son determinados experimentalmente por el método de barrido de formulación.

Una emulsión es estable cuando las pequeñas partículas están uniformemente distribuidas en el medio continuo de la emulsión y es imposible discernir entre si hay o no un cambio en el tamaño, distribución y arreglo espacial de las gotas en el tiempo [9]. Puede afirmarse que la estabilidad de una emulsión es directamente proporcional a la presencia de surfactantes naturales o artificiales, ya que estos disminuyen la

tensión superficial formando una barrera viscosa que impide la coalescencia [10]. Algunos de los factores que contribuyen a la desestabilización de emulsiones están relacionados con la Ley de Stokes. Entre los diversos factores que determinan la estabilidad de una emulsión se encuentran [10]: relación de volumen de fases, viscosidad de la fase oleosa, temperatura, tamaño de gota, composición de salmuera, envejecimiento de la interface, diferencia de densidad, y propiedades reológicas interfaciales.

Una tecnología de separación que debido a su efectividad es comúnmente usada en la separación de fases agua y aceite, es el campo eléctrico de corriente continua (DC) o corriente alterna (AC); mediante esta tecnología se logra la desestabilización de la emulsión W/O y la posterior coalescencia de las gotas de agua emulsionada. Sin embargo, conforme los valores de las propiedades físicas del aceite (viscosidad y densidad) son más altos, su aplicación se dificulta.

Esta tecnología es utilizada en combinación con otras (química demulsificante y decantación) en la deshidratación de crudos, y consiste en utilizar un campo eléctrico que induce la orientación polarizada de cargas en las moléculas que se encuentran en la interface agua-crudo. Una alta frecuencia de choques entre las gotas de agua acelera la coalescencia y reduce el tiempo de reposo requerido por el crudo tratado para la separación de fases [11]; el campo eléctrico utiliza varios mecanismos de modo de promover la floculación (contacto de las gotas) y la coalescencia (unión de las gotas), los cuales proporcionan una separación eficiente de las fases.

La electrocoalescencia es un proceso cuyo propósito principal es el de asistir al acercamiento, contacto y fusión de las gotas de agua dispersas en una fase continua de baja permitividad con el fin de incrementar su tamaño (coalescencia), lo cual acelera su velocidad de sedimentación [12]. El campo aplicado al sistema emulsionado provoca que dos gotas, con carga eléctrica y a una distancia dada se vean influenciadas por la fuerza eléctrica.

El término diseño experimental se utiliza para describir las etapas de: 1) identificación de los factores que pueden influir en el resultado de un experimento, 2) diseño del experimento de modo que se minimicen los efectos de los factores incontrolados, y 3), utilización del análisis estadístico para separar y evaluar los efectos de los diversos factores implicados [13]. Puesto que son muchos los factores que afectan los resultados experimentales pueden necesitarse diseños experimentales complejos. Los estudios que utilizan un Diseño experimental Factorial definen para cada factor dos niveles, conocidos como «alto» y «bajo». Los experimentos factoriales permiten descubrir las interacciones entre las variables y donde es necesario estudiar el efecto conjunto de éstos sobre la respuesta [14].

El comportamiento de grandes conjuntos de partículas es más importante que las características de una sola partícula.

Las partículas casi nunca tienen un solo tamaño; por lo general, son una mezcla de partículas con diferentes tamaños y formas [15]. Una emulsión es un sistema con miles de partículas a ser medidas, y dado que estas partículas son unidades elementales que poseen una vasta variedad de tamaños, entonces se suele hablar de una “distribución acumulada de tamaño de partículas”, la cual es una propiedad intensiva característica de la dispersión que, mediante el análisis estadístico de un conjunto de partículas, permite definir la geometría de la dispersión que las contiene [15].

La distribución acumulada es una curva que representa la fracción o porcentaje de las partículas que se encuentran por debajo o por encima de un determinado tamaño de diámetro equivalente denominado como x_A . Esta distribución permite determinar tanto el tamaño máximo (x_{max}) como el mínimo (x_{min}) de las gotas presentes en la emulsión, así como el valor acumulado para diferentes porcentajes de la muestra [15].

