

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FASES DE SISTEMAS
AGUA/NANOPARTÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA/SURFACTANTE
ANIÓNICO/ACEITE**

**CAMILA ARCE PEÑA
KENYA SILVANA ZAMORA ROBAYO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2018**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FASES DE SISTEMAS
AGUA/NANOPARTÍCULA DE SÍLICE/FUNCIONALIZADA/SURFACTANTE
ANIÓNICO/ACEITE**

CAMILA ARCE PEÑA

KENYA SILVANA ZAMORA ROBAYO

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Química

Director:

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Ingeniero de Procesos y Productos, Dr.

Codirectores:

Julio Andrés Pedraza Avella

Químico, Dr.

Juliana Carolina Vidal Prada

Ingeniera Química, Mg.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Química de Producción del Instituto Colombiano del Petróleo (ECOPETROL – ICP), bajo el Acuerdo de Cooperación No. 17 dentro del Convenio Marco de Cooperación Tecnológica y Científica No 5222395, suscrito entre ECOPETROL y la Universidad Industrial de Santander UIS.

A Dios por guiarme, protegerme y bendecirme en cada camino y decisión.

A mis padres y mi hermana por ser mi mayor ejemplo, por el apoyo incondicional, por motivar mi formación, por brindarme la oportunidad de poder culminar una etapa más en mi vida personal y profesional.

A mi futuro compañero de vida, por aguantarme, por apoyarme, por hacerme reír en los peores momentos y a su familia por acogerme.

A mis familiares y amigos, que de alguna forma hicieron parte este logro.

Al director de este proyecto, Ronald Mercado, por su colaboración, tiempo y enseñanzas.

A nuestra codirectora Juliana Vidal, por su dedicación, paciencia, entrega, por ser una guía y nuestra amiga.

A nuestro codirector Julio Pedraza, por su dirección y por brindarnos la confianza para llevar a cabo este proyecto.

A mi amiga y compañera de tesis, por darnos mutuamente apoyo, por los altos y bajos, por todas las experiencias que pasamos para llegar a culminar este logro.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química y a sus profesores por impartir los conocimientos y ser parte de nuestra formación profesional.

Al convenio UIS – ICP por permitir el desarrollo de este proyecto en la Laboratorio de Química de producción y a sus trabajadores por estar siempre dispuestos a enseñar y ayudar.

Camila Arce Peña

Agradezco infinitamente a Dios, a la vida, al universo y a mi familia que me han apoyado en todo este proceso de crecimiento personal y profesional.

A mi madre que le debo TODO, gracias por ser mi amiga incondicional y héroe. Es la mamá que siempre soñé tener.

Le doy mil gracias al mejor director el profesor Ronald Mercado por su paciencia, dedicación y amabilidad. Al profesor Julio Pedraza por haber destinado su confianza en nosotras haciendo que hiciéramos parte del grupo de investigación de recobro mejorado (GRM) y el de fenómenos interfaciales, reológicos y simulación de transporte (FIRST), por ende, optar este trabajo de investigación y poder direccionarlo hacia el éxito.

A nuestra amiga codirectora Juliana Vidal que nos apoyó rotundamente durante el transcurso de la investigación y experimentación, GRACIAS.

Quiero agradecer a mi compañera de tesis por enseñarme a crecer como persona y a vivir al límite cada segundo de vida. A Daniela Ríos por empezar esta aventura ingenieril junto a nosotras. Por último, a mi mejor amiga Luisa Ospina que siempre, siempre estuvo ahí para darme consejos, alentarme y motivarme a que todo se puede lograr siendo disciplinado y apasionado.

Kenya Silvana Zamora Robayo

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	18
1.1 SURFACTANTE ANIÓNICO	18
1.2 COMPORTAMIENTO DE FASES EN UNA FORMULACIÓN DE SISTEMAS AGUA/SURFACTANTE/ACEITE	18
1.2.1 Relación R de Winsor.....	19
1.2.2 Desviación hidrofílica-lipofílica (HLD)	20
1.2.3 Barridos de formulación.....	20
1.2.4 Formulación óptima	21
1.3 NANOPARTÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA.....	22
1.3.1 Nanofluidos.....	23
2 OBJETIVOS	24
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3 MATERIALES Y METODOLOGÍA	25
3.1 MATERIALES.....	25
3.2 EQUIPOS	25
3.3 MÉTODOS	26
3.3.1 Barridos de salinidad de los sistemas agua/surfactante/aceite.	26

3.3.2 Preparación de nanofluidos con nanopartícula de sílice funcionalizada en fase acuosa	28
3.3.3 Barrido de salinidad de los sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite a distintas concentraciones de nanopartícula	29
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FASES DE SISTEMA AGUA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE MEDIANTE UN BARRIDO DE SALINIDAD.....	30
4.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA MODELO A PARTIR DE LA HOMOGENEIDAD DEL NANOFLUIDO	33
4.3 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FASES DE SISTEMAS AGUA/NANOPATÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA/ SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE	33
4.4 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS (1) AGUA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE Y (2) AGUA/NANOPARTÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE.....	36
5 CONCLUSIONES.....	40
6 RECOMENDACIONES	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	52

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz experimental para la selección del sistema modelo (agua/surfactante aniónico/aceite).....	27
Tabla 2. Nanofluidos a concentración fija de nanopartícula y con el óptimo de NaCl observado en el barrido de salinidad del sistema 1 y 2	28
Tabla 3. Matriz experimental de barridos de salinidad de sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite a distintas concentraciones de nanopartícula.	29

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación R de Winsor y comportamiento de fases de un sistema agua/surfactante/aceite.....	19
Figura 2. Protocolo experimental.	26
Figura 3. Comportamiento de fases del sistema 1.	30
Figura 4 Comportamiento de fases del sistema 2, mediante un barrido de salinidad.	31
Figura 5. Mapas bidimensionales de comportamiento de fases del sistema agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite, mediante un barrido bidimensional de salinidad y concentración de nanopartícula. (a) sistema con nanopartícula hidrófila A300. (b) sistema con nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S.....	34
Figura 6. Volumen de microemulsión vs. concentración de salinidad de los sistemas con y sin nanopartícula. (a) sistema con y sin nanopartícula hidrófila A300. (b) sistema con y sin nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S.	36
Figura 7. Concentración de nanopartícula vs. salinidad óptima de los sistemas con y sin nanopartícula (a) sistema con y sin nanopartícula hidrófila A300. (b) sistema con y sin nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S.	38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Nanofluidos preparados con las nanopartículas de sílice funcionalizada en fase acuosa para el sistema 1 y sistema 2.	52
Anexo B. Experimentación de comportamiento de fases mediante un barrido bidimensional de concentración de nanopartícula y concentración de NaCl del sistema agua/nanopartícula de sílice hidrófila (A300) / surfactante SDBS /aceite..	53
Anexo C. Comportamiento de fases mediante un barrido bidimensional de concentración de nanopartícula y concentración de NaCl del sistema agua/nanopartícula de sílice parcialmente hidrófila (AR812S)/surfactante SDBS/aceite.	55
Anexo D. Radios de solubilización en función de la concentración de nanopartícula a diferente salinidad.	57

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FASES DE SISTEMAS AGUA/NANOPARTÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE*

AUTOR: CAMILA ARCE PEÑA, KENYA SILVANA ZAMORA ROBAYO**

PALABRAS CLAVES: Nanopartículas, Surfactante, Comportamiento de fases.

DESCRIPCIÓN:

La recuperación mejorada de petróleo emplea métodos para recuperar el aceite que no puede ser producido por medios tradicionales, por ende, la inyección de surfactante como método de recobro químico es una alternativa que ayuda al desplazamiento del petróleo residual.

Los surfactantes poseen una estructura polar y apolar haciendo que tenga doble afinidad por las fases agua/aceite, estas sustancias influyen en la disminución de la tensión interfacial y en el comportamiento de fases de sistemas agua/surfactante/aceite. Sin embargo, estos presentan inconvenientes relacionados con la adsorción en la roca del yacimiento, ocasionando pérdidas de este y a su vez elevados costos.

Varios estudios han demostrado que el uso de surfactantes con nanopartículas mejora el rendimiento de sistemas agua/surfactante/aceite, obteniendo bajas tensiones interfaciales y una disminución de la adsorción en la roca. Pero, no se ha demostrado resultados de comportamiento de fases, lo cual es un factor importante para la interpretación del rendimiento de estos sistemas mediante la obtención de volúmenes de microemulsión.

En este trabajo se evaluó el comportamiento de fases en sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite para observar la interacción de las nanopartículas hidrófilas y parcialmente hidrófobas, a través de barridos bidimensionales de concentración de NaCl y nanopartícula. Los sistemas con y sin nanopartícula presentan una transición de comportamiento de fases Winsor I→III→II a medida que aumenta la salinidad. La obtención del volumen de microemulsión en Winsor III demuestra la interacción de la nanopartícula en la interfase. Sin embargo, el efecto de la interacción de la nanopartícula no es muy fuerte y por tanto no se obtiene volúmenes de microemulsión superiores comparado con el sistema sin nanopartícula. En definitiva, la nanopartícula A300 y AR812S modifican la formulación del sistema agua/SDBS/1-pentanol/n-heptano. El desplazamiento del comportamiento de fases y en especial de la región Winsor III, depende del tipo, de su concentración y de la solubilidad de nanopartícula en el sistema.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Ingeniero Químico Dr. Codirectores: Julio Andrés Pedraza Avella, Ingeniero Químico/Químico Dr. y Juliana Carolina Vidal Prada, Ingeniera Química Mg.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF PHASE BEHAVIOR FOR SYSTEM WATER/ FUNCTIONALIZED SILICA NANOPARTICLE/ANIONIC SURFACTANT/OIL*

AUTHORS: CAMILA ARCE PEÑA, KENYA SILVANA ZAMORA ROBAYO**

KEYWORDS: Nanoparticles, surfactant, microemulsion, Behavior of phases.

DESCRIPTION:

Enhanced oil recovery means methods to recover the oil that can not be produced by traditional means, therefore, the injection of surfactant as a chemical recovery method is an alternative that helps the displacement of residual oil.

The surfactants have a polar and apolar structure that makes double affinity for the water / oil phases, these substances influence the decrease of the interfacial tension and the behavior of the phases of the water/surfactant/oil systems. However, these have drawbacks related to the adsorption in the reservoir rock, causing losses of surfactant and at the same time high costs.

Several studies have shown that the use of surfactants with nanoparticles improves the performance of the water/surfactant/oil systems, obtaining low interfacial tensions and a decrease in adsorption in the rock. But, there are no results of phase behavior, which is an important factor for the interpretation of the performance of these systems by obtaining microemulsion volumes.

In this work the behavior of the phases in water/nanoparticle of silica functionalized/anionic surfactant/oil systems is evaluated to observe the interaction of the hydrophilic and partially hydrophobic nanoparticles, through two-dimensional scans of NaCl and nanoparticle concentration. Systems with and without nanoparticles present a transition of Winsor I→III→II behavior as salinity increases. Obtaining the volume of microemulsion in Winsor III demonstrates the interaction of the nanoparticle in the interface. However, the interaction effect of the nanoparticle is not very strong and therefore a microemulsion greater than the nanoparticle system can not be obtained. Definitely, the nanoparticles A300 and AR812S, modify the formulation of the system composed by water/SDBS/1-pentanol/n-heptane. The displacement of the phase behavior and especially of the Winsor III region depends on the type, its concentration and the nanoparticle solubility in the system.

*Graduate Project thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. University Industrial of Santander. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Chemical Engineer Ph.D. Codirectors: Julio Andrés Pedraza Avella, Chemical Engineer/Chemical Ph.D. and Juliana Carolina Vidal Prada, Chemical Engineer M.Sc.

INTRODUCCIÓN

El petróleo es el 33,3 % de los recursos energéticos del mundo, en comparación con otras energías alternativas [1], y otra parte es destinado a la utilización en la industria petroquímica (plásticos, detergentes, fertilizantes, productos farmacéuticos, entre otros) [2]. La disponibilidad del petróleo depende de convertir los recursos en reservas, es decir, el volumen de crudo que no ha sido recuperado por las dificultades técnicas para su extracción, en volúmenes que ya están definidos para su comercialización [3]. Por lo tanto, el reto está en aplicar soluciones tecnológicas para aprovechar los recursos y así aumentar la obtención del petróleo.

