



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
TRABAJO ESPECIAL II



**“EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS SURFACTANTE-ACEITE-AGUA (SOW),
UTILIZANDO DIFERENTES ALCOHOLES COMO UNA TÉCNICA
PRELIMINAR PARA REMEDIAR MUESTRAS DE SUELO
CONTAMINADAS CON CRUDO LIVIANO
DE YARACAL, ESTADO FALCÓN”**

Tutor Académico:

Prof. : Juan C. Pereira

Elaborado por:

GARCÍA, Ana

C.I.: V-11.156.470

NAVARRO, Yoleida

C.I.: V-12.584.075

Valencia, Julio 2012



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
TRABAJO ESPECIAL II



**“EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS SURFACTANTE-ACEITE-AGUA (SOW),
UTILIZANDO DIFERENTES ALCOHOLES COMO UNA TÉCNICA
PRELIMINAR PARA REMEDIAR MUESTRAS DE SUELO
CONTAMINADAS CON CRUDO LIVIANO
DE YARACAL, ESTADO FALCÓN”**

*Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad de Carabobo para
optar al título de Ingeniero Químico*

Tutor Académico:

Prof. : Juan C. Pereira

Elaborado por:

GARCÍA, Ana

C.I.: V-11.156.470

NAVARRO, Yoleida

C.I.: V-12.584.075

Valencia, Julio 2012



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
TRABAJO ESPECIAL II



CONSTANCIA

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **“EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS SURFACTANTE-ACEITE-AGUA (SOW), UTILIZANDO DIFERENTES ALCOHOLES COMO UNA TÉCNICA PRELIMINAR PARA REMEDIAR MUESTRAS DE SUELO CONTAMINADAS CON CRUDO LIVIANO DE YARACAL, ESTADO FALCÓN”**, realizado por las bachilleres: Ana García, C.I: 11.156.470 y Yoleida Navarro C.I: 12.584.075 hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo y que no nos hacemos responsables de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación.

Prof. Juan Carlos Pereira
Tutor Presidente

Prof. Katuska Franceschi
Jurado

Prof. Yanet Finol
Jurado

Valencia, Julio 2012

AGRADECIMIENTOS

Alcanzar una meta requiere esfuerzo, dedicación, sacrificios, constancia, perseverancia; pero sobretodo de seres que te animen a seguir adelante cuando crees ya no poder. Es por ello, que nuestro agradecimiento está dirigido:

- ✓ Primeramente a nuestro Creador y Hacedor; Dios Todopoderoso, por fortalecer día a día nuestra vida y enseñarnos el camino a seguir. Gloria a ti Señor Jesús...!!!
- ✓ A nuestros padres por enseñarnos la ética, la moral y el rigor que guían nuestro transitar por la vida. Por cuidar con tanto amor y esmero a nuestros hijos mientras culminábamos esta meta.
- ✓ A nuestros hijos por querernos tanto y por que son la razón de nuestras vidas. Que el Señor nos los cuide, proteja y bendiga!!!
- ✓ A nuestros esposos por haber sido tan tolerantes, pacientes, comprensivos, porque sin su ayuda no hubiésemos alcanzado esta meta. Los amamos!!!
- ✓ A la ilustre Universidad de Carabobo y a la Facultad de Ingeniería, por habernos formado a través de una excelente educación.
- ✓ Al Profesor Juan Carlos Pereira por la oportunidad y confianza brindada, sabios consejos, guía, su gran aporte a la investigación, y muy especialmente por la calidad humana al comprender nuestra posición como madres primeramente.
- ✓ Al Licenciado Víctor Pérez por habernos brindado una gran ayuda para comenzar con los barridos de formulación. Por dedicar siempre un tiempo para atender nuestras necesidades y nunca tener un no como respuesta. Nos sentimos orgullosos de haber sido participe de sus consejos en el manejo y técnica adecuadas en el laboratorio.

- ✓ A nuestros amigos con los cuales compartimos muchas horas de arduo estudio para lograr pasar aquellas materias que tanto nos hicieron sufrir.

- ✓ A todas aquellas personas que de una u otra manera recibimos su ayuda en la investigación y pusieron su granito de arena en el trabajo. Los recordamos a cada uno de ustedes, de verdad muchísimas gracias a todos.....

García C. Ana J
Navarro S. Yoleida C

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo especial de grado primeramente, a Dios, porque siempre me acompaña y por todos los momentos tan maravillosos que he tenido junto a mi familia, así como por todas las bendiciones que me ha dado al enviarme ángeles que me muestran el camino a seguir para poder guiar a mis niños.

A mis padres, por encaminarme en el transitar de la vida, por enseñarme valores, por creer en mí, por apoyarme en todo momento.

A mis hermanos, Mónica, Rafael y Julio César que siempre nos hemos apoyado, ayudado, comprendido en las buenas y en las malas. Los quiero.

A mis hermosos ángeles, que llegaron en el momento justo de mi vida, son el tesoro que más quiero en este mundo, gracias mis niños por tenerme paciencia. Dios me los bendiga y proteja mis niños!!!

A mi esposo, que lo amo tanto y siempre doy gracias al Señor por que me puso en mi camino a este ser tan especial en mi vida, con el que he vivido momentos inolvidables. Te amo amor!!!

A mi compañera de tesis, por su amistad y compañerismo. Por escogerme como su compañera en la realización de este trabajo. Ana eres una persona luchadora, emprendedora que al igual que yo pensamos que la familia esta por encima de todo. Gracias amiga por confiar en mí.

A mi amiga Karla que siempre compartió conmigo sus sueños, tristezas, alegrías y sus conocimientos. Gracias amiga y éxitos para ti en esta nueva etapa de tu vida.

Yoleida Navarro

DEDICATORIA

Al Padre, Hijo y Espíritu Santo!!!

A mis padres, María Elisa y Orlando José, por la paciencia en estos largos años de carrera; la espera llego a su fin.

A mi hijo Héctor Daniel, la razón de mi existir.

A mi esposo Héctor Enrique, por ser el pilar fundamental en mi vida.

A mi hermana Ana Carolina, tienes razón querer es poder.

A mi hermano Dagny Daniel (+), lamentablemente tu presencia física no esta con nosotros pero se que estarías muy orgulloso de mi. Vivirás eternamente en nuestros corazones.

A mi sobrina Daniela Carolina, nunca dejes de luchar por tus sueños que el cielo sea el límite.

A mis sobrinos Dagnny Daniel y Angelo Alberto.

A mi ahijado Antonio José.

A mi compañera de tesis Yoleida Navarro, por su amistad y compañerismo. Por aceptar la invitación de emprender este trabajo juntas; amiga a pesar de las luchas, dificultades y obstáculos lo logramos. Éxito!!!

A todos mis amigos que coseche durante estos años de carrera que por falta de espacio no puedo nombrarlos individualmente.

A todos los que esperaron con paciencia esta meta.

ÍNDICE GENERAL

	pp.
ÍNDICE DE TABLAS.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
RESUMEN.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	6
1.2.1 Situación actual.....	7
1.2.2 Situación deseada.....	7
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Justificación.....	8
1.5 Limitaciones.....	9
CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Fundamentos teóricos.....	18
2.2.1 Surfactantes.....	18
2.2.2 Propiedades de los surfactantes.....	20
2.2.3 Tipos de surfactantes.....	21
2.2.4 Adsorción y agregación.....	24
2.2.5 Micelas.....	25
2.2.6 Concentración micelar crítica.....	26
2.2.7 Microemulsiones.....	28
2.2.8 Sistema surfactante-agua-aceite.....	29
2.2.9 Variables de composición y variables de formulación fisicoquímicas.....	30
2.2.10 Formulación de sistemas surfactante-agua-aceite.....	32
2.2.11 Comportamiento de fase.....	33
2.2.12 Teoría R de Winsor (relación R).....	36
2.2.13 Barrido de formulación.....	40
2.2.14 Formulación óptima.....	41
2.2.15 Desviación hidrofílica-lipofílica (HLD).....	42
2.2.16 Número de alcano equivalente (EACN).....	44
2.2.17 Técnicas de tratamiento en sustratos sólidos.....	46
2.2.18 Detergencia.....	55

	pp.
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	56
3.1 Tipo de investigación.....	56
3.2 Desarrollo sistemático de la investigación.....	57
3.2.1 Barridos de formulación de los sistemas surfactante-aceite-agua, empleando como variables: la salinidad de la fase acuosa y tipo de alcohol.....	57
3.2.2 Determinación de la influencia de diferentes alcoholes y las variaciones de sus concentraciones en los sistemas SOW.....	64
3.2.3 Determinación del número de alcano equivalente (EACN) del crudo de Yaracal, empleando el concepto de correlación (HLD) para la formulación óptima más adecuada.....	66
3.2.4 Evaluación del comportamiento de los sistemas SOW en las muestras de suelo contaminado.....	71
3.2.5 Planteamiento de alternativas de tratamiento a los suelos contaminados...	78
3.2.6 Selección de la alternativa más apropiada que mejor se adapte al proceso de remoción.....	80
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	83
4.1.1 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Propanol.....	86
4.1.2 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Pentanol.....	89
4.1.3 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Butanol.....	93
4.1.4 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 2-Butanol.....	96
4.1.5 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Hexanol.....	98
4.2.1 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 4,0%v/v 1-Pentanol.....	104
4.2.2 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 6,0%v/v 1-Pentanol.....	107
4.2.3 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 7,0%v/v 1-Pentanol.....	109
4.2.4 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 4,0%v/v 1-Butanol.....	111
4.2.5 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 6,0%v/v 1-Butanol.....	113
4.2.6 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 8,0%v/v 1-Butanol.....	115

	pp.
4.2.7 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 2,0%v/v 2-Butanol.....	118
4.2.8 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 4,0%v/v 2-Butanol.....	120
4.2.9 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 6,0%v/v 2-Butanol.....	122
4.2.10 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 8,0%v/v 2-Butanol.....	124
4.3.1 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Pentanol con crudo al 0,5%v/v.....	130
4.3.2 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Pentanol con crudo al 1,0%v/v.....	132
4.3.3 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Pentanol con crudo al 3,0%v/v.....	134
4.3.4 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 1-Pentanol con crudo al 5,0%v/v.....	136
4.4 Evaluación del comportamiento de los sistemas surfactante-aceite-agua en las muestras de suelo contaminados.....	138
4.5 Planteamiento de la(s) alternativa(s) de tratamiento a los suelos contaminados.....	149
4.6 Selección técnica de la(s) alternativa(s) más apropiadas que mejor se adapte al proceso de remoción.....	156
CONCLUSIONES.....	161
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162
APÉNDICE A. MODELOS MATEMÁTICOS Y CÁLCULOS TÍPICOS.....	167
A.1 Cálculo de la masa de surfactante o sal necesaria para preparar un volumen fijo de solución.....	167
A.2 Cálculo del porcentaje removido de crudo por cada sistema SOW formulado.....	168
A.3 Cálculo de los volúmenes de cloruro de sodio y de surfactante para añadir en cada uno de los tubos de ensayo calibrados y realizar los barridos de formulación.....	168
A.4 Cálculo del número de alcano equivalente.....	169
APÉNDICE B. DATOS DE SUELO LIMPIO Y CONTAMINADO.....	170
B.1 Análisis textural del suelo virgen y suelo contaminado.....	170
B.2 Análisis de fertilidad del suelo virgen y suelo contaminado inicial.....	170