Una vez realizado el estudio estadístico de la emulsión, se puede cuantificar el efecto del tratamiento electrostático aplicado a la muestra, para ello se define el Factor de Desestabilización Global (FDG) [16], el cual es una relación de la distribución acumulada del tamaño de gotas antes y después de la aplicación del campo eléctrico a la emulsión, el cual se define según la ecuación 1.

$$FDG_G = \frac{\int_{x_{min}^o}^{x_{max}^o} f_2^o(x) dx + x_{max} - x_{max}^o - \int_{x_{min}^o}^{x_{max}^o} f_2(x) dx}{A_{inicial} + A_{\Delta A}} \quad (1)$$

Donde, x_{max}^o : diámetro de la gota más grande en la muestra antes de aplicar el campo eléctrico (μm). x_{max} : diámetro de la gota más grande en la muestra luego de aplicar campo eléctrico (μm). $\int f_2^o(x) dx$: área bajo la curva de la distribución acumulada de gotas antes de aplicar el campo eléctrico. $\int f_2(x) dx$: área bajo la curva de la función de la distribución acumulada de gotas luego de aplicar el campo eléctrico. $A_{\Delta A}$: variación del área total de la curva de la distribución acumulada de gotas luego de aplicar campo eléctrico. $A_{inicial}$: área inicial total antes de aplicar campo eléctrico.

Según el valor obtenido del FDG, se puede concluir el efecto del tratamiento aplicado a la emulsión. Si $FDG < 0$, se dice que existe una disminución de la cantidad de agua en gotas grandes, por lo que se estabiliza la emulsión. Si $FDG = 0$, no hay cambio significativo en la muestra al exponerla al campo eléctrico, mientras que si $FDG > 0$, se dice que hay un aumento de la cantidad de agua en gotas grandes indicativo de desestabilización de la emulsión [16].

II. METODOLOGÍA

A. Formulación de las emulsiones

Se realizaron las emulsiones siguiendo el método HLD (surfactante no iónico), de modo de ubicar un valor de HLD positivo que promoviera una emulsión tipo W/O. Se trabajó con las condiciones de agitación y tiempo recomendadas por [3]. Se utilizó una batidora de inmersión marca CUISINART®, que alcanza velocidades entre 6.000 y 6.500 rpm.

Para las emulsiones W/O con los distintos surfactantes (anfotérico o no iónico), se siguieron los siguientes pasos:

1) Se agregó 2% p/p de surfactante (anfotérico o no iónico) en 120 g (20% agua) y 90 g (40% de agua) de parafina, colocando el co-surfactante (1-pentanol, 1-butanol) dependiendo de la emulsión.

2) Se agitó y se esperó a que el surfactante y el co-surfactante se dispersasen en la fase oleosa.

3) Se puso en funcionamiento la batidora de inmersión trabajando en velocidad LOW.

4) Se agregó gota a gota la cantidad de agua destilada deseada para cada emulsión (20 o 40% v/v) y se agitó el sistema por 5 min, aumentando la velocidad de la batidora de inmersión a HIGH al caer la primera gota.

5) Se colocó 5 ml de muestra en 2 tubos de ensayo, y se centrifugó por 10 min a una velocidad de 2.700 rpm con el fin de verificar si la emulsión W/O es estable.

B. Caracterización de las emulsiones W/O

Se verificó que la emulsión obtenida fueran del tipo W/O mediante el método de dispersión, donde de no dispersarse la gota de la emulsión en agua, la emulsión realizada es del tipo W/O.

Se procedió a obtener la densidad aparente (picnómetro a 25°C) y la viscosidad dinámica aparente (viscosímetro Brookfield LVF® a 25°C [17]) de las emulsiones W/O formuladas.

C. Desestabilización de la emulsión W/O con campo eléctrico

En esta experiencia se empleó la cámara de microscopio AmScope MD35 para la captura de las imágenes y videos del Microscopio óptico Nikon MED-600, antes, durante y luego del tratamiento electrostático, con el fin de observar el tamaño de gota de la emulsión. Este procedimiento se realizó para evaluar el efecto de la aplicación de campo eléctrico homogéneo de corriente continua (DC) en la estabilidad de las emulsiones W/O realizadas con dos tipos de surfactantes.

Para ello se tomó una muestra de emulsión W/O y se sometió a campo eléctrico en la celda de observación acoplada al microscopio óptico. Esta celda contiene un par de electrodos de cobre conectados a una fuente de poder capaz de suministrar un voltaje máximo de 10 kV.

Se aplicó un diseño factorial 2ⁿ para definir el conjunto de condiciones que favorece la desestabilización de esta emulsión ante el tratamiento eléctrico, considerando como variables: tipo de surfactante (no iónico – anfotérico), porcentaje de agua (20 – 40 % v/v), voltaje aplicado (1 – 2 kV) y tiempo de residencia (60 - 120 s); el diseño experimental implicó la realización de 16 experiencias, las cuales se presentan en la Tabla I.