En Colombia, hubo una producción de petróleo equivalente a 1659 millones de barriles, dando como resultado una vida media de reservas de 7,1 años, para el año 2017. Sin embargo, Colombia sigue teniendo uno de los factores de recobro más bajos del mundo (de 18% a 20%, siendo 35% de promedio en el mundo), a pesar de esto, en los campos productores de Colombia se invierte y se implementa en procesos de recuperación para garantizar incrementos en la producción [4] [5].

Los procesos de recuperación de petróleo se dividen en primaria, secundaria y terciaria. La producción primaria es el resultado de la extracción por medio de la energía que naturalmente existe en un yacimiento. Los procesos de extracción secundaria se realizan por medio de la inyección de agua e inyección de gas [6]. Por último, los procesos de recuperación terciaria o recobro mejorado de petróleo (EOR, *Enhanced Oil Recovery*) se clasifican de manera general como procesos térmicos, químicos, miscibles y otros [7]. En el proceso químico se encuentra la inyección de un fluido (polímero, álcali, surfactante) que modifique las características y/o propiedades del yacimiento y/o del petróleo, esta sustancia interactúa con el sistema roca/crudo, dando como resultado menor tensión interfacial (TIF), reducción de la viscosidad del crudo y modificación de la

mojabilidad de la roca [6], el cual contribuye con el desplazamiento del petróleo residual incrementando la producción.

La inyección de surfactante como proceso químico, busca desplazar el petróleo residual que está atrapado en los poros del yacimiento por fuerzas superficiales e interfaciales, reduciendo la TIF [8]. Sin embargo, posee alta adsorción en el medio poroso haciendo que una cantidad de surfactante se pierda [9], para minimizar este problema se ha propuesto combinar surfactantes con nanopartículas, pues el surfactante podría adsorberse en la superficie de la nanopartícula y no en el medio poroso. Varios estudios han evidenciado la sinergia existente entre los surfactantes y las nanopartículas [10], como lo expuso Chegenizadeh, Saeedi, y Quan, lo cual, mostraron un alto potencial debido a su resistencia a la adsorción sobre la superficie de la roca, la termoestabilidad y reducción de la TIF a valores ultra bajos [11].

Las nanopartículas de sílice se caracterizan por poseer propiedades que ayudan a la recuperación mejorada de petróleo, como su tamaño, entre 1-100 ηm , que les permite penetrar en los poros del yacimiento, donde otras sustancias utilizadas por métodos tradicionales no pueden; alta área superficial, la cual permite acumular grandes cantidades de carga [11]; adicionalmente, pueden permanecer como estabilizadores a altas temperaturas [10], reducen la TIF, disminuyen la adsorción del fluido en medio poroso y son biodegradables (comparado con otras sustancias químicas) [6].

En el presente trabajo de investigación, la metodología experimental empleada estuvo orientada en el desarrollo de la evaluación del comportamiento de fases, cuando se adiciona nanopartícula de sílice funcionalizada hidrófila y parcialmente hidrófoba en sistemas agua/surfactante aniónico/aceite, permitiendo evidenciar la localización de la formulación óptima de los sistemas, mediante barridos de formulación bidimensional.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1 SURFACTANTE ANIÓNICO

En la recuperación mejorada de petróleo, uno de los factores de diseño más importantes para el método de recobro químico, es seleccionar una formulación de agente surfactante apropiado capaz de movilizar crudo sin pérdidas significativas de surfactante, debido a la adsorción y separación de fases en el yacimiento [12]. Los surfactantes aniónicos son los más abundantes y de bajo costo, por lo tanto, son ampliamente utilizados en la industria petrolera. Poseen una estructura polar y apolar, por tal razón se encuentran adsorbiéndose en la interfase agua/aceite disminuyendo la TIF [8].

Por otro lado, una propiedad característica de los surfactantes es el parámetro balance hidrofílico-lipofílico (HLB), el cual es un número que representa su solubilidad en la mezcla de componentes. Cuando los valores de HLB son bajos ($HLB < 10$), la tendencia del surfactante es lipófila o son liposolubles y cuando el HLB es alto ($HLB > 10$) su tendencia es hidrófila o son hidrosolubles [13].

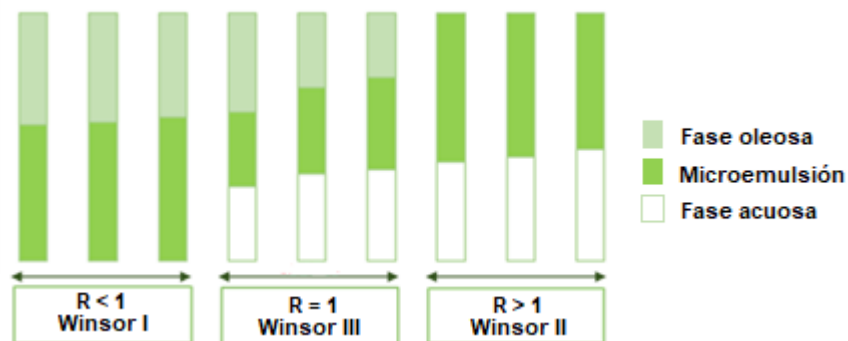
1.2 COMPORTAMIENTO DE FASES EN UNA FORMULACIÓN DE SISTEMAS AGUA/SURFACTANTE/ACEITE

El comportamiento de fases es una descripción cualitativa o cuantitativa del número de fases que presenta un sistema en equilibrio, y a su vez depende de las variables físicas, de composición y de naturaleza química de los componentes del sistema [7] [14].

1.2.1 Relación R de Winsor

En 1954, Winsor estableció que el comportamiento de fases de sistemas agua/surfactante/aceite están en función de la relación R de Winsor que depende de las interacciones del surfactante con el agua y el aceite. La relación R describe cualitativamente el tipo de microemulsión que se obtiene, por consiguiente, si R es inferior, igual o superior a la unidad se obtiene un comportamiento de fases característico. Cuando $R < 1$ o Winsor I, la afinidad del surfactante por la fase acuosa, es mayor que su afinidad por la fase oleosa y se caracteriza por estar en equilibrio la microemulsión acuosa con la fase oleosa en exceso. $R = 1$ o Winsor III, la afinidad del surfactante por la fase acuosa y oleosa son iguales, presentando un comportamiento de fases trifásico, donde la fase intermedia es llamada fase bicontinua (microemulsión). Finalmente, en $R > 1$ o Winsor II, la afinidad del surfactante por la fase oleosa es mayor que su afinidad por la fase acuosa y se caracteriza por estar en equilibrio la microemulsión oleosa con la fase acuosa en exceso [7]. En la Figura 1 se puede observar la representación del comportamiento de fases.

Figura 1. Relación R de Winsor y comportamiento de fases de un sistema agua/surfactante/aceite.



Fuente: Vidal, 2014 [7].

1.2.2 Desviación hidrofílica-lipofílica (HLD)

El HLD es una descripción cuantitativa de la relación R de Winsor, expresada como una suma de la influencia de todas las variables de formulación en el comportamiento de fases. Es un número adimensional que indica la desviación de la afinidad del surfactante por la fase acuosa y oleosa, con respecto a la formulación óptima. Para los surfactantes aniónicos el HLD es expresado mediante la siguiente ecuación:

$$HLD = \sigma + \ln S - k EACN + t \Delta T + \alpha \quad (1)$$

Donde, σ , k y t son parámetros característicos del surfactante; $\ln S$ es el logaritmo natural de la salinidad en la fase acuosa (% m/m de NaCl); $EACN$, es el número de carbonos del alcano equivalente al aceite; ΔT es la diferencia de temperatura con respecto a la temperatura de referencia (25 °C); α es una constante característica del alcohol y el tipo de surfactante y A es el porcentaje de alcohol eventualmente añadido [7]. La presencia del alcohol contribuye al equilibrio en la interfase agua/aceite, debido a que actúa como co-surfactante [15].

Los términos que disminuyen el valor HLD aumentan la afinidad del surfactante por la fase acuosa (o disminuye la afinidad del surfactante por la fase oleosa) y viceversa. Adicionalmente el valor de $HLD = 0$, corresponde a la formulación óptima [7].

1.2.3 Barridos de formulación

La evaluación del comportamiento de fases de los sistemas ternarios (agua/surfactante/aceite) se desarrolla mediante barridos de formulación unidimensional y/o bidimensional, que producen la transición de Winsor I→III→II o viceversa, mediante la influencia de los parámetros de barrido sobre la afinidad del surfactante por la fase acuosa y la fase oleosa. Esta técnica consiste en preparar

una serie de sistemas idénticos, modificando gradualmente una variable de formulación [16].

1.2.4 Formulación óptima

La formulación óptima es un conjunto de propiedades características que permiten igualar la afinidad del surfactante por la fase acuosa y oleosa; por lo tanto, se presenta la localización de la formulación óptima, cuando la relación R es igual a la unidad, $HLD = 0$ y cuando el comportamiento de fases es Winsor III [7]. En la formulación óptima se alcanza la menor TIF en los sistemas ternarios, contribuyendo con los procesos EOR [12].

La formulación óptima se puede determinar mediante el cálculo del radio de solubilización, a partir de los volúmenes de microemulsión y la fase acuosa o fase oleosa en exceso, observados en los barridos de formulación. El radio de solubilización con respecto a la fase acuosa es RS_W y a la fase oleosa es RS_O que se presentan en la Ecuación (2) y (3), respectivamente:

$$RS_W = \frac{V_w}{V_s} \quad (2)$$

$$RS_O = \frac{V_o}{V_s} \quad (3)$$

Donde V_w y V_o , son los volúmenes de la fase acuosa y oleosa, solubilizados en la microemulsión y V_s es el volumen de surfactante en la microemulsión, sin tener en cuenta la presencia de co-surfactantes. La formulación óptima corresponde cuando $RS_W = RS_O$, o cuando las curvas de estas se intersecan en función de la variable de formulación [7].

1.3 NANOPARTÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA

Las nanopartículas de sílice funcionalizadas son partículas esféricas constituidas por una matriz de sílice con volúmenes de poro de 2-50 ηm . Su humectabilidad está controlada por la extensión del recubrimiento de grupos silanol (más del 90%) en su superficie, atribuyéndoles un carácter hidrofílico que les permite formar emulsiones aceite en agua. Por otro lado, estas nanopartículas pueden poseer un carácter hidrofóbico (parcialmente con un 10% y completamente con un 70% de grupos silanol) cuando se produce la reacción de grupos silanol hidrofílicos con grupos orgánicos, permitiéndoles formar emulsiones aceite en agua [17] [18].

Varios estudios resaltan la aplicabilidad de nanopartículas junto con surfactantes para procesos EOR, como el desarrollado por Zargartalebi, Kharrat y Barati, quienes estudiaron la capacidad de las nanopartículas de sílice hidrófilas y parcialmente hidrófobas para mejorar el rendimiento del surfactante SDS (Dodecil sulfato de sodio) en la recuperación de petróleo, mediante experimentos de inyección, medición de TIF y adsorción. Obtuvieron una disminución en la TIF con la solución de surfactante (2000 ppm) y las dos nanopartículas a concentraciones bajas (1000-2000 ppm). En presencia de nanopartículas hidrófobas a concentraciones de surfactante variable, disminuyó la adsorción. Por último, mediante los experimentos de inyección obtuvieron mayor recuperación de petróleo en presencia de nanopartículas [19].

Huibers, *et al*, estudiaron los cambios en la humectabilidad mediante mediciones de ángulos de contacto en dos superficies de arenisca (Berea y Boise) con nanopartículas de sílice suspendidas en salmuera y una solución combinada de salmuera y surfactante no iónico (Tween®20) a concentraciones de 0, 0,001 y 0,01% m/m de nanopartícula. Obtuvieron que las nanopartículas y el surfactante actúan como un mecanismo eficaz de recubrimiento para alterar y aumentar la

humectabilidad de las areniscas, lo que a su vez indicó ser una combinación prometedora para procesos EOR [20].

Wu, *et al*, realizaron una investigación sobre la adsorción de surfactante aniónico SDS en la roca, bajo la influencia de las nanopartículas de sílice. Los resultados que obtuvieron mostraron que las nanopartículas pueden reducir la adsorción del surfactante de manera efectiva y esto se da a concentraciones de 0,1; 0,2 y 0,3% m/m. Además, mediante pruebas de inyección de soluciones de surfactante/nanopartícula obtuvieron un aumento de 4,68% en la recuperación de petróleo en comparación con la solución sin nanopartícula [21].