	pp.
APÉNDICE C. TABLAS Y FIGURAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
C.1 Características físicas y químicas principales de los aceites, alcoholes y sales utilizados para la realización de los barridos de formulación.....	171
C.2 Valores de parámetro característico b y a para surfactantes no iónicos e iónicos y diversos alcoholes.....	172
C.3 Valores experimentales de los parámetros, α, σ, k, t de algunos surfactantes típicos.....	173
C.4 Valores de EACN de algunos aceites típicos.....	174
C.5 HLB de algunos surfactantes típicos.....	175
C.6 Relación de volumen de los componentes empleados para preparar los sistemas SOW con SDS al 1% p/v.....	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		pp.
2.1	Efecto de las variables fisicoquímicas sobre el comportamiento de fase en los sistemas SOW.....	36
2.2	Valores de EACN de algunos aceites típicos.....	45
3.1	Materiales y reactivos utilizados para realizar los barridos de formulación..	58
3.2	Relación de volumen de los componentes empleados para preparar los sistemas SOW con NaCl.....	61
3.3	Salinidades y volúmenes de las fases obtenidas en los sistemas SOW para diferentes tipos de alcoholes.....	62
3.4	Porcentaje de dilución y los volúmenes respectivos a partir de la solución madre.....	68
3.5	Salinidades y volúmenes de las fases obtenidas en los sistemas SOW para diferentes diluciones del crudo.....	69
3.6	Salinidades y volúmenes de las fases obtenidas en los sistemas SOW utilizando heptano como referencia.....	69
3.7	Modelo de matriz de selección.....	82
4.1	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Propanol al 5,2%v/v.....	87
4.2	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 5,2%v/v.....	90
4.3	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Butanol al 5,2%v/v.....	93
4.4	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2- Butanol al 5,2%v/v.....	96
4.5	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Hexanol al 5,2%v/v.....	98
4.6	Contenido de salinidad (%p/v), para la formulación óptima de los sistemas con SDS al 1%p/v y alcohol al 5,2%v/v.....	101
4.7	Salinidades óptimas de diversos alcoholes a distintas concentraciones....	104
4.8	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 4,0%v/v.....	105
4.9	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 6,0%v/v.....	107
4.10	Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 7,0%v/v.....	109

Tabla	pp.
4.11 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Butanol al 4,0%v/v.....	111
4.12 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Butanol al 6,0%v/v.....	113
4.13 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Butanol al 8,0%v/v.....	116
4.14 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2- Butanol al 2,0%v/v.....	118
4.15 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2- Butanol al 4,0%v/v.....	120
4.16 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2- Butanol al 6,0%v/v.....	122
4.17 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2- Butanol al 8,0%v/v.....	124
4.18 Salinidades y volúmenes de las fases obtenidas del sistema de referencia	128
4.19 Valores de porcentaje de salinidad óptima y EACN para cada barrido de referencia analizado.....	129
4.20 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 5,2%v/v/Crudo al 0,5%v/v.....	130
4.21 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 5,2%v/v/Crudo al 1%v/v.....	132
4.22 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 5,2%v/v/Crudo al 3%v/v.....	134
4.23 Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1- Pentanol al 5,2%v/v/Crudo al 5%v/v.....	136
4.24 Contenido inicial de materia orgánica, para el suelo de referencia y contaminado, por extracción con solvente.....	141
4.25 Peso del suelo contaminado en los tubos de ensayo calibrado de 5 mL.....	141
4.26 Resultados obtenidos del suelo limpio con los diferentes sistemas SOW formulados.....	142
4.27 Resultados obtenidos en el tratamiento del suelo contaminado con los distintos sistemas SOW formulados con SDS al 1% p/v con 1-pentanol y 1-butanol a diferentes concentraciones.....	143
4.28 Resumen de las características de los sistemas de tratamiento a los suelos contaminados.....	153
4.29 Porcentaje y puntaje de cada criterio empleado para el uso de la matriz de selección.....	158
4.30 Ponderación de cada criterio empleado para el uso de la matriz.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		pp.
1.1	Suelo contaminado con crudo liviano en Yaracal, Estado Falcón.....	4
1.2	Pozo emanando crudo liviano espontáneamente en Yaracal, Estado Falcón.....	6
2.1	Estructura de una molécula de surfactante.....	19
2.2	Variación de la tensión superficial en función de la concentración de surfactante.....	20
2.3	Estructura de dos surfactantes no iónicos.....	22
2.4	Estructura de la molécula de surfactante Dodecil Sulfato de Sodio.....	24
2.5	Micelas en solución.....	25
2.6	Diversas estructuras producidas por la asociación de surfactantes.....	26
2.7	Diversos tipos de solubilización micelar.....	27
2.8	Tipos de emulsiones simples.....	30
2.9	Diagrama ternario típico para un sistema Agua-Aceite-Surfactante.....	31
2.10	Comportamiento de fase, relación R y tipos de estructuras de acuerdo al modelo de Winsor.....	34
2.11	Interacciones moleculares involucradas en el R de Winsor.....	38
2.12	Relación entre el valor de R, la curvatura y el tipo de emulsión asociada...	38
2.13	Comportamiento de fase en un barrido de formulación.....	41
2.14	Influencia de la salinidad sobre los diagramas de fase, el aspecto de los tubos de ensayo y las tensiones interfaciales.....	43
2.15	Tamaño de gota en una emulsión.....	47
2.16	Tamaño de gota en una solución micelar.....	50
2.17	Tamaño de gota en una microemulsión.....	52
3.1	Equipo de ultrasonido para bajar la espuma formada al preparar la solución madre de SDS para su posterior enrase.....	59
3.2	Procedimiento para preparar las soluciones madre.....	60
3.3	Visualización de la fase intermedia (microemulsión) para determinar la salinidad óptima.....	63
3.4	Envase que contiene el crudo extraído del Mene de San Lorenzo suministrado por el laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD).....	67

Figura		pp.
3.5(a)	Sistemas óptimos formulados para extraer la microemulsión formulada con 1-Pentanol.....	71
3.5(b)	1-Butanol a diferentes concentraciones.....	71
3.6(a)	Extracción de la microemulsión mediante una pipeta graduada.....	72
3.6(b)	Frascos contentivos de las microemulsiones extraídas de los cilindros graduados de los diferentes sistemas estudiados.....	72
3.7	Muestras de suelo contaminado con crudo en contacto con la solución limpiadora (sistemas SOW) antes de la agitación mecánica.....	73
3.8	Equipo utilizado para la agitación mecánica ubicado en el laboratorio PHD.....	73
3.9(a)	Suelo contaminado con la solución limpiadora (sistema SOW) luego de 4h de agitación y 24h de reposo.....	74
3.9(b)	Procedimiento de extracción del líquido sobrenadante después del tratamiento del suelo con los sistemas SOW.....	74
3.10	Extracción de la solución con la pipeta Pasteur por succión luego de la agitación mecánica.....	75
3.11	Filtrado y lavado del suelo con acetona para eliminar el exceso de SOW..	75
3.12(a)	Procedimiento para pesar la muestra de suelo contaminada con crudo....	75
3.12(b)	Suelos tratados con los sistemas SOW.....	75
3.13	Muestras de suelo contaminado (SC) y suelo de referencia (SR), tamizados.....	76
3.14	Equipo Soxleth para extracción con solvente.....	76
3.15	Estufa empleada para el secado del sólido.....	77
3.16	Espectrofotómetro de FTIR.....	78
4.1	Barrido de formulación unidimensional similar al empleado experimentalmente.....	84
4.2(a)	Vista del efecto Tyndall.....	85
4.2(b)	Paso del haz de luz donde el surfactante se encuentra en la fase acuosa.	85
4.3	Kerosene filtrado para eliminar impurezas.....	86
4.4	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-propanol donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	87
4.5	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Propanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	89

Figura		pp.
4.6	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Pentanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	91
4.7	Apreciación del menisco plano formado en la microemulsión/agua y microemulsión/aceite.....	92
4.8	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Pentanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	92
4.9	Barrido de formulación unidimensional del 1-Butanol al 5,2%v/v.....	94
4.10	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Butanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	95
4.11	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 2-Butanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	97
4.12	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 2-Butanol, donde se indica la formación sólo de sistemas bifásicos en un rango de [1-8] %p/v de NaCl.....	97
4.13	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 2-Butanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	98
4.14	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Hexanol, donde se aprecia sólo la formación de sistemas bifásicos en un rango de salinidad de [0,2-1,0] %p/v de NaCl.....	99
4.15	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Hexanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	100
4.16	Comportamiento de diversos alcoholes a la concentración de 5,2 %v/v...	102
4.17	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Pentanol al 4%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	106
4.18	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Pentanol al 4%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	106
4.19	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Pentanol al 6%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	108

Figura		pp.
4.20	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Pentanol al 6%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	108
4.21	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Pentanol al 7%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	110
4.22	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Pentanol al 7%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	110
4.23	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Butanol al 4%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	112
4.24	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Butanol al 4%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	112
4.25	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Butanol al 6%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	114
4.26	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Butanol al 6%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	115
4.27	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-Butanol al 8%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).....	117
4.28	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 1-Butanol al 8%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.....	117
4.29	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 2-Butanol al 2%v/v, donde se aprecia sólo la formación de sistemas bifásicos en un rango de salinidad de [1,0-8,0] %p/v de NaCl.....	119
4.30	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 2-Butanol al 2%v/v donde se indica la ubicación de sólo sistemas bifásicos (Winsor II)	119
4.31	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 2-Butanol al 4%v/v, donde se aprecia sólo la formación de sistemas bifásicos en un rango de salinidad de [9,0-16,0] %p/v de NaCl.....	121
4.32	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 2-Butanol al 4%v/v, donde se indica la ubicación de sólo sistemas bifásicos (Winsor II)	121