TABLA I
EXPERIENCIAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Nº	Surfactante	Porcentaje de agua (%)	Voltaje (kV)	Tiempo (s)
1	No iónico	20	1	60
2	No iónico	40	1	60
3	No iónico	20	2	60
4	No iónico	40	2	60
5	No iónico	20	1	120
6	No iónico	40	1	120
7	No iónico	20	2	120
8	No iónico	40	2	120
9	Anfotérico	20	1	60
10	Anfotérico	40	1	60
11	Anfotérico	20	2	60
12	Anfotérico	40	2	60
13	Anfotérico	20	1	120
14	Anfotérico	40	1	120
15	Anfotérico	20	2	120
16	Anfotérico	40	2	120

Como variable respuesta se determinó el Factor de Desestabilización Global (FDG) [16].

Ello implicó el uso del programa Paint y del software ImageJ® con el fin de realizar el conteo de gotas, determinar su área y diámetro. Por último, se obtuvo la distribución de gotas y distribución acumulada de gotas para cada una de las experiencias. Con la distribución acumulada de gotas (antes y después del tratamiento) se obtuvo el FDG de cada experiencia, escogiendo aquellas que produjeran una mayor desestabilización para cada emulsión.

III. RESULTADOS

A. Formulación de emulsiones W/O

La formulación de las emulsiones consideró:
 Fase oleosa: parafina (80 – 60 %).
 Fase acuosa: agua destilada (20 – 40 %)
 Surfactante no iónico: Span 80 (2% p/p).
 Surfactante anfotérico: Lecitina de soya (2% p/p).

Co-surfactante: 1-pentanol, 1-butanol.

Se verificó la estabilidad de las emulsiones W/O formuladas, al centrifugar una muestra y no obtener separación de fases.

B. Caracterización de las emulsiones W/O

Una vez realizadas las emulsiones se procedió a realizar la prueba de dilución en fase acuosa (ver Fig. 2).

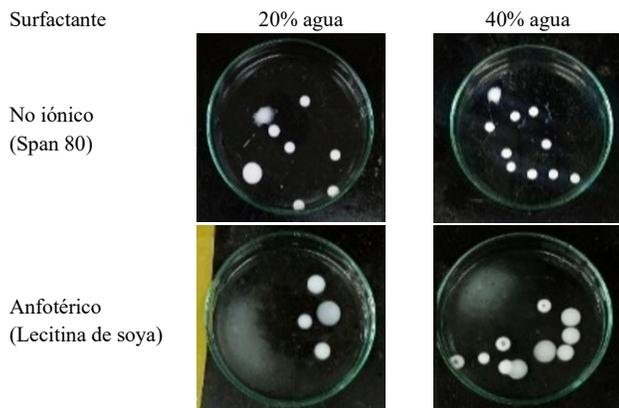


Fig. 2 Prueba de dilución con agua destilada para las distintas emulsiones.

Se puede observar que todas las emulsiones formuladas son del tipo W/O, ya que no se dispersan al colocar una gota de emulsión en el agua.

Con respecto a las emulsiones formuladas con el surfactante no iónico, se puede expresar mediante la ecuación de HLD que se trata de una emulsión W/O ya que su valor HLD es de 4,55 tanto para la emulsión con 20% como con 40% de agua.

Los resultados con relación a la densidad aparente se presentan en la Tabla II

TABLA II
DENSIDAD APARENTE DE LAS EMULSIONES

Tipo de surfactante	Fracción de agua	Densidad (g/ml) a 25°C
Surfactante no iónico (Span 80®)	0,20	0,85
	0,40	0,89
Surfactante anfotérico (Lecitina de soja)	0,20	0,82
	0,40	0,86

Se puede evidenciar que, al agregar mayor cantidad de agua a la formulación, las emulsiones aumentan su densidad debido a que el agua es más densa que la parafina. Cabe destacar que de las emulsiones formuladas con Span 80® (no iónico) y con Lecitina de soja (anfotérico) se obtuvo densidades que están en el rango entre la densidad de la parafina y la del agua, lo cual era esperado.

La viscosidad aparente de las emulsiones formuladas se reportó según la tasa de corte aplicada, donde se trabajó con cuatro velocidades distintas (3, 6, 12, 30 rpm); en la Tabla III se observan la tasa de corte y el valor de viscosidad obtenida.