1.3.1 Nanofluidos

Choi en 1995, definió los nanofluidos como fluidos con nanopartículas en suspensión, es decir, las nanopartículas son suministradas en la solución de surfactante como polvo seco y son dispersadas hasta alcanzar una suspensión homogénea, la dispersión se lleva a cabo en baños de ultrasonidos, agitadores magnéticos, agitadores de alta cizalla, homogeneizadores, entre otros [22].

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de fases de sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la formulación óptima mediante un barrido de salinidad de sistema agua/surfactante aniónico/aceite y evaluar el comportamiento de fases.
- Determinar la formulación óptima mediante un barrido bidimensional de salinidad y concentración de nanopartícula de sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite y evaluar el comportamiento de fases de los sistemas.
- Comparar los sistemas (1) agua/surfactante aniónico/aceite y (2) agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite.

3 MATERIALES Y METODOLOGÍA

Los materiales y equipos usados para el desarrollo de los objetivos planteados fueron los siguientes:

3.1 MATERIALES

- Nanopartícula de sílice hidrófila EVONIK Aerosil 300, $\geq 99,8\%$ de pureza, 270- 330 m^2/g de área superficial específica [23].
- Nanopartícula de sílice parcialmente hidrófoba, EVONIK Aerosil R812S, $\geq 99,8\%$ de pureza, 195-245 m^2/g de área superficial específica [24].
- Surfactante aniónico Dodecil sulfato de sodio SDS, MERK, $\geq 99,0\%$ de pureza, peso molecular 288,37 g/mol. (HLB=40 [25]).
- Surfactante aniónico Dodecil benceno sulfonato de sodio SDBS, ALDRICH *Chemistry*, 100% de pureza, peso molecular 348,48 g/mol. (HLB=31 [26]).
- n-heptano (C_7H_{16}), J.T Baker, $\geq 99,0\%$ de pureza.
- 1-pentanol o *n-Amyl alcohol* ($\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$), MERK, 98,5% de pureza.
- NaCl, EMSURE, 100 % de pureza, peso molecular 58,44 g/mol.

3.2 EQUIPOS

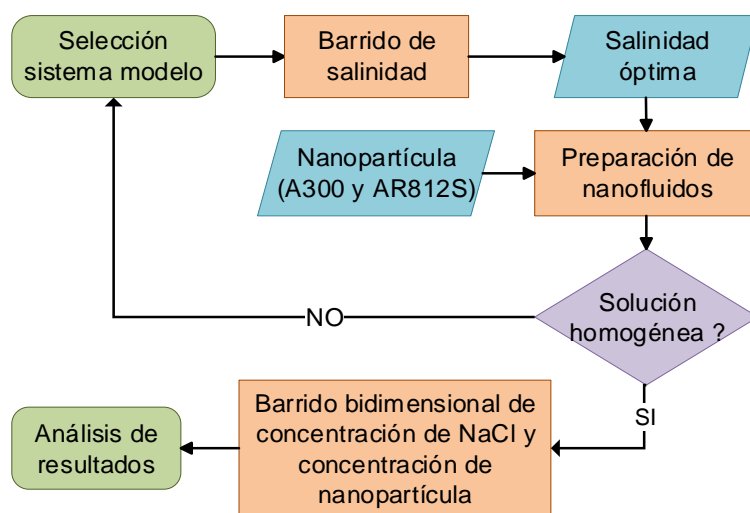
- Agitador magnético, *Multipoint Magnetic Stirrer*, rango 0-2000 rpm.
- Ultrasonido, BRANSON 8800-CPXH 20,8 L; rango de temperatura 0 - 69 ° C.
- Balanza de precisión, OHAUS EX2202, rango de medición 0,01-2200 g.
- Balanza de precisión, *Mettler* AJ150, rango de medición 0,0001-150 g.

- Pipetas de émbolo *Transferpette*, BRAND, rango de medición 10- 100 μ L, 100- 1000 μ L, 0,5-5 mL y 1-10 mL.
- Turbidímetro, HACH 2100 Q, rango de medición 0-1000 NTU, exactitud ± 2 de la lectura.

3.3 MÉTODOS

En la Figura 2, se presenta el protocolo experimental llevado a cabo, para la evaluación del comportamiento de fases de sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite.

Figura 2. Protocolo experimental.



3.3.1 Barridos de salinidad de los sistemas agua/surfactante/aceite.

En la Tabla 1, se presenta la matriz experimental de los sistemas evaluados, los cuales, se seleccionaron a partir de registros experimentales desarrollados en el Laboratorio de Química de Producción del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). La selección de estos sistemas se hizo con el fin de observar la transición de

comportamiento de fases de Winsor y la obtención de la fase bicontinua. La presencia del alcohol lipófilo 1-pentanol como co-surfactante contribuye al equilibrio en la interfase agua/aceite.

Tabla 1. Matriz experimental para la selección del sistema modelo (agua/surfactante aniónico/aceite).

Parámetro	Sistema 1	Sistema 2
Surfactante aniónico (1,0% m/v)	SDS	SDBS
Concentraciones de NaCl (% m/v)	1,0; 2,0; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,8; 4,0; 4,5	0,1; 0,3; 0,35; 0,45; 0,47; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,80; 1,0; 1,5
Concentración de 1-pentanol (% v/v)	5,2	2,0

*Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Agua tipo I, Fase oleosa: n-heptano

*Total de barrido de NaCl=2

Para la evaluación del comportamiento de fases de los sistemas anteriormente mencionados, se tuvo en cuenta el siguiente modo de preparación:

- Paso 1: Preparación de soluciones madre al 5% m/v de surfactante aniónico, y solución madre al 10% m/v de NaCl.
- Paso 2: Preparación de los barridos de salinidad en pipetas selladas de 5 mL. El orden de adición fue: solución de NaCl, agua tipo I y solución de surfactante aniónico. Se marcó el nivel de la fase acuosa (2,5 mL) y se realizó una agitación por inversión.
- Paso 3: Adición de n-heptano como fase oleosa (2,5 mL)
- Paso 4: Adición de 1-pentanol como co-surfactante.
- Paso 5: Agitación por inversión (10 veces), se tapó la parte superior con corchos para evitar evaporación y se dejó en reposo por un periodo de 21 días.

3.3.2 Preparación de nanofluidos con nanopartícula de sílice funcionalizada en fase acuosa.

A continuación, se presenta el método de preparación de nanofluidos en fase acuosa, teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- Paso 1: Adición de solución madre de surfactante aniónico y agua tipo I
- Paso 2: Agitación magnética a 300 rpm durante 20 min. Simultáneamente se pesó las nanopartículas de sílice funcionalizadas y se agregó lentamente por la pared del vórtice de la solución en agitación
- Paso 3: Adición de solución madre de NaCl
- Paso 4: Ultrasonido a una temperatura entre 35°C y 40°C por 60 min.

Se asumió la densidad de 1 g/mL para todos los fluidos.

En la Tabla 2 se presentan las condiciones de preparación de los nanofluidos en fase acuosa con el óptimo de salinidad del sistema 1 y 2, a una concentración fija de nanopartícula (A300 Y AR812S), con el fin de observar la homogeneidad de las soluciones.

Tabla 2. Nanofluidos a concentración fija de nanopartícula y con el óptimo de NaCl observado en el barrido de salinidad del sistema 1 y 2

Parámetro	Sistema 1	Sistema 2
Surfactante (1% m/v)	SDS	SDBS
Concentración de nanopartícula de sílice (% m/m)	0,025 (con A300) 0,025 (con AR812S)	0,025 (con A300) 0,025 (con AR812S)
Concentración de NaCl (% m/v)	2,80	0,47

*Volumen=50 mL, Temperatura=21 ± 1°C, Agua tipo I.

**Total de nanofluidos=4

La concentración de nanopartícula se seleccionó a partir de la medición de turbidez, teniendo como criterio la obtención de una baja turbidez menores a 5 NTU, por ser

un parámetro fisicoquímico de la calidad del agua inyectada en un yacimiento [27]; por tanto, se estableció dos concentraciones por encima y por debajo de 0,025% m/m para el desarrollo de los barridos bidimensionales.

3.3.3 Barrido de salinidad de los sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite a distintas concentraciones de nanopartícula

En la Tabla 3 se presenta la matriz experimental del barrido de salinidad realizado en sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite a distintas concentraciones de nanopartícula, teniendo en cuenta el método de preparación de nanofluidos mencionado en el numeral 3.3.2. Estos barridos de salinidad se realizaron para cada concentración de nanopartícula A300 y AR812S, a partir de esto se realizaron mapas bidimensionales, a fin de observar la transición de fases Winsor I→III→II, obtener la salinidad óptima mediante el cálculo del radio de solubilización y compararla con la salinidad óptima del sistema modelo.

Tabla 3. Matriz experimental de barridos de salinidad de sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite a distintas concentraciones de nanopartícula.

Parámetro	Condición
Surfactante (1% m/v)	SDBS
Concentración de nanopartícula de sílice (% m/m)	0,005; 0,01; 0,03; 0,05 (con A300) 0,005; 0,01; 0,03; 0,05 (con AR812S)
Concentración de NaCl (%m/v)	0,10; 0,30; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,80; 1,00; 1,50
Alcohol (2% v/v)	1-pentanol

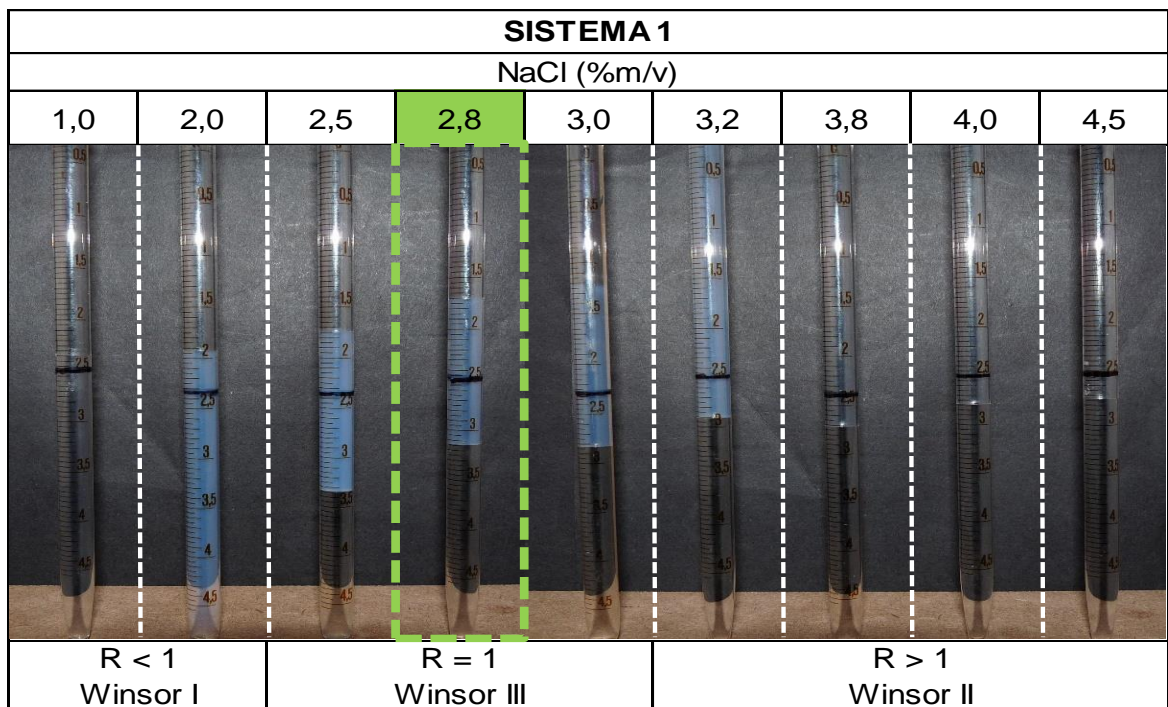
* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Agua tipo I, Fase oleosa= n- heptano

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FASES DE SISTEMA AGUA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE MEDIANTE UN BARRIDO DE SALINIDAD