Figura		pp.
4.33	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 2-Butanol al 6%v/v, donde se visualiza la formación de bifásicos y trifásicos en el sistema.....	123
4.34	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 2-Butanol al 6%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado.....	123
4.35	Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 2-Butanol al 8%v/v, donde se visualiza la formación de bifásicos y trifásicos en el sistema.....	125
4.36	Barrido de formulación obtenido experimentalmente para el 2-Butanol al 8%v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado.....	125
4.37	Salinidades óptimas obtenidas para el 1-pentanol y 1-butanol a diferentes concentraciones.....	126
4.38	Barrido de formulación unidimensional del 1-Pentanol al 5,2%v/v con crudo al 0,5%v/v.....	131
4.39	Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1%p/v, 0,5%v/v de crudo y 5,2%v/v de 1-Pentanol.....	131
4.40	Barrido de formulación unidimensional del 1-Pentanol al 5,2%v/v con crudo al 1%v/v.....	133
4.41	Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1%p/v, 1%v/v de crudo y 5,2%v/v de 1-Pentanol.....	133
4.42	Barrido de formulación unidimensional del 1-Pentanol al 5,2%v/v con crudo al 3%v/v.....	135
4.43	Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1%p/v, 3%v/v de crudo y 5,2%v/v de 1-Pentanol.....	135
4.44	Barrido de formulación unidimensional del 1-Pentanol al 5,2%v/v con crudo al 5%v/v.....	137
4.45	Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1%p/v, 5%v/v de crudo y 5,2%v/v de 1-Pentanol.....	137
4.46 a	Ubicación de la zona de muestreo, Yaracal- Edo. Falcón.....	139
4.46 b	Identificación del pozo en el lugar del muestreo.....	139
4.47	Condición ambiental en que se encuentra el área afectada por derrame de crudo liviano, Yaracal-Falcón.....	139
4.48	Comparación del color del suelo lavado con la mezcla de solventes y el suelo de referencia (limpio).....	140

Figura		pp.
4.49	Solubilización del sistema SDS/agua/NaCl/kerosene/ 5,2% v/v de 1-pentanol.....	144
4.50	Espectro de absorción de infrarrojo del suelo contaminado con crudo liviano de Yaracal.....	145
4.51	Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-pentanol al 5,2%v/v.....	145
4.52	Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-pentanol al 6%v/v.....	146
4.53	Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-pentanol al 7%v/v.....	146
4.54	Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 4%v/v.....	147
4.55	Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 5,2%v/v.....	147
4.56	Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 6%v/v.....	148
4.57	Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 8%v/v.....	148

RESUMEN

El presente trabajo especial de grado fue planteado con la finalidad de evaluar los sistemas surfactante-aceite-agua (SOW) mediante el uso de diferentes alcoholes como una técnica preliminar para remediar muestras de suelo contaminadas con crudo liviano proveniente de Yaracal, Estado Falcón.

Para el desarrollo de la investigación se efectuaron barridos de formulación, identificando la salinidad óptima, se determinó la influencia de diferentes alcoholes mediante las variaciones de sus concentraciones para obtener su comportamiento. Posteriormente se determinó el número de alcano equivalente (EACN) para caracterizar el aceite utilizado, se evaluó el comportamiento de los sistemas SOW determinando el porcentaje de remoción del crudo, generándose alternativas de tratamiento a los suelos contaminados más eficientes para la remoción, y seleccionando la que mejor se adapte al proceso.

El logro más importante de la investigación realizada fue proponer una formulación SOW de manera que remueva la mayor cantidad de crudo en forma más eficiente de acuerdo al tipo de alcohol utilizado, mejorando la calidad y preservación del medio ambiente.

Una de las conclusiones de mayor relevancia es que la formulación SOW para la remoción de crudo más eficiente fue la microemulsión del sistema SDS/agua/NaCl/kerosene/5,2 %v/v de 1-Pentanol presentando un valor de $(90,06 \pm 0,05)$ %, además que para los sistemas SOW donde se emplea disoluciones de crudo, se observó una tendencia creciente del EACN directamente proporcional a la salinidad óptima.

Se concluye además que la alternativa seleccionada como propuesta de tratamiento a los suelos contaminados es empleando una microemulsión para el mejoramiento de éstos.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como propósito evaluar los sistemas surfactante-aceite-agua (SOW) utilizando diferentes alcoholes como una técnica preliminar para remediar muestras de suelo contaminadas con crudo liviano de Yaracal, estado Falcón, para lo cual se realiza barridos de formulación empleando como variables la salinidad de la fase acuosa y tipo de alcohol, así como determinar la influencia de éste y las variaciones de sus concentraciones en los sistemas SOW. Asimismo, determinar el número de alcano equivalente (EACN) del crudo de Yaracal, empleando el concepto de correlación de desviación hidrofílica-lipofílica (HLD), evaluar el comportamiento de los sistemas SOW en las muestras de suelo contaminado a fin de determinar el porcentaje de remoción del crudo. Finalmente, se plantea la(s) alternativa(s) de tratamiento a los suelos contaminados y seleccionar técnicamente la(s) alternativa(s) que mejor se adapte al proceso de remoción.

Para el logro de los objetivos planteados, primeramente se prepara soluciones madre de cloruro de sodio y del surfactante dodecil sulfato de sodio, utilizando agua destilada para su disolución, de la misma manera se preparó una solución madre con crudo proveniente del Mene de San Lorenzo utilizando kerosene para su disolución. Por consiguiente, se realiza barridos de formulación con la finalidad de identificar la condición óptima en el sistema, donde la variable a cambiar fue el contenido de sal y el tipo de alcohol por un lado; y el contenido de sal y la concentración de alcohol por otro. Asimismo, se pone en contacto el suelo contaminado con crudo con las salinidades óptimas de los diversos sistemas formulados para determinar la cantidad de crudo removido en cada caso.

En la actualidad, el empleo de sistemas SOW permite un avance en el empleo de tecnologías y productos desarrollados por la industria química para la remoción de contaminantes orgánicos presentes en el suelo, teniendo la ventaja de ser producidas en la industria de manera que permite un avance en lograr cantidades de la materia activa cuando así se requiera y con ello preservar el ambiente.

El trabajo se encuentra constituido por cuatro capítulos, en el primero (Planteamiento del Problema) se presenta la problemática que da origen a la investigación por medio de la descripción de la situación actual y la deseada, se justifica la investigación y se proponen objetivos para alcanzar el propósito de la misma. En el segundo capítulo (Marco Referencial Teórico) se encuentran las bases teóricas y los antecedentes. En el capítulo III (Marco Metodológico) se describe detalladamente las actividades para el logro de los objetivos. En el capítulo IV (Discusión y Análisis de Resultados) donde se exponen y analizan los resultados obtenidos luego del desarrollo de las herramientas metodológicas propuestas. Por último se encuentra las conclusiones, apéndices y referencias bibliográficas.

La importancia del estudio radica en que los compuestos conocidos como surfactantes o tensoactivos y las microemulsiones, han llegado a tener especial interés en los diversos campos de la ciencia y la tecnología, desde la industria petrolera en procesos como la orimulsión hasta la industria de los alimentos, pasando por la industria de agricultura, cosméticos y farmacéuticas. Ambos conceptos presentan numerables y potenciales aplicaciones como se mencionó anteriormente, pero además también se utilizan en la dosificación y transporte de medicamentos dentro del organismo, la recuperación mejorada de crudo, la elaboración de productos de higiene y remediación ambiental, son sólo algunos ejemplos de las posibilidades que existen en este campo. Es por esto que, con el paso del tiempo, el estudio de estos sistemas va captando mayor interés.



CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se conocerá el problema en estudio, donde se detalla su finalidad, la situación actual y deseada, así mismo el objetivo general y los específicos de la investigación. Además se presentan las razones que justifican la investigación y las limitaciones de la misma.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El petróleo es la fuente principal de energía para muchas actividades humanas de la sociedad actual, tales como la industria, el transporte, la minería, entre otros. El petróleo y sus productos de refinación no son sustancias específicas y únicas, puesto que son mezclas de varios hidrocarburos y otros compuestos cuyas propiedades físicas y químicas son muy variados. Este hecho determina su comportamiento e impacto en los elementos ambientales (recursos físicos, recursos biológicos y actividades socioeconómicas) cuando ocurre un derrame.

Se considera derrame o fuga de hidrocarburos a todo vertimiento o descarga de éstos en el ambiente, lo que origina que los hidrocarburos mencionados escapen del control de quienes los manipula. Después que ocurre un derrame o fuga de hidrocarburos su comportamiento físico es un factor trascendental a considerar para evaluar los peligros sobre el ambiente. El conocimiento de estos procesos y la interacción que se da entre ellos es esencial para tomar apropiadas decisiones de respuesta a derrames.

Un derrame o descarga de hidrocarburo afecta básicamente a dos elementos del ambiente, los cuales son: elementos abióticos (suelo, formaciones del relieve, geomorfología, entre otros) y elementos bióticos (flora y fauna). El petróleo contamina el suelo por su presencia y su permanencia en él, Figura 1.1. Esto depende del tipo de suelo lo cual es un producto de su composición y textura (tamaños de las partículas que lo forman) ya que según las características del suelo el petróleo penetrará con mayor o menor fuerza y por lo tanto permanecerá mayor o menor tiempo en ese ambiente.



Figura 1.1 Suelo contaminado con crudo liviano en Yaracal, Estado Falcón

Por lo tanto, siempre que se produzca un derrame o fuga se deberá adoptar las acciones inmediatas tendientes a la reparación, recuperación y/o limpieza necesarias del área afectada. Dentro de estas técnicas de respuesta, se encuentra el uso de dispersantes de derrame de hidrocarburos. En los últimos tiempos se ha logrado avances significativos tanto en el campo de los dispersantes como en sus técnicas de aplicación.

El componente clave de un dispersante es un agente superficial activo (surfactante), el cual tiene una estructura molecular tal que una parte de la molécula tiene una afinidad por el aceite (lipofílico) y el otro tiene una afinidad por el agua (hidrofílico). Cuando el crudo alcanzó precios muy altos a finales de los años 70, se desarrollaron formulaciones en sistemas Surfactante-Aceite-Agua (SOW) por sus siglas en inglés, que permitieran vencer las fuerzas capilares para aumentar la extracción del crudo restante en los pozos, que eran considerados ya agotados según los métodos tradicionales de explotación petrolera (Salager, y col. 1979).



La formulación de un sistema SOW, consiste en la adecuada combinación de los componentes de una emulsión, que puede permitir el manejo de la estabilidad de sistemas inmiscibles y lograr solubilizar aceite en agua; además también pudiera ser aplicable debido a sus propiedades de detergencia, para la remoción de crudo en la superficie de suelos contaminados por derrames.