TABLA III
VISCOSIDAD APARENTE DE LAS EMULSIONES W/O.

Tasa de corte (ciclo/s)	Viscosidad dinámica (cP)			
	No iónico		Anfotérico	
	20%	40%	20%	40%
0,10	683	1.958	111	158
0,20	437	1.200	87	100
0,50	258	655	65	62
1,00	180	430	57	45

Se puede observar que las emulsiones formuladas tienen un comportamiento no-newtoniano, debido a que disminuyen su viscosidad al aumentar la tasa de corte.

De igual forma se observa que a mayor cantidad de agua emulsionada aumenta la viscosidad (ver Fig. 3), esto se atribuye al incremento en la concentración de la fase dispersa, por lo que al aumentar el número y tamaño de las gotas ocasiona una resistencia de flujo hacia los espacios libres, originando que el movimiento hacia esos espacios sea menor [18].

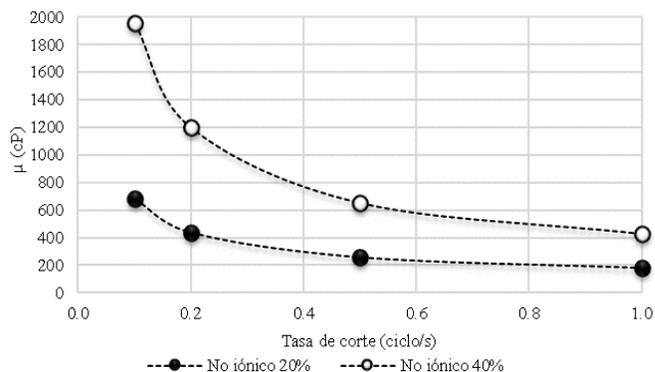


Fig. 3 Viscosidad de emulsiones con surfactante no iónico a distintos porcentajes de agua.

En cuanto a la distribución de tamaños de gotas, en la Fig. 4, se presenta la distribución normal de los tamaños de gota en las emulsiones con surfactante no iónico y anfotérico.

En las emulsiones formuladas con surfactante no iónico (Fig. 4.a) se puede observar que el tamaño de las gotas promedio está comprendido entre 2 y 3 micras; el mismo comportamiento se puede observar para el surfactante anfotérico (Fig. 4.b).

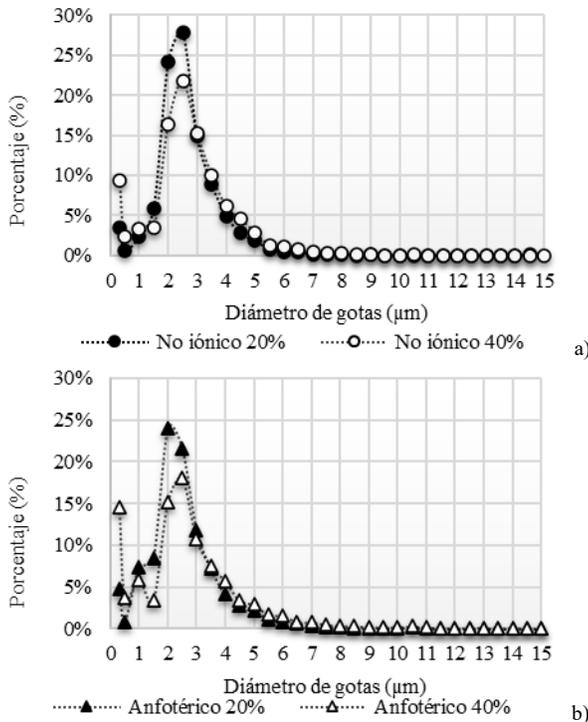


Fig. 4 Distribución de tamaño de gotas de las emulsiones formuladas a) surfactante no iónico. b) surfactante anfotérico.

Las imágenes de la Fig. 5 fueron tomadas del microscopio óptico empleando un objetivo de 20X y presentan las muestras iniciales (antes del tratamiento eléctrico) de las emulsiones W/O formuladas con el surfactante no iónico (Span 80®) y con el surfactante anfotérico (Lecitina de soja), para los distintos porcentajes de agua considerados (20 – 40%).