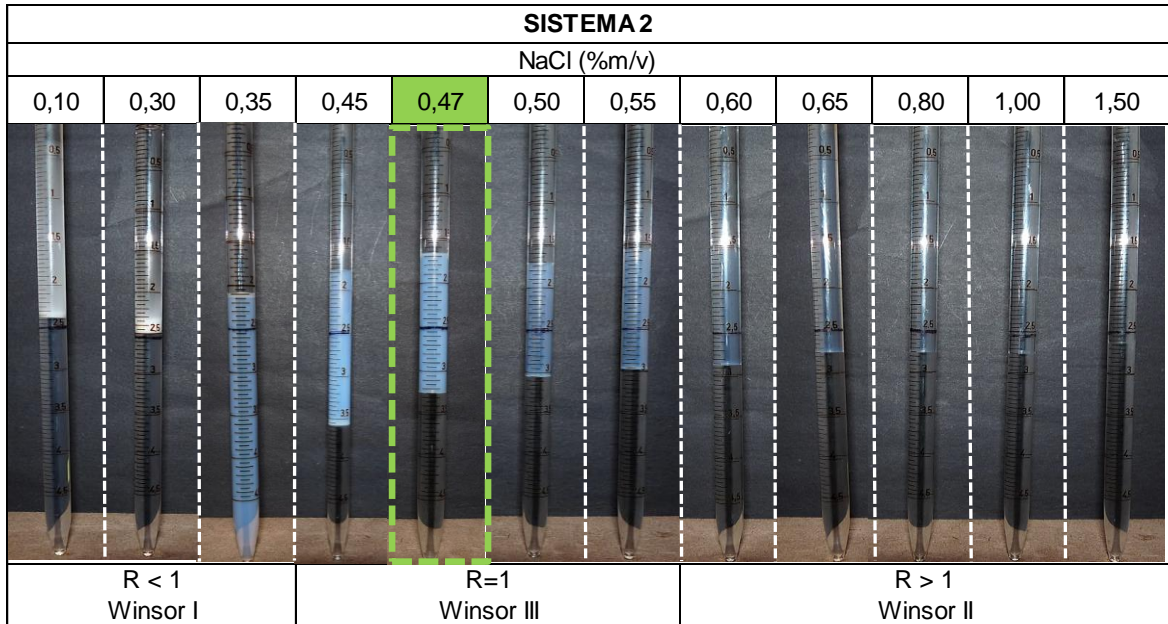
En la Figura 3 y 4 se presenta el comportamiento de fases mediante un barrido de salinidad de los sistemas agua/surfactante aniónico/aceite, para el sistema 1 con surfactante SDS y el sistema 2 con surfactante SDBS, respectivamente.

Figura 3. Comportamiento de fases del sistema 1.



* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura= $21 \pm 1^\circ\text{C}$, Surfactante = SDS (1% m/v), Alcohol = 1-pentanol (5,2% v/v), Agua tipo I, Fase oleosa = n-heptano.

Figura 4 Comportamiento de fases del sistema 2, mediante un barrido de salinidad.



* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Surfactante = SDBS (1% m/v), Alcohol = 1-pentanol (2% v/v), Agua tipo I, Fase oleosa = n-heptano.

A partir de la observación del comportamiento de fases, se puede evidenciar en los dos sistemas una transición que comienza con Winsor I, donde el surfactante se encuentra en la fase acuosa, hacia un comportamiento Winsor III, en el cual el surfactante se reparte entre las dos fases y finalmente hacia Winsor II, donde el surfactante se encuentra en la fase oleosa (Winsor I → III → II). Esta transición es fácilmente observable, ya que la fase rica en surfactante contiene micelas, las cuales se pueden traducir visualmente por una turbidez azulada.

Esta transición se debe al aumento progresivo de la salinidad. En un primer momento, cuando la concentración de sal es baja (entre 0 y 2% m/v de NaCl para el sistema 1; y entre 0 y 0,35% m/v de NaCl para el sistema 2), las interacciones entre la parte polar del surfactante y el agua son muy fuertes. Esto se debe al balance hidrofílico-lipofílico de la molécula de surfactante ($HLB > 10$), lo cual hace que sea una molécula donde los grupos hidrofílicos sean mayores a los lipofílicos y de esta manera el surfactante sea soluble en agua. En consecuencia, el surfactante coexiste con la sal en la fase acuosa.

A medida que la concentración de sal aumenta (a partir de 2,5% m/v de NaCl para el sistema 1 y 0,4% m/v para el sistema 2), las interacciones entre la parte apolar del surfactante y las moléculas de la fase orgánica comienzan a aumentar. El surfactante se desplaza a la fase oleosa (obteniendo un comportamiento de fase Winsor III), hasta un punto en el cual las interacciones entre el surfactante y el agua son iguales a las interacciones entre el surfactante y el aceite. En este punto, el surfactante se reparte análogamente entre ambas fases y se obtiene la formulación óptima (2,8% m/v de NaCl para el sistema 1 y 0,47% m/v de NaCl para el sistema 2).

A medida que aumenta la concentración de sal en el sistema, el surfactante sigue migrando hacia la fase aceite, hasta un punto en el cual desaparece de la fase acuosa y por consiguiente se obtiene un comportamiento de fases Winsor II (a partir de 3,2% m/v de NaCl para el sistema 1 y 0,6% m/v de NaCl para el sistema 2). A estas concentraciones de sal, las interacciones entre el surfactante y el agua son muy bajas, es decir, que el grupo apolar del surfactante tiene mayor interacción con las moléculas del aceite utilizado.

Al comparar los dos sistemas, se pudo evidenciar que la obtención del comportamiento de fases Winsor III, varía dependiendo del tipo surfactante. De esta manera, para el sistema con SDS, se obtiene salinidades mayores debido a su alto valor de HLB (HLB=40), mientras que para el sistema con SDBS se obtienen salinidades bajas (HLB = 31).

Además, existe una diferencia en el volumen de microemulsión de la salinidad óptima, el cual es 2,8 mL y 3,2 mL, para el sistema 1 y 2, respectivamente. El sistema 2, presenta mayor volumen de microemulsión, esto se debe que el surfactante SDBS, posee mayor afinidad por la fase acuosa y oleosa en equilibrio.

4.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA MODELO A PARTIR DE LA HOMOGENEIDAD DEL NANOFLUIDO

En el Anexo A se presenta el registro fotográfico de los nanofluidos que evidencian la interacción de la nanopartícula en la fase acuosa del sistema 1 y 2. Para el nanofluido del sistema 1, se observó que hubo precipitación a diferencia del sistema 2 que presenta una suspensión homogénea, esto puede deberse a la interacción de las nanopartículas con el surfactante y la alta salinidad (2,8 y 0,47% m/v de NaCl, para el nanofluido del sistema 1 y 2, respectivamente).

El criterio de selección del sistema modelo, fue la observación de la homogeneidad de los nanofluidos, es decir, que no presentaran precipitaciones, debido a que hay pérdidas de componentes del sistema, además que no favorece el comportamiento de fases. De lo anterior se seleccionó el sistema 2 como modelo.

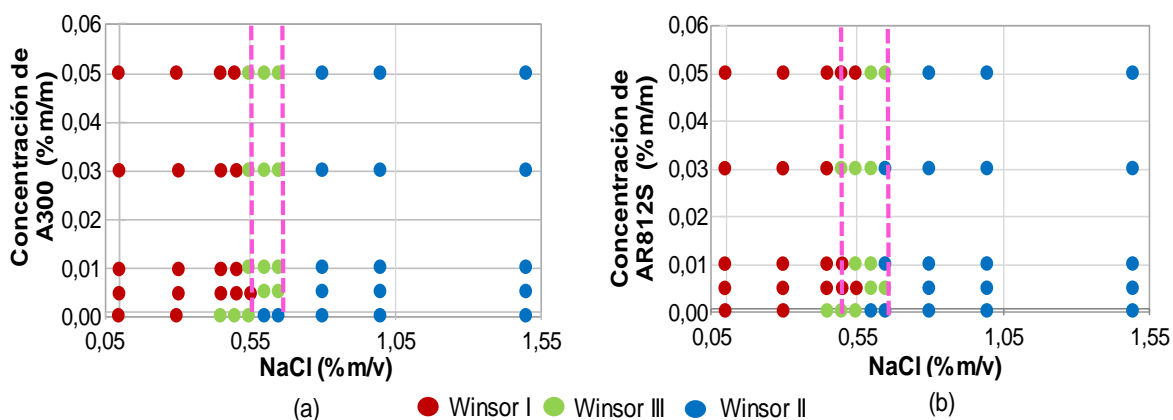
Se midió la turbidez del nanofluido homogéneo, dando como resultado 4,44 NTU y 14,2 NTU, para el sistema con nanopartícula A300 y AR812S, respectivamente. Comparando estos valores medidos, con el parámetro de inyección de agua al yacimiento (<5 NTU), la nanopartícula A300 se acerca al valor estándar, pero con la AR812S por su carácter hidrófobo se aleja. No obstante, estos valores de turbidez permitieron establecer la variación de concentración de nanopartícula para el desarrollo de los barridos bidimensionales.

4.3 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FASES DE SISTEMAS AGUA/NANOPATÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE

En la Figura 5 se presentan los mapas bidimensionales de comportamiento de fases del sistema agua/surfactante aniónico/nanopartícula de sílice funcionalizada/aceite con nanopartícula A300 y AR812S. Los mapas bidimensionales, se realizaron a

partir del registro fotográfico de dichos sistemas que se presentan en el Anexo B y C.

Figura 5. Mapas bidimensionales de comportamiento de fases del sistema agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite, mediante un barrido bidimensional de salinidad y concentración de nanopartícula. (a) sistema con nanopartícula hidrófila A300. (b) sistema con nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S.



Se evidencia que hay un efecto de la interacción del surfactante con la nanopartícula en la interfase y se observa la transición de comportamiento de fases Winsor I \rightarrow III \rightarrow II, similar al sistema modelo. Esta transición se traduce en un aumento de la hidrofobicidad del sistema surfactante/nanopartícula, mediante un aumento progresivo de la salinidad.

En la Figura 5a, Winsor I se obtiene a valores bajos de sal entre 0-0,50% m/v de NaCl (A300 entre 0,01-0,05% m/m) y de 0 a 0,55% m/v de NaCl (A300 de 0,005% m/m). A medida que aumenta la salinidad entre 0,55-0,65% m/v de NaCl (A300 de 0,01 y 0,05% m/m) y para valores entre 0,60-0,65% m/v de NaCl (A300 de 0,005% m/m), se presenta Winsor III. Finalmente, Winsor II se evidencia en valores mayores a 0,65% m/v de NaCl, para las concentraciones de nanopartículas evaluadas.

La nanopartícula hidrófila A300 posee actividad interfacial por que cambia el comportamiento de fases del sistema agua/surfactante aniónico/aceite; evidenciando la interacción de esta nanopartícula en la interfase. Además, esta nanopartícula es más hidrofílica que el surfactante, debido al desplazamiento hacia la derecha del rango de salinidad y del comportamiento de fases Winsor III, es decir, que el sistema con nanopartícula necesita más salinidad para la obtención de un comportamiento Winsor III en comparación con el sistema sin nanopartícula. A medida que aumenta la concentración de A300, aumenta el comportamiento de fases Winsor III, lo cual es beneficioso para procesos EOR, ya que la formulación es mas resistente a cambios de salinidad.

En la Figura 5b Winsor I se obtiene a concentraciones de sal entre 0-0,55% m/v de NaCl (AR812S 0,005 y 0,05% m/m), en valores entre 0-0,50% m/v de NaCl (AR812S 0,01% m/m) y entre 0-0,45% m/v de NaCl (AR812S 0,03% m/m). Winsor III, se presenta en valores de sal entre 0,60-0,65% m/v de NaCl (AR812S 0,005 y 0,05% m/m), entre 0,55-0,60% m/v de NaCl (AR812S 0,01% m/m) y entre 0,50- 0,60% m/v de NaCl (AR812S 0,03% m/m). Por último, Winsor III se observa en valores mayores de 0,65% m/v de NaCl (AR812S 0,005 y 0,05% m/m) y 0,60% m/v de NaCl (AR812S 0,01 y 0,03% m/m).