Generalmente, los sistemas SOW se formulan con alcoholes, los cuales tienen una doble función: por un lado actúan como co-surfactantes o cosolventes, reduciendo o eliminando las estructuras de geles o cristales líquidos que tienden a formar los surfactantes puros, y por la otra tienen influencia en el balance de afinidad entre el surfactante y su ambiente fisicoquímico. El efecto de esta variable depende de su estructura y de la concentración. En muchos casos contribuye a incrementar la lipofilicidad de la mezcla de surfactantes en la interfase, lo cual conlleva a una transición en el comportamiento de fase, de allí la importancia de estudiar dicha variable.

En el estado Falcón, específicamente en la comunidad de Yaracal, se encuentra una zona petrolera que está inactiva desde hace más de treinta y cinco años. Con un inventario mayor a doscientos cincuenta pozos fuera de servicio. Dichos pozos, Figura 1.1, se encuentran actualmente emanando crudo liviano de forma espontánea ocasionando un impacto ambiental significativo, Figura 1.2 afectando la salud de los habitantes de la región, contaminando además, las cuencas de agua superficial y subterráneas cercanas.



Figura 1.2. Pozo emanando crudo liviano espontáneamente en Yaracal, Estado Falcón

Por lo expuesto anteriormente, y considerando la importancia que reviste el tratamiento de las zonas afectadas por derrames de crudo, como el caso específico antes mencionado, surge la necesidad de evaluar formulaciones de sistemas Surfactante-Aceite-Agua (SOW), con diferentes tipos de alcoholes a diferentes concentraciones para la recuperación o remoción del crudo contenido en suelos contaminados (Fernández, y Col. 2006).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente en el sector denominado “El Mene de San Lorenzo” en la población de Yaracal del Estado Falcón, se encuentra afectada con la emanación espontánea de crudo de algunos pozos deshabilitados hace treinta y cinco años por la industria petrolera nacional. Esto genera contaminación al ambiente, se pueden mencionar: daños al suelo; porque los hidrocarburos tiene un pronunciado efecto sobre las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de éste, pudiendo impedir o retardar el crecimiento de la vegetación sobre el área contaminada, cuencas de agua superficial y subterráneas cercanas, flora, fauna, además, de afectar la salud de los habitantes de la región.



Por tal motivo, se plantea una alternativa de remediación con el uso de sistemas Surfactantes-Aceite-Agua (SOW) que permitan una remoción del crudo liviano contenido en el suelo de la zona del Mene de San Lorenzo, en la población de Yaracal del estado Falcón, reduciendo así el daño ambiental por el vertido del crudo.

1.2.1. SITUACIÓN ACTUAL

El sector denominado “El Mene de San Lorenzo” en la población de Yaracal del Estado Falcón, se encuentra afectada con la emanación espontánea de crudo liviano, generando contaminación al ambiente, tales como: daños al suelo, cuencas de agua superficial y subterráneas cercanas, flora, fauna, además, de afectar la salud de los habitantes de la región. Esta situación representa un deterioro en la conservación y preservación del medio ambiente, además en la calidad de vida de sus residentes.

1.2.2. SITUACIÓN DESEADA

La comunidad del sector “El Mene de San Lorenzo” en la población de Yaracal del Estado Falcón, requiere disponer de un tratamiento de las zonas afectadas por derrames de crudo, que logre la recuperación de los suelos, mejorando la flora, fauna y la calidad de vida en sus habitantes.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar los sistemas Surfactante-Aceite-Agua (SOW), utilizando diferentes alcoholes como una técnica preliminar para remediar muestras de suelo contaminadas con crudo liviano de Yaracal, Estado Falcón a fin de reducir los efectos de contaminación.



1.3.2. Objetivos específicos

1. Realizar barridos de formulación a los sistemas surfactante-aceite-agua, empleando como variables: la salinidad de la fase acuosa y tipo de alcohol, con la finalidad de encontrar la salinidad óptima.
2. Determinar la influencia de diferentes alcoholes y las variaciones de sus concentraciones en los sistemas surfactantes-aceite-agua, con el propósito de obtener el comportamiento de la salinidad óptima.
3. Determinar el número de alcano equivalente (EACN) del crudo de Yaracal, empleando el concepto de correlación para la formulación óptima de Desviación Hidrofilica-Lipofilica (HLD), con el propósito de caracterizar el aceite utilizado.
4. Evaluar el comportamiento de los sistemas surfactante-aceite-agua en las muestras de suelo contaminado, a fin de determinar el porcentaje de remoción del crudo.
5. Plantear la(s) alternativa(s) de tratamiento a los suelos contaminados, con el fin de obtener diferentes opciones para el mejoramiento de éstos.
6. Seleccionar técnicamente la(s) alternativa(s) más apropiada(s) que mejor se adapte al proceso de remoción.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Con el presente proyecto se pretende determinar las condiciones más adecuadas para la formulación de sistemas surfactantes-agua-aceite (SOW) que permitan lograr la remoción del crudo liviano contenido en el suelo de la zona del Mene de San Lorenzo,



en la población de Yaracal del estado Falcón, lo cual representa una mejora al disminuir el daño ambiental originado por las emanaciones de crudo.

Por otro lado, durante el proceso para alcanzar los objetivos planteados, se necesitarán realizar actividades y estudios que refuercen gran parte de los conocimientos previamente adquiridos en diferentes asignaturas cursadas en la Universidad, desarrollando aptitudes y habilidades que complementen la plataforma de estudios académicos.

Cabe destacar que con esta investigación igualmente se está realizando un aporte para nuevos proyectos e investigaciones relacionadas con las formulaciones de los sistemas surfactantes-agua-aceite (SOW), estableciendo una metodología que se puede generalizar, otorgando ayuda a proyectos involucrados en la misma área, ampliando así los conocimientos a nuevos estudiantes tanto de la Universidad de Carabobo como de otras instituciones académicas.

1.5. LIMITACIONES

Dentro de las limitaciones más notorias que se pueden mencionar y que pudiesen estar dificultando la realización del presente trabajo de grado es la aplicación de la técnica de remoción in situ, sólo se realizará a nivel de laboratorio.



CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo contempla el resumen de todas las investigaciones consultadas como antecedentes del proyecto en estudio incluyendo sus principales hallazgos, además se anexan los fundamentos teóricos necesarios con la finalidad de facilitar al lector la comprensión del trabajo de investigación.

2. 1 ANTECEDENTES

En esta sección se resumen de manera detallada los trabajos nacionales e internacionales, realizados anteriormente que sirven de base o guía para llevar a cabo la presente investigación, en los cuales figuran los objetivos alcanzados, sus conclusiones, así como también las semejanzas y diferencias que presentan con respecto al proyecto a realizar.

Chirino, S José (2011). Estudió el número de alcano equivalente (EACN) para diferentes hidrocarburos a través de barridos de formulación de diversos sistemas surfactante-agua-aceite. En el presente trabajo se procedió a determinar el número de alcano equivalente (EACN) de diversos hidrocarburos para sistemas surfactante-agua-aceite, variando como parámetro de formulación la salinidad (porcentaje de cloruro de sodio en el barrido); al igual que el tipo de aceite, el alcohol y el surfactante, empleando para ello un surfactante aniónico SDBS (Dodecilbenceno sulfonato de sodio) y una serie de olefinas que fueron desde C_8 hasta C_{18} .

Para ese fin se recurrió a la formulación de microemulsiones por el método Desviación Hidrofílica-Lipofílica (HLD). Dicha metodología consistió en conseguir para un sistema surfactante-agua-aceite a través de un barrido y variando un parámetro de formulación, la condición de formulación óptima, la cual fue aquella donde una microemulsión media contiene cantidades iguales de agua y de aceite, que es experimentalmente y termodinámicamente bien definida y en la que la solubilización simultánea de agua y de aceite es máxima para una cantidad dada de surfactante y las tensiones interfaciales, microemulsión-agua y microemulsión-aceite son ambas



ultrabajas. Una vez conseguida la condición de formulación óptima se procedió a determinar el parámetro de número de alcano equivalente mediante la fórmula del concepto de Desviación Hidrofílica-Lipofílica (HLD) para surfactantes aniónicos.

El propósito de esta investigación fue caracterizar las propiedades interfaciales del kerosene mediante el número de alcano equivalente (EACN), al igual que ahondar en sus aplicaciones; entre las cuales destacan: la limpieza de suelos, síntesis de nanopartículas, formación de microemulsiones y la detergencia. La finalidad de la caracterización del kerosene, así como del heptano, mediante el método de Desviación Hidrofílica-Lipofílica (HLD), fue la de validar dicha metodología y garantizar de esta forma, que los posteriores análisis de las muestras olefínicas arrojaran valores correctos y satisfactorios. A su vez es de gran importancia destacar que una vez determinado el número de alcano equivalente (EACN) de las olefinas estudiadas, se puede analizar sus propiedades características y eficiencia para su posterior empleo como materias primas a nivel industrial de surfactantes. Al igual que se comparó cuantitativamente las influencias y contribuciones relativas de cada uno de los parámetros en los barridos de formulación efectuados, para la posterior formulación de microemulsiones con propiedades específicas “a la medida” de sistemas surfactante-agua-aceite.

Entre las conclusiones destacan que la determinación del parámetro sigma para el surfactante SDBS mediante un barrido unidimensional de formulación se emplea para caracterizar sus propiedades físicas, además que los barridos de referencia se efectuaron con la finalidad de observar, analizar y caracterizar las contribuciones de todas las especies presentes en el sistema, aparte de validar la eficiencia del método del HLD. Por otro lado, que la mezcla de alcoholes (70% 2-propanol y 30% 1-butanol) no fue la más idónea, ya que su tendencia hidrofílica requería emplear considerables cantidades de sal para ubicar las diversas formulaciones óptimas en los barridos de referencia realizados y por último que el 1-pentanol fue el alcohol seleccionado, porque para alcanzar la formulación óptima en los sistemas contribuyó de gran manera la naturaleza lipofílica de este alcohol.



Este antecedente presenta similitud con la investigación que se va a llevar a cabo en cuanto a la metodología aplicada para determinar del número de alcano equivalente del crudo de Yaracal, empleando el concepto de correlación para la formulación óptima de Desviación Hidrofílica-Lipofílica. La diferencia con este trabajo de investigación es que la correlación se realizará variando sólo la salinidad, manteniendo constante la concentración de alcohol y surfactante.