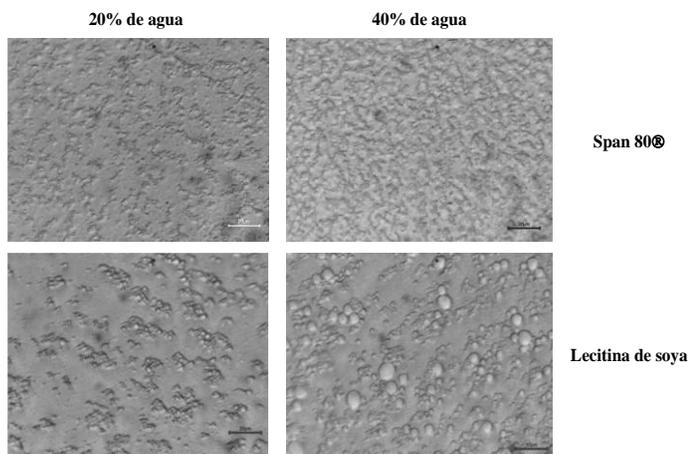


Fig. 5 Distribución de tamaño de gotas de las emulsiones formuladas con los distintos surfactantes y diferentes proporciones de agua.

Se aprecia que para las emulsiones con 40% de agua, el tamaño de las gotas es mayor que para las emulsiones con 20% de agua; sin embargo, entre el mismo contenido de agua,

son mayores los tamaños de gota de la emulsión elaborada con el surfactante anfotérico.

C. Desestabilización de la emulsión W/O con campo eléctrico

Se aplicó tratamiento desestabilizador con campo eléctrico a las emulsiones W/O, variando voltaje, tiempo de residencia, contenido de agua y tipo de surfactante. Fue posible observar los fenómenos de floculación y coalescencia de las gotas de agua, evidenciados en las imágenes antes y después de aplicar el campo eléctrico, así como en videos realizados al momento de aplicar el tratamiento. Para las emulsiones W/O formuladas con surfactante no iónico (Span 80®) y 20% de agua, el efecto de aplicar el tratamiento eléctrico en las experiencias 1 y 3 se puede apreciar en las imágenes que se muestran en la Fig. 6.

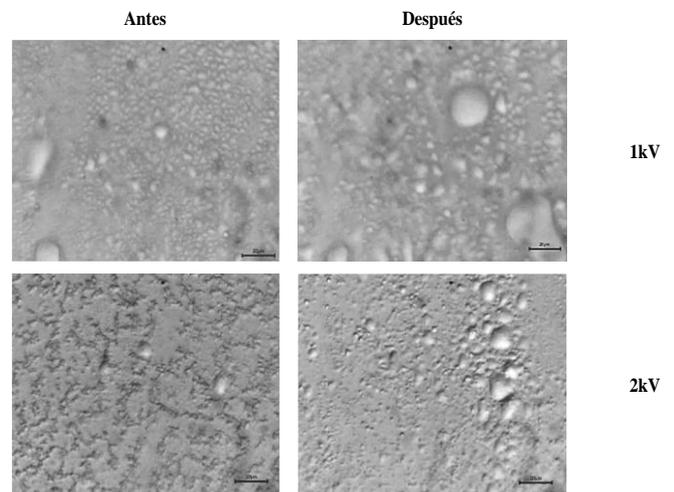


Fig. 6 Tratamiento eléctrico en experiencias 1 y 3.

En ambos casos se puede observar el aumento del tamaño de las gotas al aplicar el campo eléctrico (1kV - 2kV), también se aprecia que luego del tratamiento hay presencia de gotas pequeñas sin coalescer.

A simple vista se observa que aparentemente se presentó mayor coalescencia en la muestra tratada con 1kV; sin embargo, esta muestra inicial tenía gotas más grandes. Por lo tanto, la mejor manera de comparar el efecto del tratamiento eléctrico es a través de la determinación del FDG.

Para la emulsión formulada con surfactante no iónico y 40% de agua (1 kV, 60 s – experiencia 2) también se observa coalescencia, como se aprecia en la Fig. 7; se puede observar que las gotas se alinean hacia la dirección norte del portaobjeto, con una leve inclinación hacia el ánodo, este comportamiento fue común para las emulsiones con surfactantes no iónicos (20 y 40 % agua).

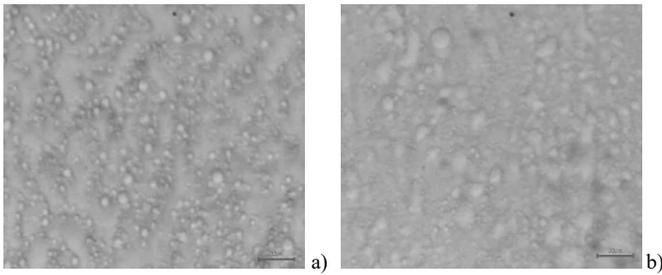


Fig. 7 Tratamiento eléctrico en experiencia 2. a) antes y b) después.