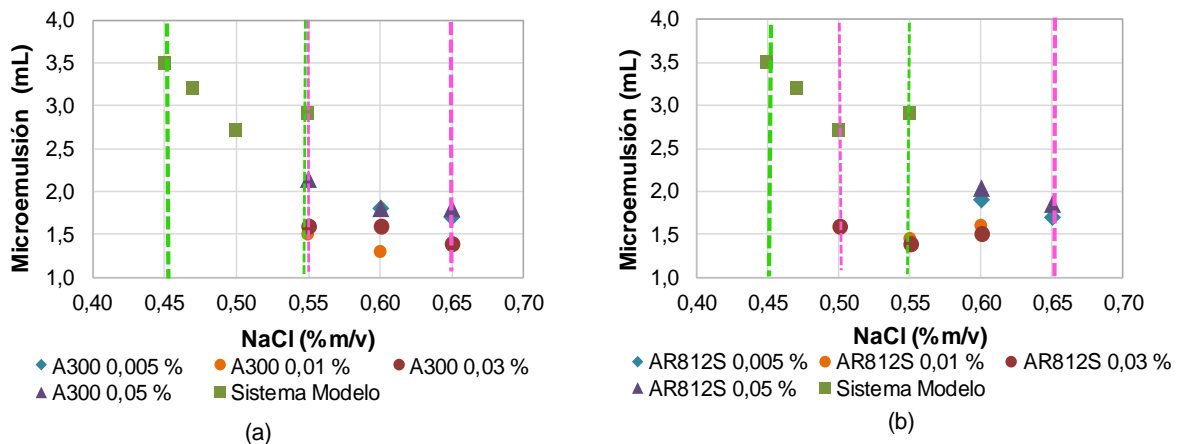
La nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S desplaza el rango de salinidad óptima y el comportamiento Winsor III hacia la derecha. A baja concentración de AR812S, Winsor III no es muy amplio, pero a concentraciones intermedias Winsor III aumenta. No obstante, a concentraciones altas el comportamiento Winsor III vuelve a estrecharse. En valores de concentraciones inferiores de nanopartícula AR812S se esperaba que hubiese un desplazamiento menor que con la nanopartícula A300, debido a que la AR812S está parcialmente hidrofobada, pero en este punto la AR812S tiene un comportamiento más hidrofílico que la A300 y que el surfactante SDBS. Sin embargo, el rango de salinidad obtenido para el comportamiento de fases Winsor III de ambas nanopartículas es similar.

Un factor importante para la formulación de sistemas agua/nanopartícula de sílice funcionalizada/surfactante aniónico/aceite es la presencia de un comportamiento de fases Winsor III, por lo tanto, si se llega a plantear un sistema con las concentraciones de nanopartículas evaluadas, podría ser una ventaja para la utilización de eventuales procesos de inyección, debido a que si hay variación de concentración de nanopartícula o salinidad dentro del rango donde coexiste Winsor III, las diferencias en la formulación óptima no serán considerables.

4.4 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS (1) AGUA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE Y (2) AGUA/NANOPARTÍCULA DE SÍLICE FUNCIONALIZADA/SURFACTANTE ANIÓNICO/ACEITE

En la Figura 6 se presentan los valores de volumen de microemulsión con respecto al porcentaje de salinidad de los sistemas con y sin nanopartícula.

Figura 6. Volumen de microemulsión vs. concentración de salinidad de los sistemas con y sin nanopartícula. (a) sistema con y sin nanopartícula hidrófila A300. (b) sistema con y sin nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S.



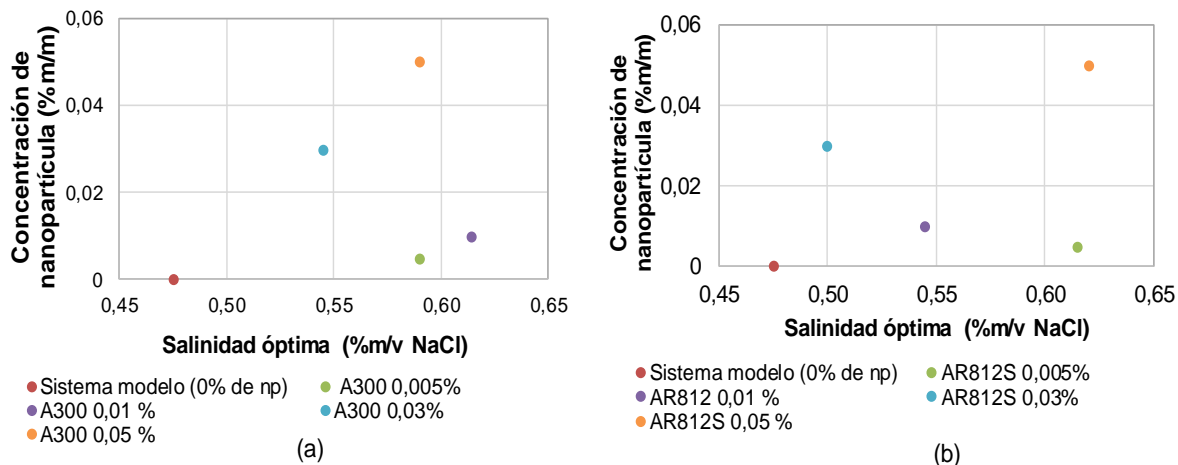
Para los sistemas con nanopartícula hidrófila A300 y parcialmente hidrófoba AR812S se evidencia que el volumen de microemulsión es menor

comparado con el sistema modelo. Es decir, para este sistema en particular en presencia de nanopartículas, la interacción entre los agentes tensoactivos (surfactante + nanopartícula) en la interfase, no es muy alta. Sin embargo, la obtención del comportamiento de fases Winsor III y volúmenes de microemulsión, demuestran el efecto de la interacción de las nanopartículas con el surfactante en la interfase. En este tipo de comportamiento de fases, es donde se obtienen teóricamente las TIF más bajas del sistema, lo cual en procesos de inyección es un factor importante para la recuperación de petróleo.

Aunque para este sistema exista una baja interacción entre el surfactante y la nanopartícula en la interfase, esto no quiere decir que no existan sistemas surfactante/nanopartícula donde la interacción entre los agentes con actividad interfacial garanticen la formación de más volumen de microemulsión, lo cual puede obtenerse a través de la utilización de otro surfactante y variaciones de concentración en la relación surfactante/nanopartículas, como lo evidencian estudios previos [19] [28]

En la Figura 7 se presentan los valores de salinidad óptima para cada sistema con y sin nanopartícula obtenidos mediante los cálculos de radio de solubilización que se pueden observar en el Anexo D.

Figura 7. Concentración de nanopartícula vs. salinidad óptima de los sistemas con y sin nanopartícula (a) sistema con y sin nanopartícula hidrófila A300. (b) sistema con y sin nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S.



Para el sistema que contiene nanopartícula hidrófila A300, cuando la concentración es de 0,005 y 0,01% m/m, se evidencia un desplazamiento hacia la derecha de la salinidad óptima y cuando la concentración de nanopartícula es de 0,03 y 0,05% m/m, no se percibe un desplazamiento positivo. Esto puede deberse a que a concentraciones por encima de 0,01% m/m, se produce un precipitado, de manera que la nanopartícula en vez de ir completamente a la interface, una parte se precipita y otra se mantiene con actividad interfacial.

Para el sistema que contiene nanopartícula hidrófoba AR812S cuando la concentración es de 0,005 y 0,05% m/m, se evidencia un desplazamiento de la salinidad óptima hacia la derecha con respecto al sistema modelo. Sin embargo, cuando la concentración de nanopartícula es de 0,01 y 0,03% m/m la salinidad óptima vuelve a descender. Este fenómeno puede ser explicado por la presencia de precipitados en el fondo de la fase acuosa en esas concentraciones. De esta manera se presenta la misma situación que con la A300.

En general, aunque el desplazamiento de la salinidad óptima de los dos sistemas con nanopartícula (A300 y AR812S) fue hacia la derecha, con respecto al sistema modelo, hubo un mayor desplazamiento en el sistema con nanopartícula AR812S.

Con la nanopartícula parcialmente hidrófoba AR812S, se esperaba un desplazamiento menos importante de la salinidad óptima, debido a que esta nanopartícula es de carácter parcialmente hidrófobo. Sin embargo, a baja concentración (0,005% m/m) se obtiene mayor desplazamiento de salinidad óptima para la AR812S. Esta es la única concentración en la cual no se produce precipitado en ninguno de los dos sistemas, por tanto, es la única concentración a la cual podemos afirmar que la nanopartícula AR812S tiene un carácter menos hidrófobo en el sistema que la A300.

Cabe resaltar que según investigaciones previas se ha demostrado que el alcohol tiene una influencia considerable sobre la hidrofobicidad de los surfactantes iónicos [29] [30] [31] y las nanopartículas [32]. Podríamos pensar que el 1-pentanol en este sistema puede influenciar el carácter hidrófobo de la nanopartícula AR812S, lo cual abre camino para investigaciones futuras.

5 CONCLUSIONES

Los sistemas evaluados de agua/surfactante aniónico/aceite, presentan una transición del comportamiento de fases Winsor I→III→II a medida que aumenta la salinidad.

En sistemas de agua/surfactante aniónico/aceite con nanopartícula se evidencia de la misma forma la transición del comportamiento de fases Winsor I→III→II incrementando la salinidad. Sin embargo, existe un desplazamiento del comportamiento de fases respecto al sistema modelo en ausencia de nanopartículas.

Las nanopartículas A300 y AR812S, modifican la formulación del sistema agua/SDBS/1-pentanol/n-heptano. El desplazamiento de comportamiento de fases y la región de comportamiento Winsor III, depende del tipo de nanopartícula y de su concentración en el sistema.

Mediante la obtención la fase bicontinua (microemulsión) en sistemas con nanopartícula, se evidencia que existe una interacción de la nanopartícula en la interfase, lo cual representa ser una alternativa en las formulaciones de sistemas agua/surfactante/aceite y así mejorar el efecto que genera el surfactante en el sistema. Sin embargo, para los sistemas estudiados la interacción entre el surfactante y la nanopartícula en la interfase no es muy alta, que permita aumentar la cantidad de microemulsión generada en el sistema sin nanopartícula.

El efecto de las nanopartículas sobre el comportamiento de fases del sistema agua/surfactante aniónico/aceite, depende en gran medida de su solubilidad ya que, de haber precipitación, solo una fracción de estas nanopartículas tienen la capacidad de migrar hacia la interfase.

6 RECOMENDACIONES

Evaluar otros surfactantes junto con las nanopartículas de sílice funcionalizadas para que haya una mayor interacción entre el surfactante y la nanopartícula en la interfase, y así obtener mayor volumen de microemulsión en la formulación óptima, teniendo en cuenta la relación entre el surfactante y la nanopartícula.

Para la observación de volúmenes de microemulsión en valores de salinidad óptima de los sistemas con nanopartícula, se propone preparar dichos sistemas, para poder comparar a que concentración de nanopartícula se obtuvo el mayor volumen de microemulsión.

Estudiar el efecto de alcoholes sobre las nanopartículas parcialmente hidrófobas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BP. *Statistical review of world energy 2017*. Datos informes., s.d., [En línea]. [Consultado: 08 mayo 2018]. Disponible en: https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjly_e3hvfaAhWEt1kKHWhsCaoQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.bp.com%2Fcontent%2Fdam%2Fbp%2Fen%2Fcorporate%2Fpdf%2Fenergy-economics%2Fstatistical-review-2017%2Fbp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf&usg=AOvVaw2aMOLmDMZIBQpaw8FDDumY.
- [2] COMUNIDAD DE MADRID. *El petróleo. El recorrido de la energía*. Madrid, España.: E.I.S.E. Domenech, S.A, 2002., 14 p. B-41679-2002.
- [3] *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Resources to Reserves 2013. Oil, Gas and Coal Technologies for the Energy Markets of the Future*. 2 ed. Francia: FSC, 2013., 17 p. ISBN 9789264083547.
- [4] ALDANA PÁEZ, Andrea. La vida de reservas petroleras es de más de 1659 millones de barriles para 7,1 años. En: *La República*. [En línea]. Abril, 2018. [Consultado: 30 abril 2018]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/especiales/petroleo/cuales-son-las-reservas-de-petroleo-de-colombia-2719429>.
- [5] COLPRENSO. “Hay reservas de petróleo para 4,5 años en Colombia: presidente de la ANH”. En: *El País*. [En línea]. Diciembre, 2017. [Consultado: 30 abril 2018]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/economia/hay-reservas-de-petroleo-para-4-5-anos-en-colombia-presidente-de-la-anh.html>.
- [6] SUN, Xiaofei, et al. *Application of nanoparticles in enhanced oil recovery: A critical review of recent progress*. En: *Energies*. Marzo, 2017, vol. 10, no. 345., p 1-2, 4-10.