García, A y Ceballos, S (2010). Evalúan sistemas surfactante-agua-aceite en la formación espontánea de emulsiones. Este trabajo plantea como objetivo principal la evaluación de sistemas surfactante-aceite-agua en la formación espontánea de emulsiones. Para el desarrollo de la misma, se establecieron diversos sistemas surfactante-aceite-agua, evaluando así el efecto de aditivos hidrofílicos y lipofílicos (alcohol). Cierta cantidad de éstos son colocados en contacto con el agua para estudiar el proceso de emulsión espontánea. Todo ello se realizó mediante dos métodos de emulsificación, los cuales se conocen como método de la gota y método industrial. De igual manera, se evaluaron el tamaño de gota mediante microscopía óptica, obteniéndose además mediante un analizador de tamaño de partículas por difracción de luz láser, la luz láser, la distribución de tamaños de gotas de cada uno de los sistemas emulsionados. Posteriormente, estudiaron el efecto de la salinidad en la fase acuosa sobre el proceso de emulsión espontánea, mediante un barrido de salinidad.

Cabe destacar, que la presente investigación es de gran importancia, ya que permite obtener sistemas adecuados de mezclas de agua-aceite-surfactante para que se lleve a cabo la emulsión; evaluando el tamaño de las gotas formadas, sin emplear energía mecánica adicional (emulsión espontánea).

Este antecedente presenta similitud con la investigación a realizar en cuanto a que se realizará un barrido de salinidad utilizando un aditivo hidrofílico y lipofílico (alcohol). Por otro lado, la diferencia de este antecedente con la investigación a



desarrollar radica en el hecho de que no se evaluara el tamaño de gotas formadas en el sistema.

Pérez, Víctor M (2009). En su estudio de la formulación de sistemas surfactante-aceite-agua como alternativa en la remediación de suelos contaminados con crudo liviano de Yaracal estado Falcón. El presente trabajo especial de grado fue planteado con la finalidad de estudiar las propiedades detergentes que presentan los sistemas emulsionados surfactante-aceite-agua (SOW por sus siglas en inglés), como las soluciones micelares, emulsiones y microemulsiones.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon sistemas formulados con SDS y SDBS al 10% p/v, usando como aceite, un corte de kerosene filtrado y caracterizado, para un volumen total del sistema de 10,0 mL. También, se emplearon como co-surfactantes los alcoholes 1-Pentanol y una mezcla de 1-Butanol con 1-Pentanol, respectivamente para los sistemas de cada surfactante y para la mezcla en relación 1:1 de ambos.

El logro más importante de esta investigación realizada fue mostrar el poder detergente y de solubilización que tienen los sistemas SOW, en la remoción de petróleo contenido en un suelo contaminado por emanación espontánea de crudo, extraído de una zona impactada ambientalmente.

Una de las conclusiones de mayor relevancia es que los sistemas formulados por sus características físicas y químicas, presentaron una capacidad de solubilización y detergencia de manera espontánea. Se concluye además que para la mezcla de los dos surfactantes iónicos, se encontró bajo desempeño, el cual se mantuvo alrededor de $(40,00 \pm 0,05)\%$, mientras que la microemulsión del SDS, resultó ser la de mayor desempeño presentando un valor de $(95,43 \pm 0,05)\%$, en comparación con el resto de las formulaciones.



Este proyecto es de utilidad para la investigación que se presenta, debido a que es el único con el que se cuenta como punto de referencia para esta investigación en el Mene de San Lorenzo de Yaracal estado Falcón existiendo una similitud notable en cuanto a la necesidad de evaluar los sistemas surfactante-aceite-agua mediante barridos de formulación, además de determinar el contenido de crudo presente en las muestras de suelo, antes y después del tratamiento de remediación, así como el aporte de datos experimentales puntuales de la zona.

La diferencia con este trabajo radica en el hecho de que se va a centrar en realizar los barridos de formulación para diferentes alcoholes a diversas concentraciones y no se va a realizar mezcla alguna entre ellos, así como el cálculo del número de alcano equivalente (EACN) del crudo empleando el concepto de correlación para la formulación óptima de Desviación Hidrofílica-Lipofílica (HDL) del corte de aceite utilizado.

Barrios, L y Polychroniadis, C (2009). Evalúan del proceso de biorremediación de un suelo en la degradación de hidrocarburos saturados y aromáticos empleando bioestimulación. Este antecedente tuvo como propósito principal la evaluación del proceso de biorremediación de un suelo ubicado en la cercanía de la población del Mene de Yaracal, estado Falcón, proponiendo la degradación de las fracciones de hidrocarburos saturados y aromáticos, con el fin de disminuir los contaminantes presentes y lograr la recuperación del suelo. Realizaron una inspección de la región, verificando el brote de crudo en el lugar e identificaron la zona. Por otra parte, seleccionaron los factores fisicoquímicos más influyentes en la caracterización inicial del suelo, y finalmente monitorearon el grado de remoción de los hidrocarburos saturados y aromáticos al transcurrir 30 días, para dos tratamientos evaluados, donde para ambos analizaron las curvas de crecimiento bacteriano.

Este antecedente es de gran importancia para la presente investigación, ya que se aportan datos experimentales de caracterización del suelo contaminado, el suelo



virgen y del crudo de la zona en estudio. Sin embargo, la diferencia radica en el hecho de que sólo se trabajara con una muestra puntual de la zona, mientras que en este trabajo realizaron el muestreo en un área representativa.

Velázquez, C. Josmary, A (2008). Caracterizan y estudian el comportamiento de fase de surfactantes estirados con cabeza polar de sulfato de sodio. Este trabajo tuvo como propósito caracterizar un grupo de surfactantes estirados, consistentes en una cadena alquílica ramificada, estirados con grupo propoxilados y con cabeza polar de sulfato de sodio, donde se evalúan sus comportamientos fase por medio de barridos múltiples de salinidad, ACN, concentración de alcohol, número promedio de grupos propoxilados en la molécula de surfactante y SACN. De igual forma, se evalúa la solubilización lograda, es decir, la cantidad de agua y/o aceite disuelto en el sistema trifásico por gramo de surfactante.

Los resultados obtenidos muestran que los grupos propoxilados confieren mayor lipofilidad a la molécula de surfactante e incrementan su capacidad de solubilización. Por otro lado, que los surfactantes estirados evaluados, los cuales son muestras no comerciales, parecen cumplir con la relación de la formulación óptima (HDL) para surfactantes aniónicos, aunque se requiere un mayor número de muestras de referencias, mejor definidas para garantizar una caracterización en forma numérica.

Este antecedente presenta similitud con la investigación que se va a llevar a cabo en cuanto a la determinación de los parámetros característicos (σ y k) del surfactante utilizado, empleando las técnicas de barrido de formulación y basándose en la Desviación Lipofílica-Hidrofílica (HDL) del surfactante. La diferencia está en que se caracterizó un grupo de cuatro surfactantes aniónicos estirados con grupos propoxilados, mientras que en este trabajo sólo se caracterizara un surfactante.

Salager, Jean L y Colaboradores (2008), Microemulsiones para la recuperación mejorada de crudo y la limpieza de pozos. En esta investigación estudiaron



microemulsiones para la recuperación mejorada de crudo y para la limpieza de pozos. Por otro lado, lograron obtener tensiones interfaciales ultrabajas, para limpieza y el aumento de permeabilidad de pozos con crudo. Concluyendo que los sistemas basados en microemulsiones son termodinámicamente estables, y que exhiben una viscosidad baja y producen tensiones ultrabajas con el agua y aceite, además que la combinación entre tensiones y estabilidad bajas de las emulsiones formadas, permiten una mejora muy significativa en la recuperación del petróleo. Por otra parte, una concentración suficientemente alta del surfactante, se utiliza para limpiar pozos de crudo, por el aumento significativo de la permeabilidad.

Este estudio representa un aporte significativo en la realización del presente trabajo de investigación, ya que indica la importancia de las microemulsiones en la remoción de crudo de sustratos sólidos, la diferencia es que en el trabajo a desarrollar no se realizará limpieza de pozo alguno.

Sumit, K Kiran y Colaboradores (2008). Evaluating the hydrophilic-lipophilic nature of asphaltenic oils and naphthenic amphiphiles using microemulsion models. En este trabajo se planteó como objetivo principal el estudio de las características hidrofílicas-lipofílicas de los asfaltenos y compuestos nafténicos en la estabilización de emulsiones de crudo pesado, mediante la cuantificación tanto de la hidrofobia de asfaltenos y la actividad de superficie de asfaltenos y compuestos nafténicos, donde se determinó para unos aceites de prueba el número de alcano del carbono equivalente EACN mediante la evaluación de los cambios de salinidad de microemulsiones formulado con un surfactante de referencia SDHS y con tolueno como aceite de referencia en función de la fracción de volumen de aceite.

Por otra parte, determinaron la curva característica C_c de las especies de superficie mediante la evaluación de los cambios de la salinidad en función de la fracción molar de la especie de superficie en mezcla con SDSH, donde la fase oleosa está formada por asfaltenos ya que son altamente hidrofílicos y que conducen a valores



bajos de EACN a pesar de su gran peso molecular. Además, como superficie activa los asfaltenos son especies hidrofóbicas que conducen a la formación de emulsiones agua en aceite, mientras que los naftenatos, en particular naftenatos de sodio, son compuestos altamente hidrofílicos que conducen a la formación de emulsiones de aceite en agua. Estos parámetros de caracterización hidrofílico-lipofílico, y los métodos utilizados para determinarlos se pueden utilizar en el futuro para comprender el comportamiento de las fases de los complejos sistemas agua-aceite.

Este antecedente presenta similitud con el proyecto a realizar en cuanto a la determinación del carácter hidrófilo-lipófilo del aceite y el anfifilo a utilizar para luego analizar el impacto del sistema formado en la fase microemulsión. Por otra parte, la diferencia es que el aceite utilizado en el proyecto a realizar es proveniente de un crudo liviano, mientras que en este antecedente es proveniente de un crudo pesado.

Bouton, F y Colaboradores (2008), Clasificación de aceites terpénicos mediante los diagramas “pez” y la escala del número de alcano equivalente (EACN). En esta publicación, los autores investigaron el comportamiento de fases de sistemas ternarios basados en tetraetilen glicol monoalquil éter ($C_{12}E_4$), como surfactantes y monoquince y sesquiterpenos como fragancias oleosas mediante el concepto de Desviación Hidrofílica Lipofílica (HLD). Los sistemas ternarios, para cada terpeno, fueron estudiados por la localización del punto X en el diagrama “pez” y los terpenos fueron caracterizados por su número de alcano equivalente (EACN).

Realizados estos diagramas para sistemas $C_{12}E_4$ /Agua/Cariofileno, éstos fueron caracterizados y comparados con el hexano, es decir con el alcano de valor del número de alcano equivalente (EACN) más cercano. A su vez el efecto de la estructura química de los terpenos en sus valores de EACN fue argumentada en este trabajo, al considerar la estructura química de estos, así como su número de ramificación y los dobles enlaces en su estructura.