La formación de canales de agua se observó con más frecuencia en la emulsión formulada con 40% de agua (ver Fig. 8).

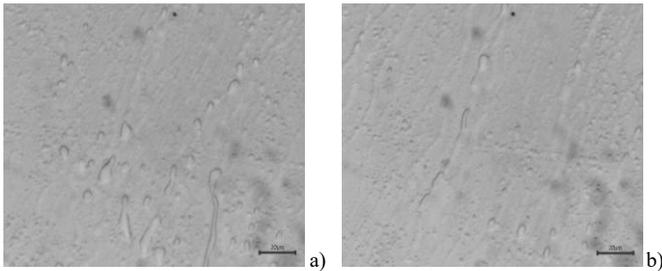


Fig. 8 Formación de canales en tratamiento eléctrico en experiencia 2. a) captura a los 22 s y b) captura a los 24 s.

En relación con el tratamiento eléctrico aplicado a las emulsiones W/O formuladas con Lecitina de soya (anfotérico) y 20% de agua, se evidenció un comportamiento similar en cuanto a la coalescencia de gotas. En la Figura 9, se pueden observar imágenes antes y después de aplicar campo eléctrico a estas emulsiones.

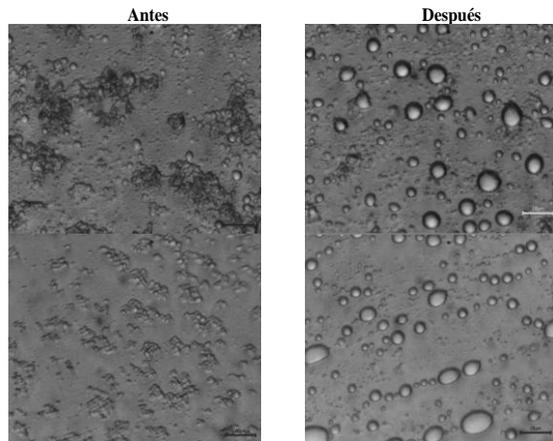


Fig. 9 Tratamiento eléctrico en experiencias 9 y 11.

Mientras que la emulsión formulada con el surfactante anfotérico (Lecitina de soya) y 40% de agua presentó un comportamiento similar, e incluso con mayor

desestabilización que la de 20% de agua, presentando la formación de canales de forma más evidente. En la Fig. 10 se observa la formación de canales en esta emulsión al aplicar campo eléctrico.

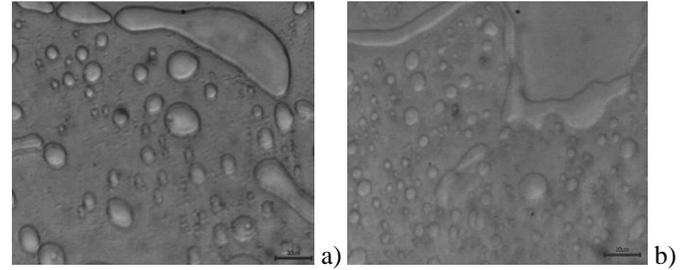


Fig. 10 Formación de canales en tratamiento eléctrico en a) experiencia 10. b) experiencia 14.

Un aspecto a resaltar es el hecho de que los canales de agua y la orientación de las gotas de agua al aplicar el tratamiento eléctrico en las emulsiones formuladas con surfactante anfotérico, presentaron direcciones distintas a las formuladas con surfactante no iónico; para las emulsiones con surfactante anfotérico los canales se formaron de manera horizontal, y las gotas se movían parcialmente en dirección hacia el cátodo, y otras veces hacia el ánodo, pero con mayor intensidad hacia este último.

Se realizó la distribución acumulada de gotas de cada una de las experiencias de aplicación del campo eléctrico. En la Fig. 11, se presenta la distribución acumulada de gotas, para la experiencia 8 (antes y después de aplicado el tratamiento).

Para todas las experiencias se determinó tanto el tamaño de gotas más pequeño como el más grande y se obtuvo el FDG [16].