[7] VIDAL PRADA, Juliana Carolina. Factibilidad del uso de álcalis orgánicos como sustitutos de álcalis inorgánicos para recobro químico de crudo de los campos Dina Cretáceo y San Francisco. Trabajo de Investigación para optar al título de Magister en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química. 2014., p 34-36, 58-61, 63, 66-71.

[8] SALAGER, Jean Louis. Uso de los surfactantes en la industria petrolera. Mérida-Venezuela, 1991., p 1,5. Cuaderno FIRP S350-A.

[9] HERNÁNDEZ SERRANO, Aliver. Recuperación Mejorada De Hidrocarburos a Partir De Un Tratamiento Con Polímeros Y Surfactantes. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico Petrolero. México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico.2014., p 2-3, 16.

[10] ALABDULMOHSEN, Zainab. *Experimental study of crude oil emulsion stability by surfactants and nanoparticles*. Tesis presentada para optar el título de Máster de Ciencia en Ingeniería Mecánica. Missouri: Missouri University of Science and Technology. 2015., p 1-2.

[11] CHEGENIZADEH, Negin; SAEEDI, Ali y QUAN Xie. *Application of nanotechnology for enhancing oil recovery-A review*. En: *Ke Ai advancing research evolving science*. Octubre, 2016., p. 324, 328.

[12] BERA, Achinta, et al. *Interfacial tension and phase behavior of surfactant – brine – oil system*. En: *Colloids and Surfaces*. Marzo, 2011., vol. 383., p 114-119.

[13] JIMENEZ, Donaji; MEDINA, Sergio y GRACIDA, Jorge. *Biosurfactant properties, applications and production: a review*. En: *Int. Contam. Ambient*. Febrero, 2010., vol. 26 no.1., p 65,68.

[14] SALAGER, Jean Louis. Comportamiento de fases de los sistemas surfactante-agua-aceite, diagramas y barridos. Mérida-Venezuela, 1991., p 1, 7, 11. Cuaderno FIRP S220-A.

[15] SALAGER, Jean-Louis, et al. *How to Attain an Ultralow Interfacial Tension and a Three-Phase Behavior with a Surfactant Formulation for Enhanced Oil Recovery: A Review. Part 2. Performance Improvement Trends from Winsor' s Premise to Currently Proposed Inter- and Intra-Molecular.* En: Springer. s.d., p 3,19.

[16] HERNÁNDEZ, María Carolina. Formación de nanoemulsiones o/w mediante el cambio de la composición-formulación por disolución con agua de sistemas próximos a la formulación óptima. Trabajo de Investigación para optar al título de Ingeniera Química. Mérida: Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2014., p 51

[17] ZHANG, Tiantian, et al. *Nanoparticle-Stabilized Emulsions for Applications in Enhanced Oil Recovery.* En: SPE. Enero, 2010., p 1-19. SPE 129885.

[18] EVONIK. AEROSIL. *Fumed Silica.*, s.l., 8 ed.,s.d., p 20. [En línea]. [Consultado: 6 Mayo 2018]. Disponible en: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwio74mrtvDaAhXLUVMKHdTfAgQQFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.aerosil.com%2Fsites%2Flists%2FRE%2FDocumentsSI%2FTechnical-Overview-AEROSIL-Fumed-Silica-EN.pdf&usg=AOvVaw37IC1ZS2ZbDHxPSWbgWkJf>.

[19] ZARGARTALEBI, Mohammad; KHARRAT, Riyaz y BARATI, Nasim. *Enhancement of Surfactant flooding performance by the use of silica nanoparticles.* En: FUEL. Noviembre,2014, vol. 143., p 21-27.

- [20] HUIBERS, Britta et al. Wettability alteration of sandstones by silica nanoparticle dispersions in light and heavy crude oil. En: *Journal of Nanoparticle Research*. Septiembre, 2017., vol 19., no. 323., p 1,18.
- [21] Wu, Yining, et al. *Reducing surfactant adsorption on rock by silica nanoparticles for enhanced oil recovery*. En: *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Mayo, 2017., vol. 153., p 283, 287.
- [22] MONDRAGÓN, Rosa, et al. Preparación y caracterización de nanofluidos: Influencia de variables sobre su estabilidad, estado de aglomeración y propiedades físicas. En: *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. Junio, 2014, vol. 53, no. 3., p. 101-102.
- [23] EVONIK INDUSTRIES. AEROSIL 300. *Hydrophilic fumed silica*. Octubre, 2017., p 1-2.
- [24] EVONIK INDUSTRIES. AEROSIL R 812 S. *Hydrophobic fumed silica*. Octubre, 2017., p 1-2.
- [25] SALAGER, Jean-Louis. Formulación. HLB, PIT, Rde Winsor. Mérida-Venezuela, 1998., 5 p. Cuaderno FIRP S210a.
- [26] XIE, Sujin; TONG, Guolin y CHIN, Yungchang. *The effect of offset printing ink on laser toner ink agglomeration under neutral pulping conditions*. En: *BioResources* 2012., vol 7., no. 3., 2842 p.
- [27] GIL HENAO, Layonel. Inyección de agua por flujo cruzado natural y asistido; una estrategia de recuperación mejorada inmediata en un campo de crudo extra pesado. Trabajo de Investigación para optar al título de Magister en Ingeniería de Petróleos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. 2017., 26 p.

[28] EMADI, Samira. *Effect of nano silica particles on Interfacial Tension (IFT) and mobility control of natural surfactant (Cedr Extraction) solution in enhanced oil recovery process by nano-surfactant flooding*. En: *Journal of Molecular Liquids*. Diciembre, 2017., vol. 248., p 163-167.

[29] Zana, R, et al. *Effect of alcohol on the properties of micellar systems: I. Critical micellization concentration, micelle molecular weight and ionization degree, and solubility of alcohols in micellar solutions*. En: *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981., vol 80., no. 1., p 208–223. doi:10.1016/0021-9797(81)90177-6.

[30] Yiv, S, et al *Effect of alcohol on the properties of micellar systems: II. Chemical relaxation studies of the dynamics of mixed alcohol + surfactant micelles*, En: *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981., vol. 80., no. 1., p 224–236. doi:10.1016/0021-9797(81)90178-8.

[31] Almgren, M y Swarup, S. *Size of sodium dodecyl sulfate micelles in the presence of additives i. alcohols and other polar compounds*. En: *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983., vol. 91., p 256–266. doi:10.1016/0021-9797(83)90330-2.

[32] BINKS, B.P; FLETCHER, P.D.S y TIAM, L. *Influence of nanoparticle addition to Winsor surfactant microemulsion systems*. En: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Abril, 2010., vol. 363., p9-15.

BIBLIOGRAFÍA

ALABDULMOHSEN, Zainab. *Experimental study of crude oil emulsion stability by surfactants and nanoparticles*. Tesis presentada para optar el título de Máster de Ciencia en Ingeniería Mecánica. Missouri: *Missouri University of Science and Technology*. 2015., p 1-2.

ALDANA PÁEZ, Andrea. La vida de reservas petroleras es de más de 1659 millones de barriles para 7,1 años. En: *La República*. [En línea]. Abril, 2018. [Consultado: 30 abril 2018]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/especiales/petroleo/cuales-son-las-reservas-de-petroleo-de-colombia-2719429>.

Almgren, M y Swarup, S. *Size of sodium dodecyl sulfate micelles in the presence of additives i. alcohols and other polar compounds*. En: *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983., vol. 91., p 256–266. doi:10.1016/0021-9797(83)90330-2.

BERA, Achinta, et al. *Interfacial tension and phase behavior of surfactant – brine – oil system*. En: *Colloids and Surfaces*. Marzo, 2011., vol. 383., p 114-119.

BINKS, B.P; FLETCHER, P.D.S y TIAM, L. *Influence of nanoparticle addition to Winsor surfactant microemulsion systems*. En: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Abril, 2010., vol. 363., p9-15.

BP. *Statistical review of world energy 2017*. Datos informes., s.d., [En línea]. [Consultado: 08 mayo 2018]. Disponible en: https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjly_e3hvfaAhWEt1kKHWhsCaoQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.bp.com%2Fcontent%2Fdam%2Fbp%2Fen%2Fcorporate%2Fpdf%2Fenergy-economics%2Fstatistical-review-2017%2Fbp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf&usg=AOvVaw2aMOLmDMZIBQpaw8FDDumY.

CHEGENIZADEH, Negin; SAEEDI, Ali y QUAN Xie. *Application of nanotechnology for enhancing oil recovery-A review*. En: *Ke Ai advancing research evolving science*. Octubre, 2016., p. 324, 328.

COLPRENSO. "Hay reservas de petróleo para 4,5 años en Colombia: presidente de la ANH". En: *El País*. [En línea]. Diciembre, 2017. [Consultado: 30 abril 2018]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/economia/hay-reservas-de-petroleo-para-4-5-anos-en-colombia-presidente-de-la-anh.html>.

COMINIDAD DE MADRID. *El petróleo. El recorrido de la energía*. Madrid, España.: E.I.S.E. Domenech, S.A, 2002., 14 p. B-41679-2002.

EMADI, Samira. *Effect of nano silica particles on Interfacial Tension (IFT) and mobility control of natural surfactant (Cedr Extraction) solution in enhanced oil recovery process by nano-surfactant flooding*. En: *Journal of Molecular Liquids*. Diciembre, 2017., vol. 248., p 163-167.

EVONIK INDUSTRIES. AEROSIL 300. *Hydrophilic fumed silica*. Octubre, 2017., p 1-2.

EVONIK INDUSTRIES. AEROSIL R 812 S. *Hydrophobic fumed silica*. Octubre, 2017., p 1-2.

EVONIK. AEROSIL. Fumed Silica., s.l., 8 ed.,s.d., p 20. [En línea]. [Consultado: 6 Mayo 2018]. Disponible en: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwio74mrtvDaAhXLUVMKHdTfAgQQFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.aerosil.com%2Fsites%2Flists%2FRE%2FDocumentsSI%2FTechnical-Overview-AEROSIL-Fumed-Silica-EN.pdf&usg=AOvVaw37IC1ZS2ZbDHxPSWbgWkJf>.

GIL HENAO, Layonel. Inyección de agua por flujo cruzado natural y asistido; una estrategia de recuperación mejorada inmediata en un campo de crudo extra pesado.

Trabajo de Investigación para optar al título de Magister en Ingeniería de Petróleos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. 2017., 26 p.

HERNÁNDEZ SERRANO, Aliver. Recuperación Mejorada De Hidrocarburos a Partir De Un Tratamiento Con Polímeros Y Surfactantes. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico Petrolero. México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico. 2014., p 2-3, 16.

HERNÁNDEZ, María Carolina. Formación de nanoemulsiones o/w mediante el cambio de la composición-formulación por disolución con agua de sistemas próximos a la formulación óptima. Trabajo de Investigación para optar al título de Ingeniera Química. Mérida: Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2014., p 51

HUIBERS, Britta et al. *Wettability alteration of sandstones by silica nanoparticle dispersions in light and heavy crude oil*. En: *Journal of Nanoparticle Research*. Septiembre, 2017., vol 19., no. 323., p 1,18.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Resources to Reserves 2013. Oil, Gas and Coal Technologies for the Energy Markets of the Future. 2 ed. Francia: FSC, 2013., 17 p. ISBN 9789264083547.

JIMENEZ, Donaji; MEDINA, Sergio y GRACIDA, Jorge. *Biosurfactant properties, applications and production: a review*. En: *Int. Contam. Ambient*. Febrero, 2010., vol. 26 no.1., p 65,68.

MONDRAGÓN, Rosa, et al. Preparación y caracterización de nanofluidos: Influencia de variables sobre su estabilidad, estado de aglomeración y propiedades físicas. En: *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. Junio, 2014, vol. 53, no. 3., p. 101-102.

SALAGER, Jean Louis. Comportamiento de fases de los sistemas surfactante-agua-aceite, diagramas y barridos. Mérida-Venezuela, 1991., p 1, 7, 11. Cuaderno FIRP S220-A.