La finalidad de este trabajo era utilizar el C_8E_4 para determinar un gran conjunto de mono y sesquiterpenos. Comparando los valores de EACN de estos aceites, los autores concluyen que estos exhiben una compleja estructura química, en donde esta tendencia está seriamente relacionada con el efecto estructural. La aromaticidad demostró ser el más significativo efecto estructural en el descenso de los valores de EACN, así como la ciclación, la insaturación y en menor medida la ramificación. Estos consideran que el EACN constituye un parámetro clave para las aplicaciones prácticas, ya que ayuda al formulador a seleccionar el surfactante apropiado para determinado aceite a fin de obtener microemulsiones o emulsiones con las propiedades deseadas.

Este antecedente presenta similitud con la investigación que se va a llevar a cabo en cuanto a la selección preliminar del surfactante más adecuado para el sistema en estudio, mientras que la diferencia radica en el hecho de que en este trabajo se va a realizar para un sólo surfactante.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1 SURFACTANTES

Surfactante es un término normalmente utilizado para designar en forma abreviada los compuestos con actividad interfacial, también conocidos como anfífilos o tensoactivos, son sustancias que poseen una afinidad doble, que desde el punto de vista fisicoquímico, se podría definir como una dualidad polar-apolar.

Químicamente, la molécula de un surfactante se caracteriza por tener una estructura molecular que contiene un grupo conocido liofóbico, el cual presenta poca atracción o incompatibilidad con el solvente, junto a otro grupo que muestra fuerte atracción o inclinación por el solvente, llamado liofílico (Velázquez, 2008).

En la siguiente figura 2.1 se observa la estructura de una molécula de surfactante.

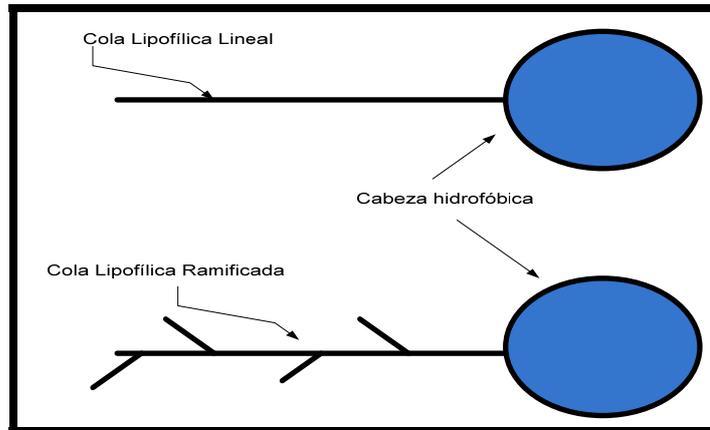


Figura 2.1. Estructura de una molécula de surfactante (Velázquez, 2008)

Cuando el solvente es agua estos grupos se conocen como las porciones hidrofílicas e hidrofóbicas, en cuyo caso, la primera es un grupo con cierto carácter polar (cabeza), mientras que la segunda porción es generalmente una cadena hidrocarbonada lineal o ramificada que presenta carácter apolar y que es también denominada lipofílica (cola).

Del hecho de su naturaleza de doble afinidad, las moléculas de un surfactante presentan tendencia a localizarse preferible y espontáneamente en la interfase, de forma tal que su grupo polar se encuentre en el agua y su grupo apolar se encuentre orientado hacia un solvente orgánico o en la fase gas, con lo que la molécula de surfactante logra satisfacer ambas interacciones.

Así pues, cuando un surfactante se disuelve en agua, se produce una adsorción de las moléculas de dicho surfactante en la superficie del agua y si se trata de un sistema agua/aceite/surfactante, el surfactante se adsorbe en la interfase agua-aceite.

El término interfase, se refiere a la frontera entre dos fases inmiscibles mientras que el término superficie, se utiliza para denotar la interfase líquido-gas.



Los ingleses utilizan la palabra “surfactant” para denotar una sustancia que posee una actividad superficial o interfacial. Es necesario hacer resaltar que no todas las moléculas anfífilas poseen tal actividad. Para que esta actividad superficial o interfacial suceda, es necesario que la molécula posea propiedades relativamente equilibradas, es decir, que no sea ni demasiado hidrófila ni demasiado hidrófoba.

2.2.2 PROPIEDADES DE LOS SURFACTANTES

Se puede decir que todas las propiedades y usos de los surfactantes provienen de dos propiedades fundamentales de estas sustancias: de una parte, su capacidad de absorberse a las interfases, lo cual produce en general una reducción de la tensión superficial o interfacial; y de otra parte su tendencia a asociarse para formar estructuras organizadas (Salager, 1993).

La figura 2.2 indica la variación de la tensión superficial en función de la concentración del surfactante en la solución acuosa y posee todas las características del caso general. A partir del valor que corresponde al agua pura (72 dinas/cm), se observa una disminución de la tensión superficial en función de la concentración del surfactante; en esta primera zona (I), la gran mayoría de las moléculas de surfactante se adsorben a la superficie agua-aire, y la concentración superficial crece rápidamente, como se puede apreciar en la Figura 2.2.

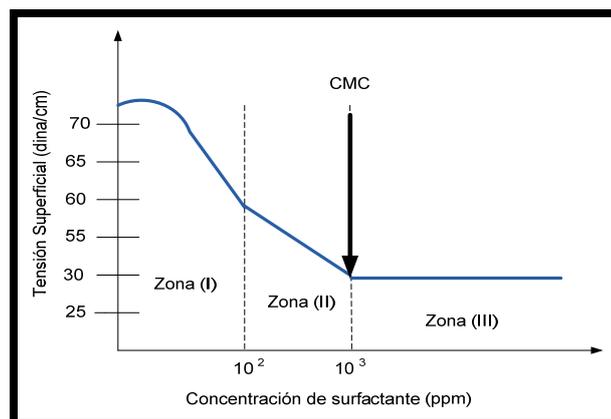


Figura 2.2. Variación de la tensión superficial en función de la concentración de surfactante (Salager, 1993)



A partir de un cierto valor, la superficie está ocupada por una capa monomolecular de surfactante y la tensión interfacial decrece linealmente con el logaritmo de la concentración; según la isoterma de Gibbs, esto indica que la concentración superficial permanece constante. En esta segunda zona (II) la superficie es por tanto saturada y las moléculas de surfactante que se añaden deben solubilizarse en la fase acuosa, lo que es poco favorable desde el punto de vista energético, por la presencia del grupo no polar.

A partir de una cierta concentración, la fase acuosa se satura en moléculas individuales de surfactante, y se observa el cambio a la tercera zona (III), en la cual la tensión superficial permanece constante. En esta región, cualquier molécula complementaria de surfactante se encuentra encima de su límite de saturación en fase acuosa y su solubilización ocurre en agregados del tipo coloidal llamadas micelas.

Por otra parte, se tiene que en el caso de una interfase agua-aceite, el problema es más complejo, ya que el surfactante puede solubilizarse en las dos fases; sin embargo, los fenómenos son esencialmente los mismos.

2.2.3 TIPOS DE SURFACTANTES

Desde el punto de vista comercial los surfactantes se clasifican según su aplicación. Sin embargo, se observa que muchos de ellos son susceptibles de ser utilizados en aplicaciones diferentes, lo que provoca confusiones. Por lo tanto, se prefiere clasificarlos de acuerdo a la estructura de su molécula, o más exactamente según la forma de disociación en el agua (Salager y Fernández, 2004).

Así se clasifican en: surfactantes iónicos y no iónicos; y dentro de los iónicos según la carga que posea la parte que presenta la actividad de superficie serán: aniónicos, cationicos y anfóteros.



❖ Surfactantes no iónicos

Los surfactantes no iónicos están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40% de la producción total mundial. En solución acuosa no se ionizan, puesto que ellos poseen grupos hidrófilos del tipo alcohol, fenol, éter o amida. Una alta proporción de estos surfactantes puede tomarse relativamente hidrofílicos gracias a la presencia de una cadena poliéter del tipo polióxido de etileno. El grupo hidrófobo es generalmente un radical alquil o alquil benceno y a veces una estructura de origen natural como un ácido graso, sobre todo cuando se requiere baja toxicidad (Salager y Fernández, 2004).

La figura 2.3 muestra las estructuras de dos surfactantes no iónicos: un éster de sorbitan etoxilado (Tween 80) y un alcohol cetil-estearil etoxilado con 20 moles de óxido de etileno.

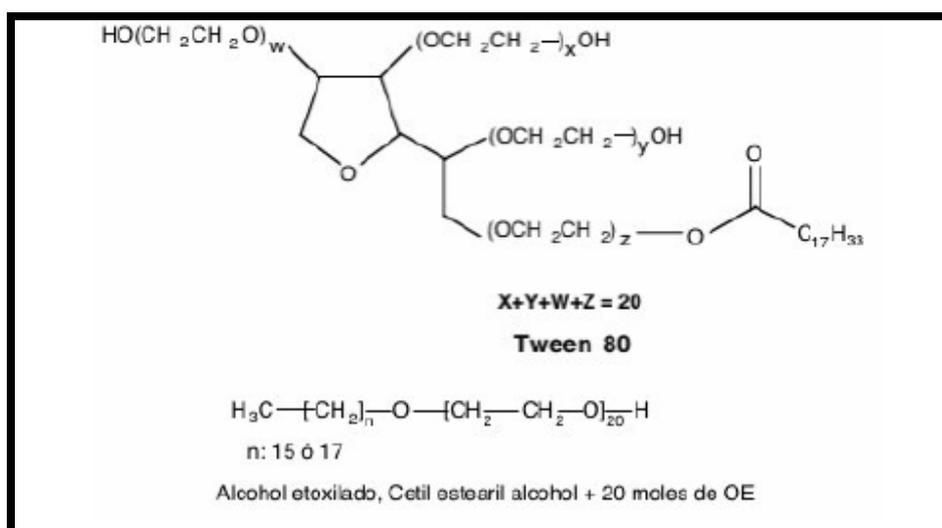


Figura 2.3. Estructura de dos surfactantes no iónicos (Salager, 2004).

❖ Surfactantes catiónicos

Se disocian en solución acuosa en un catión orgánico anfifilo y un anión generalmente tipo halogenuro. La gran mayoría de estos surfactantes son compuestos nitrogenados del tipo sal de amina, grasa protonada o de amonio cuaternario. La fabricación de estos surfactantes es en general más costosa que la



de los surfactantes no iónicos y aniónicos y por esta razón que no se les utiliza salvo en caso de aplicación particular (Salager y Anton, 1990), como cuando se hace uso de sus propiedades bactericidas o de su facilidad de adsorción sobre sustratos biológicos o inertes que poseen una carga negativa. Esta última propiedad hace que sean excelentes agentes antiestáticos, hidrofobantes, así como inhibidores de corrosión, y puedan ser utilizados para uso doméstico.