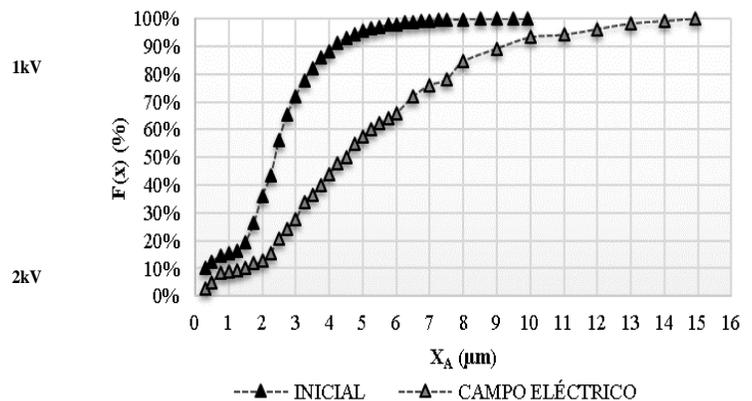


Fig. 11 Distribución acumulada de gotas inicial y después de aplicado el campo eléctrico en la experiencia 8.

Se puede observar que para la experiencia 8 antes del tratamiento, el x_{\min}° es de 0,30 μm y el x_{\max}° es de 10,00 μm ; mientras que luego de aplicado el tratamiento eléctrico, el x_{\min} es de 0,32 μm y el x_{\max} es de 15,00 μm . Esto denota que se presenta un aumento en el tamaño de las gotas una vez aplicado el campo eléctrico, haciendo en consecuencia que la curva de distribución acumulada se desplace hacia la derecha, siendo más evidente el cambio para tamaños de gota mayores a 1 μm .

Las distribuciones de gotas (antes y después del tratamiento) determinadas a cada experiencia, presentaron un comportamiento semejante al presentado en la Fig. 11, aunque la curva de la distribución acumulada luego del campo eléctrico en algunos casos está más cercana a la curva de la muestra inicial, por lo que el FDG es menor.

En la Fig. 12 se presenta el comportamiento del FDG para cada emulsión formulada con surfactante (no iónico y anfotérico), porcentaje de agua (20 y 40%), donde se aplicó el tratamiento eléctrico para voltaje (1-2 kV) y tiempo de residencia (60-120 s), variables empleadas en el Diseño experimental Factorial 2ⁿ.

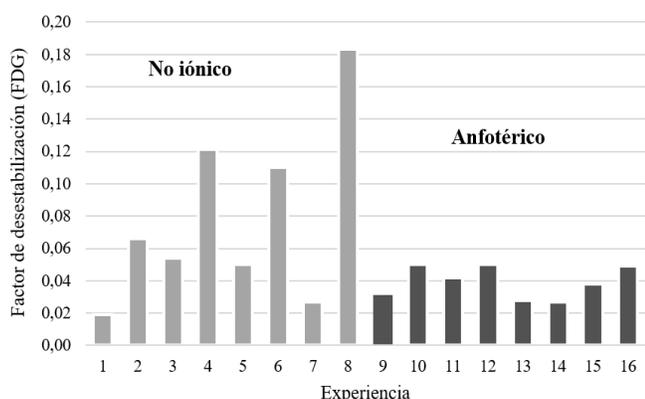


Fig. 12 Factor de desestabilización global (FDG) para las distintas experiencias del Diseño experimental Factorial 2ⁿ.

Se puede observar que el FDG es mayor a 0 para todas las experiencias, siendo mayor para el caso de las emulsiones W/O formuladas con surfactante no iónico con un porcentaje de agua de agua de 20 y 40%, aplicación de 2 kV por un tiempo de 120 s, donde el valor del FDG para estos casos fue de 0,121 y 0,183 respectivamente.

En el caso de la emulsión con 40% de agua, el resultado del FDG es quizás el comportamiento esperado, ya que es más fácil lograr la desestabilización de la emulsión cuando las gotas están más cercanas entre sí, condición que se da a mayor contenido de agua; sin embargo, este comportamiento no se observó en las emulsiones formuladas con surfactante anfotérico con 40% de agua (FDG menor), esto quizás se deba a una mayor interacción entre

característica de los surfactantes iónicos y el sistema lo cual dificulta la desestabilización de la emulsión W/O.

Por ende, se puede concluir, que en este estudio el surfactante anfotérico (Lecitina de soya) presenta mayor resistencia a la desestabilización de emulsiones cuando se aplica campo eléctrico que el surfactante no iónico (Span 80); en función a esto, es conveniente realizar la experiencia con otros surfactantes (no iónicos y anfotéricos), para verificar si es un comportamiento generalizado.