SALAGER, Jean Louis. Uso de los surfactantes en la industria petrolera. Mérida-Venezuela, 1991., p 1,5. Cuaderno FIRP S350-A.

SALAGER, Jean-Louis, et al. *How to Attain an Ultralow Interfacial Tension and a Three-Phase Behavior with a Surfactant Formulation for Enhanced Oil Recovery: A Review. Part 2. Performance Improvement Trends from Winsor' s Premise to Currently Proposed Inter- and Intra-Molecular.* En: Springer. s.d., p 3,19.

SALAGER, Jean-Louis. Formulación. HLB, PIT,Rde Winsor.Mérida-Venezuela, 1998., 5 p. Cuaderno FIRP S210a.

SUN, Xiaofei, et al. *Application of nanoparticles in enhanced oil recovery: A critical review of recent progress.* En: *Energies.* Marzo, 2017, vol. 10, no. 345., p 1-2, 4-10.

VIDAL PRADA, Juliana Carolina. Factibilidad del uso de álcalis orgánicos como sustitutos de álcalis inorgánicos para recobro químico de crudo de los campos Dina Cretáceo y San Francisco. Trabajo de Investigación para optar al título de Magister en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química. 2014., p 34-36, 58-61, 63, 66-71.

Wu, Yining, et al. *Reducing surfactant adsorption on rock by silica nanoparticles for enhanced oil recovery.* En: *Journal of Petroleum Science and Engineering.* Mayo, 2017., vol. 153., p 283, 287.

XIE, Sujin; TONG, Guolin y CHIN, Yungchang. *The effect of offset printing ink on laser toner ink agglomeration under neutral pulping conditions.* En: *BioResources* 2012., vol 7., no. 3., 2842 p.

Yiv, S, et al. *Effect of alcohol on the properties of micellar systems: II. Chemical relaxation studies of the dynamics of mixed alcohol + surfactant micelles*. En: *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981., vol. 80., no. 1., p 224–236. doi:10.1016/0021-9797(81)90178-8.





Zana, R, et al. *Effect of alcohol on the properties of micellar systems: I. Critical micellization concentration, micelle molecular weight and ionization degree, and solubility of alcohols in micellar solutions*. En: *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981., vol 80., no. 1., p 208–223. doi:10.1016/0021-9797(81)90177-6.

ZARGARTALEBI, Mohammad; KHARRAT, Riyaz y BARATI, Nasim. *Enhancement of Surfactant flooding performance by the use of silica nanoparticles*. En: *FUEL*. Noviembre,2014, vol. 143., p 21-27.

ZHANG, Tiantian, et al. *Nanoparticle-Stabilized Emulsions for Applications in Enhanced Oil Recovery*. En: *SPE*. Enero, 2010., p 1-19. SPE 129885.

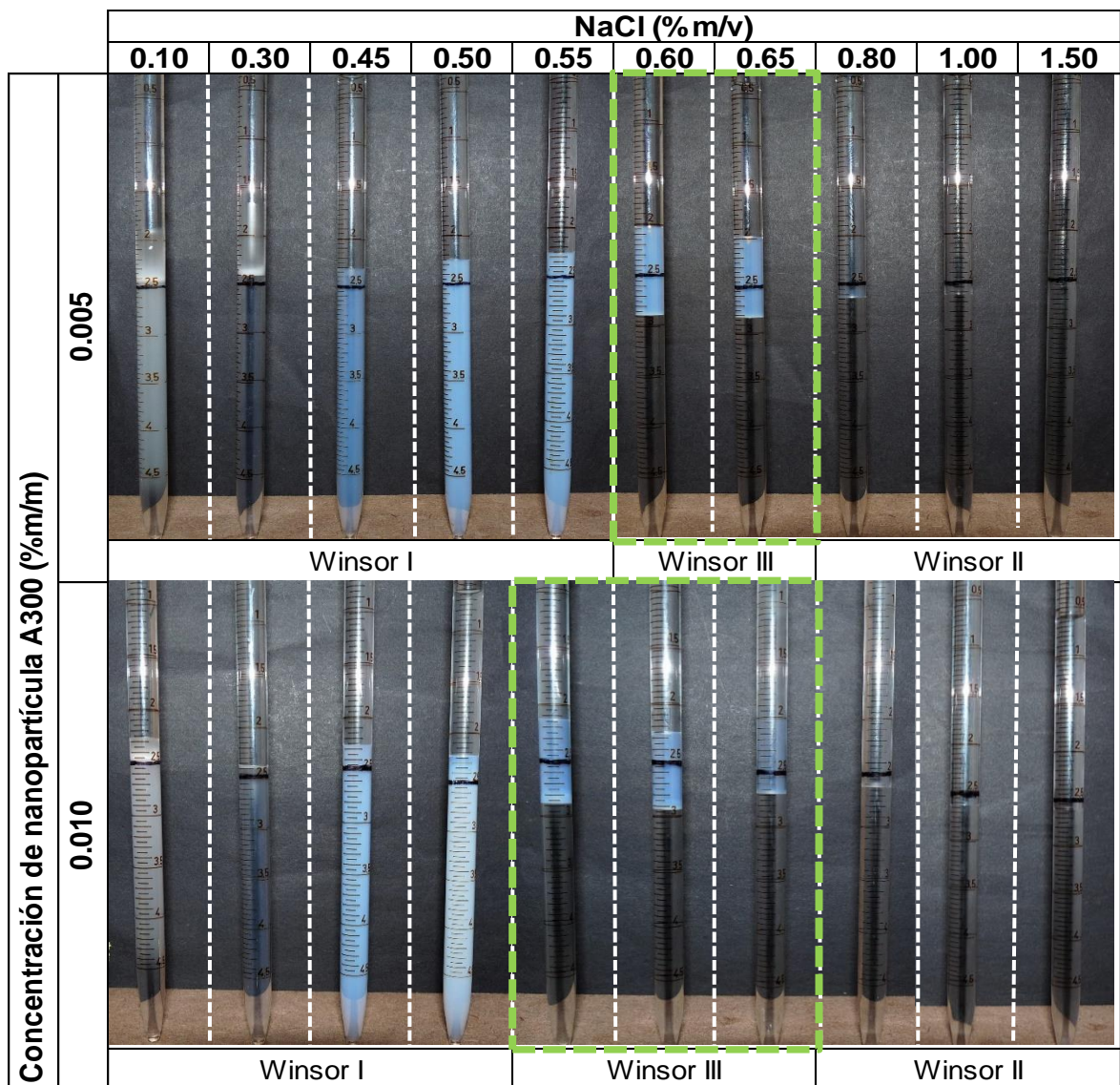
ANEXOS

Anexo A. Nanofluidos preparados con las nanopartículas de sílice funcionalizada en fase acuosa para el sistema 1 y sistema 2.

Sistema 1 SDS 1% m/v; NaCl 2,8% m/v		Sistema 2 SDBS 1% m/v; NaCl 0,47% m/v	
Np hidrófila (A300)	Np parcial hidrófoba (AR812S)	Np hidrófila (A300)	Np parcial hidrófoba (AR812S)
			

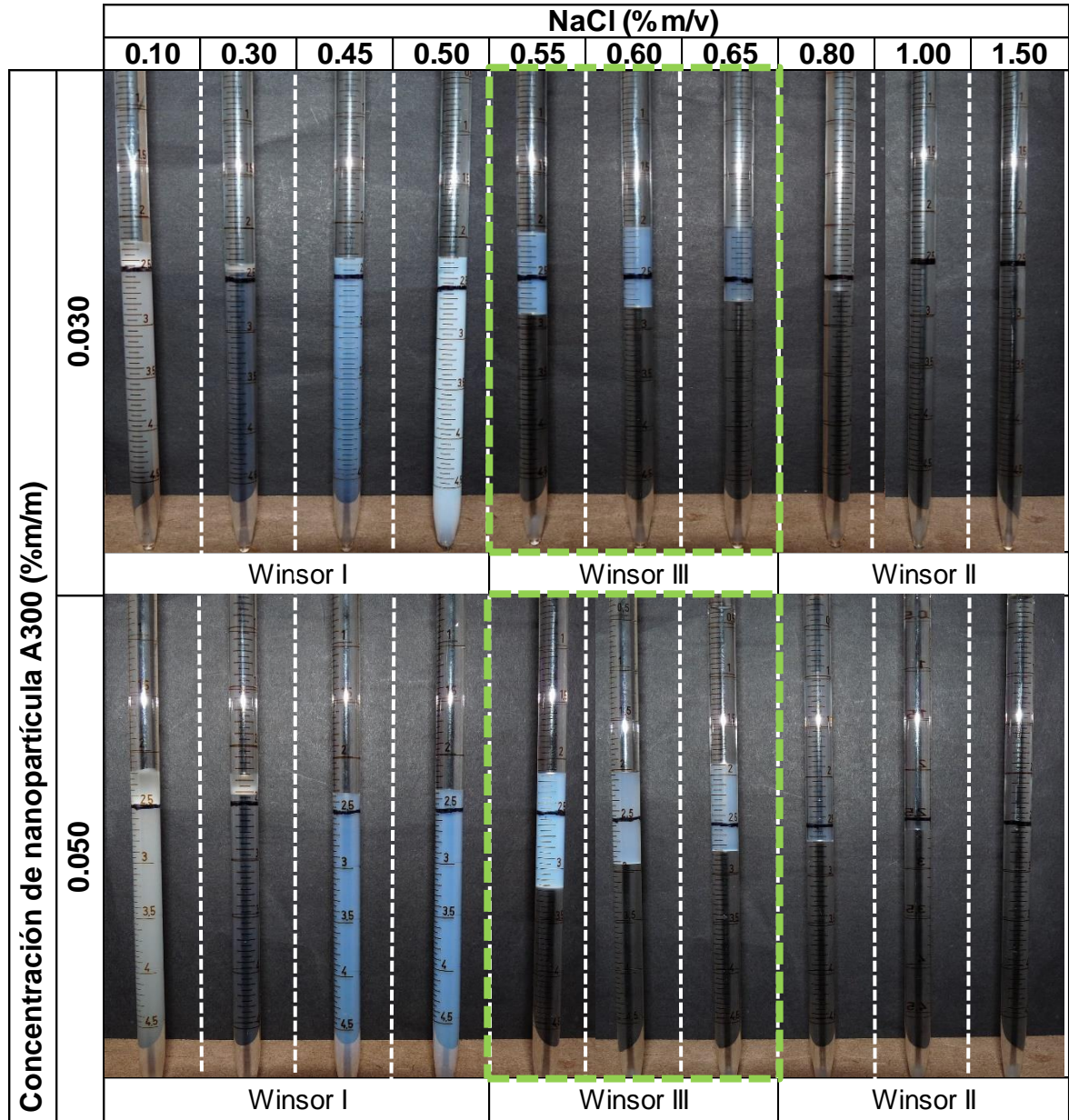
Anexo B. Experimentación de comportamiento de fases mediante un barrido bidimensional de concentración de nanopartícula y concentración de NaCl del sistema agua/nanopartícula de sílice hidrófila (A300) / surfactante SDBS /aceite.

Figura B.1. Comportamiento de fases del sistema agua/nanopartícula de sílice hidrófila (A300) / surfactante SDBS /aceite, a concentraciones de nanopartícula de 0,005 y 0,01% m/m.



* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Surfactante = SDBS (1% m/v), Alcohol = 1-pentanol (2% v/v), Agua tipo I, Fase oleosa = n-heptano.