❖ Surfactantes aniónicos

Se disocian en un anión anfifilo y un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario. A este tipo pertenecen los detergentes sintéticos como los alquil benceno sulfonatos, los jabones (sales alcalinas de ácidos grasos), los agentes espumantes como el lauril sulfato, los humectantes del tipo sulfosuccinato, los dispersantes del tipo lignosulfonatos, entre otros. La producción de los surfactantes aniónicos representa alrededor del 55% de los surfactantes producidos anualmente en el mundo (Salager y Anton, 1990).

❖ Surfactantes anfóteros

Se producen por la combinación en una misma molécula de dos caracteres: aniónico y catiónico, como por ejemplo los aminoácidos, las betaínas o los fosfolípidos, dependiendo del efecto del pH sobre la ionización de los grupos polares. Ciertos anfóteros son insensibles al pH, otros son de tipo catiónico a pH ácido y de tipo aniónico a pH alto. Los anfóteros son en general tanto o más caros que los catiónicos y por esta razón su aplicación se reduce a situaciones particulares (Salager y Anton, 1990).

❖ Surfactantes poliméricos

Estos son producidos asociando estructuras polimerizadas de tipo hidrofílico o lipofílico, en forma de bloques o de injertos. Ciertos de estos surfactantes son indispensables en procesos donde están involucradas macromoléculas naturales como la deshidratación del petróleo (Salager y Anton, 1990). Un ejemplo de



surfactantes iónicos como se puede apreciar en la figura 2.4 es el dodecil sulfato de sodio (SDS), el cual presenta un extremo muy polar cargado negativamente al disociarse en agua y una cadena lipofílica relativamente larga (12 átomos de carbonos) sin ramificaciones.

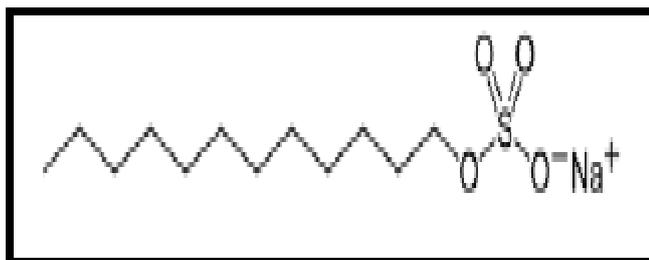


Figura 2.4. Estructura de la molécula de surfactante dodecil sulfato de sodio (SDS)
(Salager, 2000)

2.2.4 ADSORCIÓN Y AGREGACIÓN

Debido a su naturaleza anfifílica, los surfactantes exhiben un comportamiento muy peculiar, el cual es inherente a su estructura. Primero, tienden a adsorberse en las interfases agua/aceite ó agua/aire, donde pueden satisfacer su doble afinidad, con el grupo hidrofílico localizado en la fase acuosa y el grupo hidrofóbico localizado en el aceite o en el aire. Segundo, los surfactantes en solución tienden a autoasociarse en diversas estructuras dentro del seno de la solución. Este proceso de organización resulta en una disminución de la energía libre del sistema y es espontáneo. Los agregados resultantes más simples se conocen como micelas y el proceso de asociación se llama micelización.

Los surfactantes tienden a formar estructuras coloidales de autoasociación; la primera estructura, llamada micela, se produce cuando las moléculas surfactantes disueltas en agua están lo suficientemente cercas unas de las otras. En esta estructura se unen las colas hidrofóbicas, lo que hace que dejen de interactuar con las moléculas de agua, lo cual es desfavorable. Esta fuerza motriz que impulsa la formación de micelas se llama efecto hidrofóbico y se opone al libre movimiento termo-molecular y



a las fuerzas repulsivas (para los surfactantes iónicos) entre las cabezas polares en un agregado (Mittal, 1977).

2.2.5 MICELAS

Las micelas son agregados coloidales que se forman a partir de una concentración llamada concentración micelar crítica (CMC) . En un agregado micelar normal, los grupos hidrofílicos están en contacto con el solvente acuoso, mientras que las colas hidrofóbicas están ubicadas en el núcleo de la micela fuera del ambiente acuoso, lo que es una situación favorable desde el punto de vista energético. Las micelas inversas son similares en estructura, pero esta vez el solvente es un aceite y los grupos polares se encuentran en el centro de la micela. En la siguiente figura 2.5 se observa la estructura de la micela.

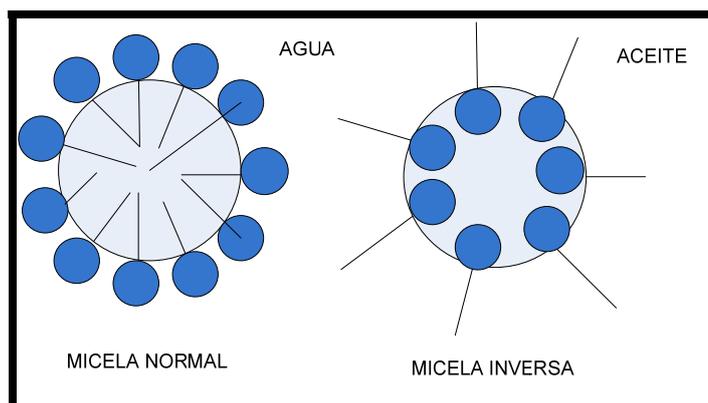


Figura 2.5. Micelas en solución (Mittal, 1977)

El núcleo de la micela es una región de exclusión de las moléculas del solvente respectivo. Las sustancias incompatibles con el solvente tienden a transferirse espontáneamente hacia el núcleo en un proceso llamado solubilización (Shinoda y col, 1967). Es importante resaltar que las micelas intercambian moléculas de surfactantes a veces en una forma muy rápida con el seno de la solución y que la forma esférica es solo un promedio. Efectivamente, el tamaño y la forma micelar pueden cambiar muy rápidamente para satisfacer nuevas condiciones fisicoquímicas, como aquellas producidas por un cambio brusco en la formulación y la temperatura. Cuando la



concentración de surfactante aumenta notablemente encima de la CMC, se forman otras estructuras, denominadas cristales líquidos o mesofases (Scriven, 1977).

La figura 2.6 muestra esquemáticamente varias estructuras que se forman en la solución con la variación de la concentración del surfactante.

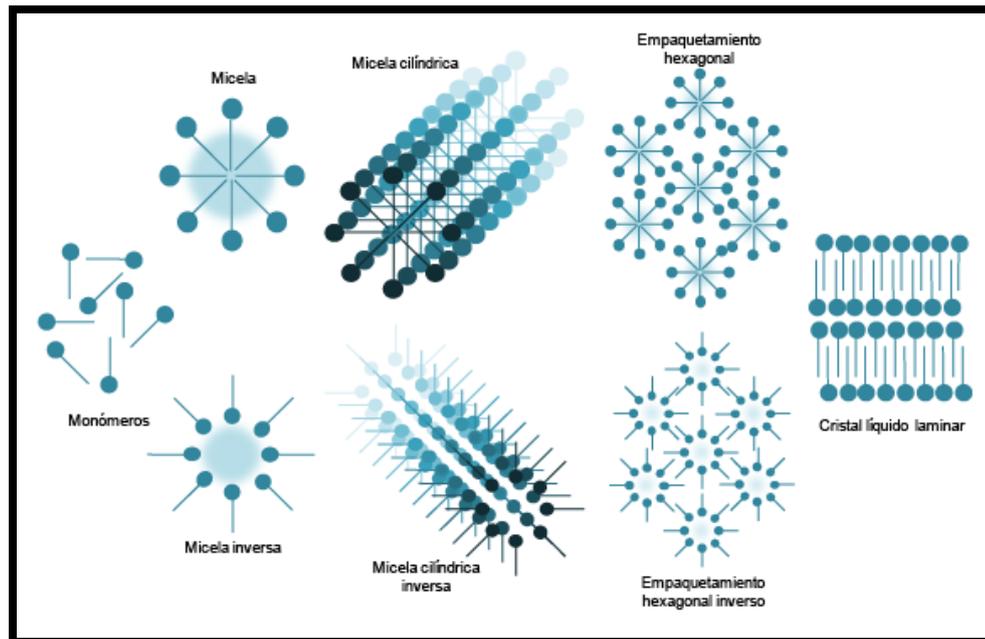


Figura 2.6. Diversas estructuras producidas por la asociación de surfactantes (Salager, 1993)

2.2.6 CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA

La concentración micelar crítica (CMC) corresponde a la transición entre las zonas (II) y (III) de la figura 2.2, no es en realidad un valor exacto, sino un cierto rango de concentración, que puede ser relativamente amplio si el surfactante es una mezcla de especies químicas notablemente diferentes entre sí.

Cuando se añade a una solución acuosa de surfactante un tercer componente, tal como un alcohol o un hidrocarburo, los fenómenos observados dependen de la presencia y del tipo de micelas.



La mayoría de los autores hacen la referencia entre cuatro tipos de solubilización, según la naturaleza del aditivo. Ellos son:

- ❖ En el caso de compuestos no polares, tales como los hidrocarburos o los aceites, la solubilización se realiza en el interior lipofílico de las micelas (ver figura 2.7.a). Estas últimas pueden hincharse hasta volverse microgotas de varios centenares de Angstroms, recubiertas de una capa de surfactante. Tales estructuras, las cuales se definen más adelante como microemulsiones, pueden solubilizar una importante cantidad de aceite.
- ❖ El segundo tipo de solubilización concierne a los aditivos anfífilicos, tales como los alcoholes. En este caso se trata de una co-micelización, es decir de la formación de micelas mixtas conteniendo los dos anfífilos (ver figura 2.7.b). En cierto modo se podría decir que el alcohol se comporta como un co-surfactante.

En ciertos casos, la co-micelización produce micelas con gran poder de solubilización, el cual proviene de un efecto sinérgico. Se notará que una situación idéntica puede presentarse al comparar dos o más surfactantes diferentes, lo que tiene una gran importancia práctica ya que los surfactantes comerciales son necesariamente mezclas de complejidad variable.