IV. CONCLUSIONES

La aplicación del tratamiento eléctrico a las emulsiones formuladas evidencia la floculación de gotas, formación de canales de agua y coalescencia de las gotas, siendo más evidente el efecto en las emulsiones con 40% de fase acuosa.

El FDG indica que las mejores condiciones para la desestabilización de emulsiones W/O estables, considerando las variables en estudio, son 40% de agua emulsionada, surfactante no iónico, 2 kV y 120 s de aplicación de campo eléctrico, obteniendo un FDG de 0,183.

Las emulsiones con surfactante anfotérico (Lecitina de soya) se desestabilizan menos ante el tratamiento con campo eléctrico que las emulsiones con surfactante no iónico (Span 80®), con lo que se evidencia la diferencia en el efecto desestabilizador según el tipo de surfactante presente en la emulsión. En la industria petrolera los surfactantes naturales como los asfaltenos son considerados como no iónicos, por lo que la aplicación de campo eléctrico es una tecnología aplicable para mejorar la eficacia en la separación de fases agua-crudo.

A mayor proporción de la fase dispersa, mayor el tamaño de gota promedio y más amplia la distribución de tamaño de gotas, por lo que mayor es la desestabilización alcanzada por el tratamiento eléctrico, observando un comportamiento distinto en la coalescencia de las gotas en función del surfactante.

REFERENCIAS

- [1] SALAGER, J. L. (1999a). Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte A. Cuaderno FIRP 747-A. Introducción y Conceptos de Formulación Físico-química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- [2] PNUD. (2021). LOS ODS EN ACCIÓN. PNUD. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- [3] GUERRA Y. (2006). Desarrollo de un protocolo para la preparación de emulsiones estables y reproducibles de agua en aceite. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Química, Caracas.

- [4] HIDALGO Y MONCADA (2008). Estudio de la influencia de las características del surfactante en la electrocoalescencia de emulsiones de agua en aceite. Tesis de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, Caracas.
- [5] MARFISI S. (2005). Estabilidad de emulsiones relacionada con el proceso de deshidratación de crudos. Mérida-Venezuela: Universidad de Los Andes.
- [6] SALAGER J. (2002) Surfactantes, Tipos y Usos. Revista de investigación, Versión #2. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos- Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- [7] SALAGER J, ANTON R, ANDEREZ J, AUBRY J.M. (2015) Formulación de microemulsiones por el Método del HLD. Revista de investigación, Versión #2. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos- Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- [8] DAVIES J. T. (1957) "A quantitative kinetic theory of emulsion type. I. Physical chemistry of emulsifying agent" 2nd International Congress Surface Activity. Butterworth, London.
- [9] SALAGER J. (2004) Surfactantes, III. Surfactantes aniónicos. Revista de investigación. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos- Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- [10] SALAGER J. (2009) Cuidados a tomar para estimar los parámetros de la expresión $HLD=SAD/RT$. Revista de investigación, Versión #2. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos- Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- [11] REBOLLEDO, M. (2007) Estudio del efecto de sólidos en la estabilidad de una emulsión de agua en aceite bajo un campo eléctrico DC. Tesis de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, Caracas.
- [12] LESS S., HANNISDAL A., BJØRKLUND E., SJÖBLOM J. (2008). Electrostatic destabilization of water-in-crude oil emulsions: Application to a real case and evaluation of the Aibel VIEC technology. Elsevier. Fuel. N° 87. Pág. 2572-2581.
- [13] GÓMEZ B. (2012). Desestabilización electrostática continua del material de la fosa de producción Guara-2. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- [14] MONTGOMERY, D Y RUNGER, G. (1996). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw-Hill Interamericana Editores. 1era edición. México.
- [15] SORRENTINO J. (2002) Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics. Tesis Doctoral Karlsruhe University, Karlsruhe-Alemania. Editorial: Shaker Verlag.
- [16] RODRÍGUEZ M., GONCALVES F., SORRENTINO J. (2024) "EMULSIONES W/O: FACTOR DE DESESTABILIZACIÓN" 2ISBN: 978-628-95207-8-1. ISSN: 2414-6390. DIGITAL OBJECT IDENTIFIER: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1838.
- [17] MARÍN J. (2016). Evaluación de la estabilidad de emulsiones formuladas a partir de emulsionantes naturales. Tesis de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, Caracas.
- [18] KUMAR, A., & HARTLAND, S. (1985). Gravity settling in liquid/liquid dispersions. The Canadian Journal of Chemical Engineering. Department of Chemical Engineering and Industrial Chemistry, Swiss Federal Institute of Technology, CH-8092 Zurich, Switzerland