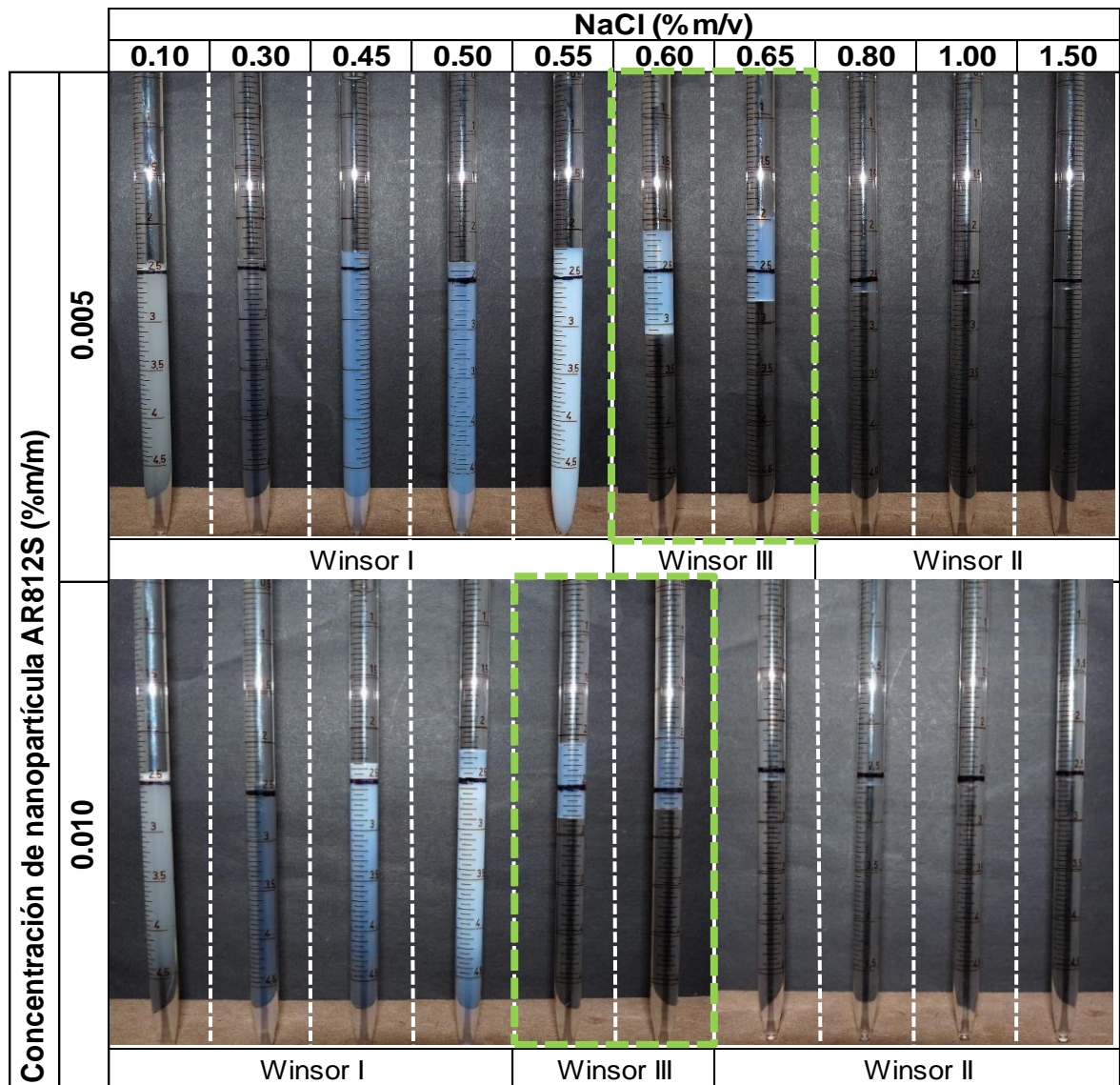
Figura B.2. Comportamiento de fases del sistema agua/nanopartícula de sílice hidrófila (A300) / surfactante SDBS /aceite, a concentraciones de nanopartícula de 0,03 y 0,05% m/m.



* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Surfactante = SDBS (1% m/v), Alcohol = 1-pentanol (2% v/v), Agua tipo I, Fase oleosa = n-heptano.

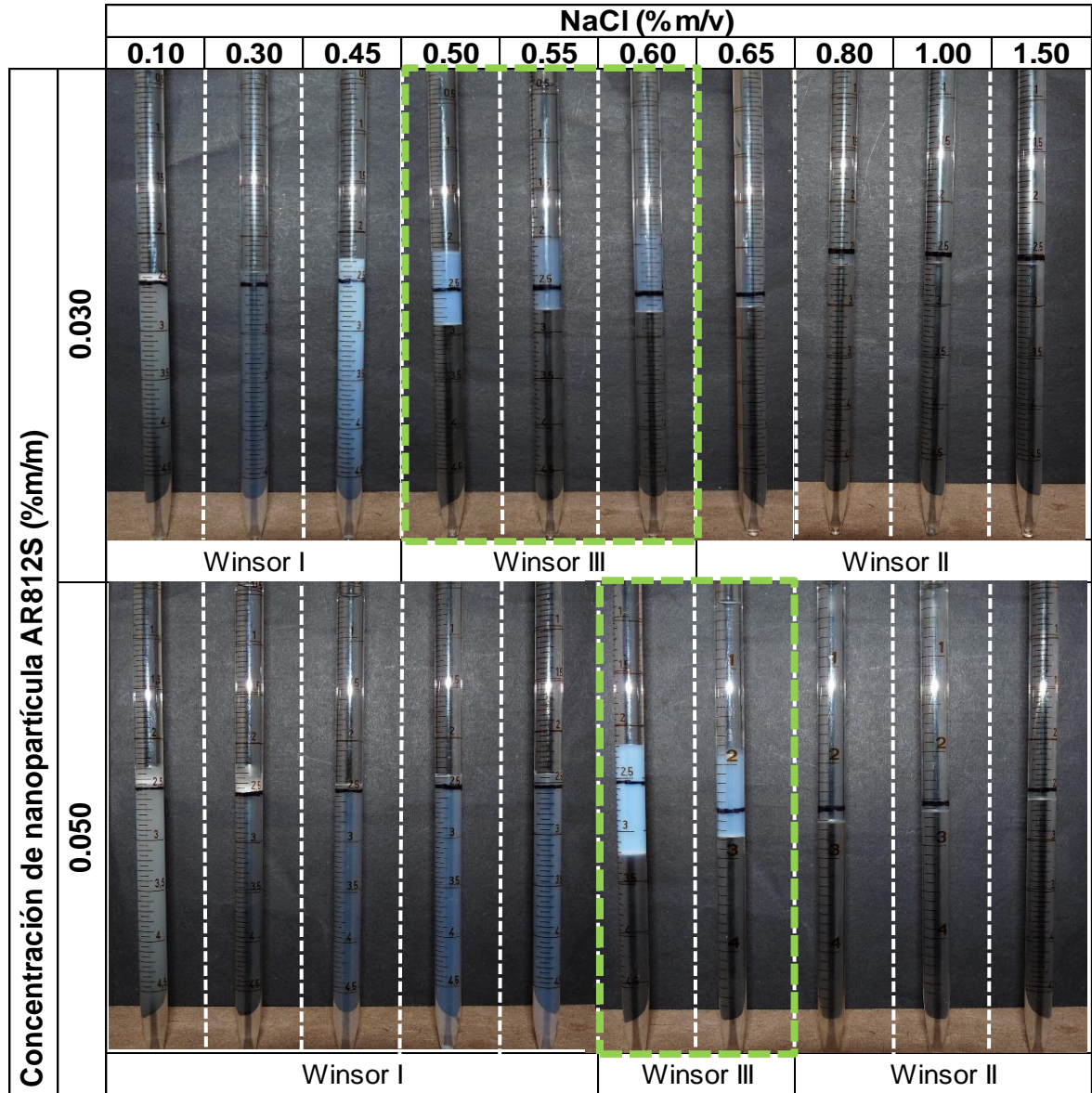
Anexo C. Comportamiento de fases mediante un barrido bidimensional de concentración de nanopartícula y concentración de NaCl del sistema agua/nanopartícula de sílice parcialmente hidrófila (AR812S)/surfactante SDBS/aceite.

Figura C.1. Comportamiento de fases del sistema agua/nanopartícula de sílice hidrófila (AR812S) / surfactante SDBS /aceite, a concentraciones de nanopartícula de 0,005 y 0,01% m/m.



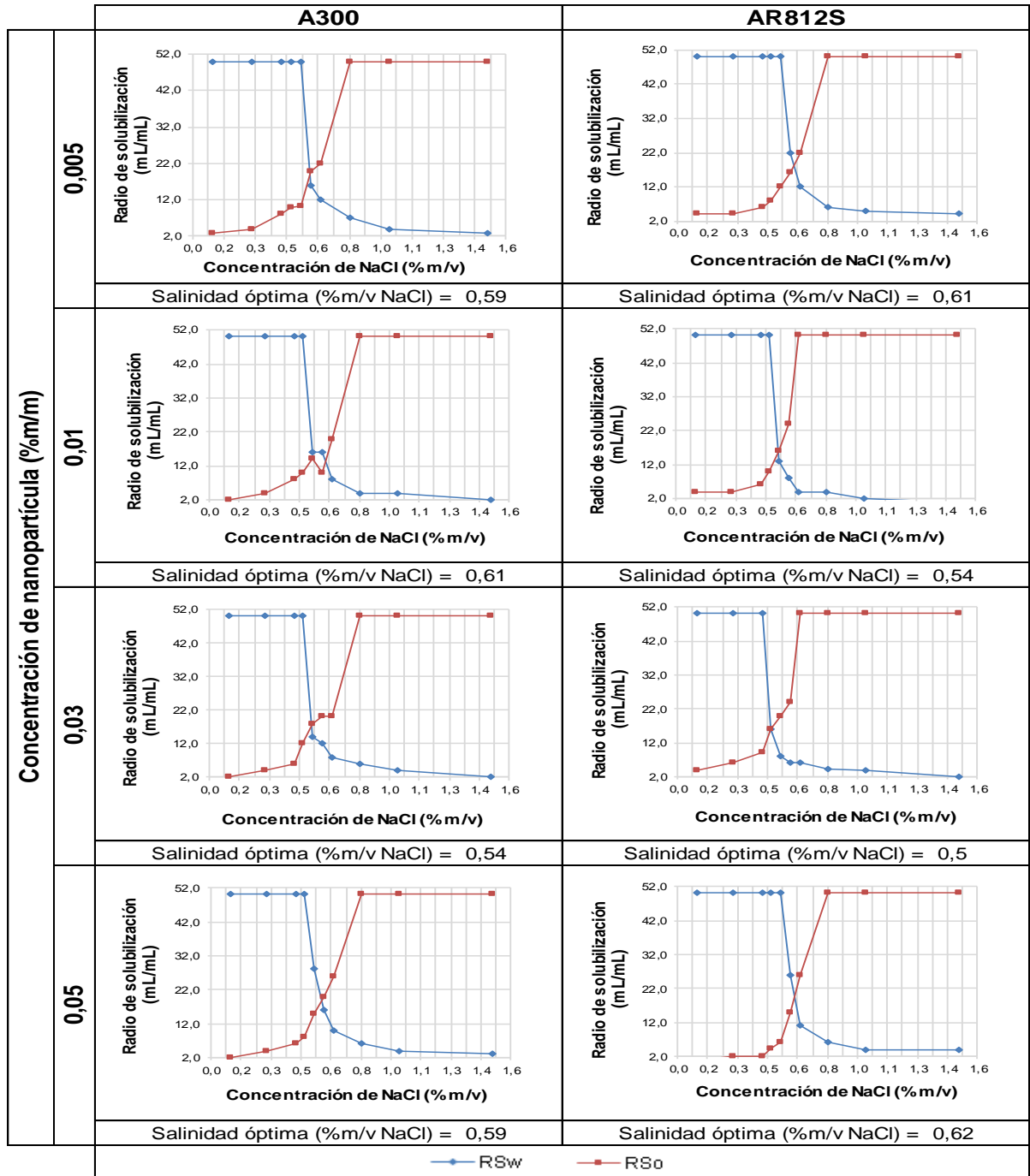
* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Surfactante = SDBS (1% m/v), Alcohol = 1-pentanol (2% v/v), Agua tipo I, Fase oleosa = n-heptano.

Figura C.2. Comportamiento de fases del sistema agua/nanopartícula de sílice hidrófila (AR812S) / surfactante SDBS /aceite, a concentraciones de nanopartícula de 0,03 y 0,05% m/m.



* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Surfactante = SDBS (1% m/v), Alcohol = 1-pentanol (2% v/v), Agua tipo I, Fase oleosa = n-heptano.

Anexo D. Radios de solubilización en función de la concentración de nanopartícula a diferente salinidad.



* Relación agua/aceite (WOR)=1, Volumen=5mL, Temperatura=21 ± 1°C, Surfactante = SDBS (0,1% m/v), Alcohol = 1-pentanol (2% v/v), Agua tipo I, Fase oleosa = n-heptano.