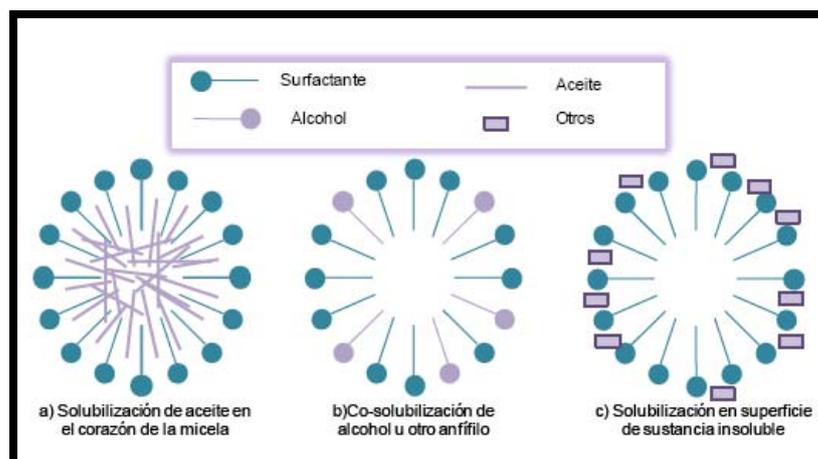


Figura 2.7. Diversos tipos de solubilización micelar (Velázquez, 2008)



- ❖ El tercer tipo de solubilización corresponde a los aditivos insolubles a la vez en agua y en el interior lipofílico de las micelas. Parece que se adsorben en la superficie de la micela (ver figura 2.7.c). Este tipo de solubilización se asemeja a los fenómenos de depósitos de partículas orgánicas o coloides en la superficie de las gotas de una emulsión.

- ❖ El último tipo de solubilización, es característico de las micelas de surfactante no iónicos cuyo hidrófilo consiste en una o varias cadenas de poli-oxietileno o poli-oxipropileno. Parece que ciertos compuestos orgánicos, particularmente con núcleos aromáticos, pueden ser secuestrados en estas cadenas parcialmente hidrofílicas, que pueden alcanzar a veces varias decenas de unidades de óxidos de etileno y actúan por lo tanto como agente pseudoquelantes.

2.2.7 MICROEMULSIONES

Una microemulsión es una mezcla monofásica de surfactante, agua y aceite, generalmente con alcohol, que exhibe estabilidad permanente y comportamiento de fluido, con dominio del orden de $0,01\mu\text{m}$. La obtención y propiedad de una microemulsión, no dependen del orden de la adición de los componentes, ni de la intensidad de agitación aplicada para obtenerlas. Se producen de forma espontánea a concentraciones más altas de surfactante, es por esta razón que son consideradas como una solución micelar donde las micelas están extremadamente hinchadas y se tocan entre sí.

Las primeras microemulsiones en ser reconocidas como algo diferente de las demás estructuras conocidas fue mencionado hace más de 50 años (Huar y Shulman, 1943). Estos autores pudieron lograr la transparencia de una macroemulsión blanquecina agregando un alcohol de cadena intermedia. Ellos interpretaron el logro de la transparencia como una reducción drástica del tamaño de la gota, mucho debajo de las longitudes de onda de luz visible, esto es, en el rango coloidal donde los fragmentos de materia dispersada son demasiado grandes para que el sistema se comporte como



una solución normal pero demasiado pequeñas para ser sensibles a la gravedad y así separarse.

Una microemulsión no es una solución micelar corriente. El tamaño de la microgota sobrepasa los 100 Angstrom, es decir es mucho mayor que la longitud del grupo lipofílico del surfactante, el interior consiste esencialmente de aceite, y las interacciones de los grupos lipofílicos del surfactante, que fueron la razón de ser de la micela, son inexistentes o despreciables.

De igual manera, en una microemulsión se tiene una concentración de surfactante considerablemente superior a la CMC, lo que resulta en la presencia de muchas micelas que se contactan en un fenómeno llamado percolación. Por otra parte, en una microemulsión las proporciones de agua y aceite deben ser del mismo orden de magnitud. Finalmente, se sabe ahora que la obtención de una microemulsión requiere un cierto balance hidrofílico-lipofílico del anfifilo e incluso condiciones que reducen las interacciones entre las moléculas vecinas de surfactante.

A pesar de llevar incluida la palabra emulsión, una microemulsión tiene características muy diferentes de una macroemulsión. Primero, es un sistema estable desde el punto de vista termodinámico lo que implica que se forma espontáneamente, con un descenso de energía libre. Tal proceso implicaría una tensión interfacial negativa para una emulsión. Segundo, se comporta como una fase única y presenta interfase definida al estar en equilibrio con agua y aceite. Tercero, la microemulsión puede pasar del tipo microgota de agua al tipo microgota de aceite de manera continua, sin la transición macroscópica que se presenta en la inversión de una macroemulsión.

2.2.8 SISTEMA SURFACTANTE-AGUA-ACEITE

Los sistemas pseudoternarios agua-surfactante-aceite son denominados SOW (del inglés, Surfactant Oil Water). El surfactante (S) puede ser desde una especie pura hasta una mezcla compleja de sustancias anfifilas. La fase acuosa (W) es una fase



polar que puede o no contener electrolitos. La fase oléica (O) es una fase apolar inmisible en la fase acuosa en ausencia de surfactantes, ver figura 2.8.

En algunos casos, también se utiliza un alcohol como co-surfactante, para evitar la formación de estructuras geles o cristales líquidos, simplificando entonces los diagramas de comportamiento de fase.

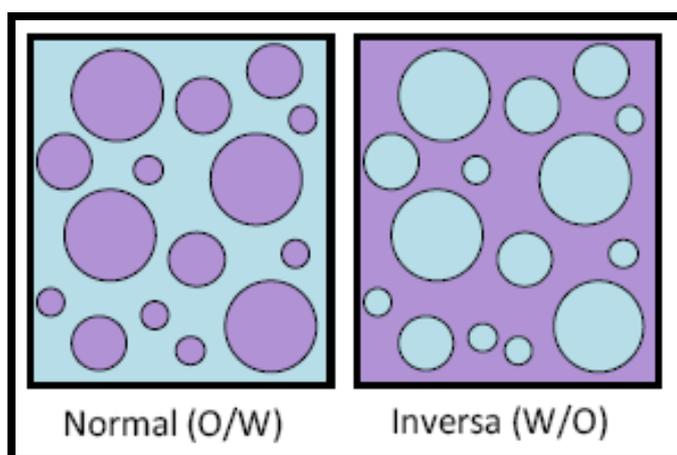


Figura 2.8. Tipos de emulsiones simples (Velázquez, 2008)

2.2.9 VARIABLES DE COMPOSICIÓN Y VARIABLES DE FORMULACIÓN FÍSICOQUÍMICAS

La formulación de microemulsiones trae consigo la selección de valores de dos tipos de variables: la de composición y las variables de formulación fisicoquímicas.

❖ Variables de composición

Cuando las proporciones relativas de los constituyentes principales del sistema surfactante-agua-aceite son puros, las propiedades de la mezcla pueden ser representados dentro de un diagrama ternario agua-aceite-surfactante interpretado en función de dos variables independientes que son a menudo la relación volumétrica agua-aceite y la concentración del surfactante. Los constituyentes se agrupan generalmente en tres pseudocomponentes (compuestos polares [agua], apolares



[aceite] y anfífilos [surfactante y cosurfactante] suponiendo que se comportan de manera análoga a constituyentes puros equivalentes.

En la figura 2.9, se presenta un diagrama ternario para un sistema de tres componentes, que muestra una región de dos fases.

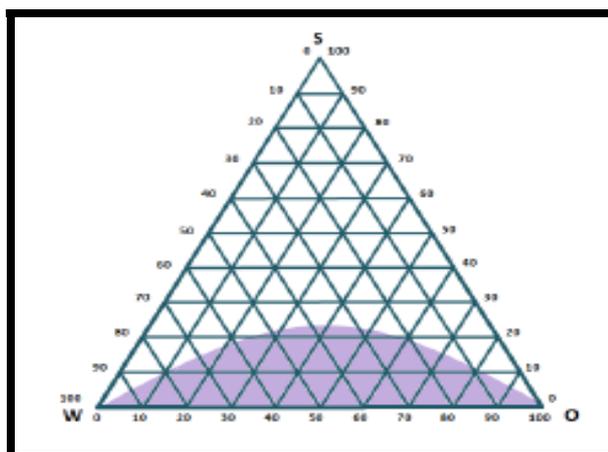


Figura 2.9. Diagrama ternario típico para un sistema agua-aceite-surfactante.
(Velázquez, 2008)

❖ Variables de formulación fisicoquímicas

Son variables intensivas, es decir, que no dependen de la cantidad e incluye los otros parámetros físicos (temperatura, presión) o químicos (naturaleza de los constituyentes principales y aditivos) susceptibles de influir sobre el sistema. Estos constituyen al menos tres compuestos: la fase acuosa, la fase oleosa y el(los) surfactante(s).

El surfactante es, por lo menos, definido por la naturaleza químico de su grupo hidrofílico y la longitud de su cadena lipofílica. En lo que concierne a la fase acuosa, ella contiene generalmente uno o más electrolitos donde el tipo y la concentración deben ser precisados. En cuanto a la fase oleosa, es frecuentemente el compuesto más difícil



de definir en el plano químico, puesto que se debe indicar la longitud del esqueleto carbonado, la presencia eventual de grupos funcionales y la isomería de posición.

Al final, muchas microemulsiones contienen otra familia de aditivos, los cosurfactantes (alcoholes y otros anfifilos de cadena corta, típicamente de C_3 a C_6) que se reparten de manera compleja entre la fase acuosa, la fase oleosa y la zona interfacial.

2.2.10 FORMULACIÓN DE SISTEMAS SURFACTANTE-AGUA-ACEITE

La noción de formulación es muy amplia, ya que concierne a todas las industrias que elaboran productos intermedios o finales, mezclando múltiples materias primas. La formulación puede ser definida como el conjunto de conocimientos y operaciones cuando se mezclan, asocian o condicionan ingredientes de origen natural o sintético. A menudo incompatibles entre sí, para obtener un producto comercial caracterizado por su función de uso y su aptitud para satisfacer las especificaciones preestablecidas. Entre los constituyentes de una fórmula, se distinguen a las materias activas que cumplen con la función principal buscada y a los auxiliares de formulación que juegan papeles secundarios, pero indispensables en muchos casos.

La formulación fisicoquímica concierne a la naturaleza de los componentes, los cuales son en los casos que nos interesan al menos tres como son: el surfactante, aceite y agua. Por simplicidad, el efecto del alcohol se toma en cuenta como otra variable de formulación, para con ello evitar los complejos diagramas cuaternarios para describir el comportamiento de fase.

En otro orden de ideas, la formulación es importante porque las propiedades de los sistemas surfactante-agua-aceite en general y particularmente la formulación de microemulsiones, son muy sensibles a pequeñas variaciones de la propia formulación y podría resultar en cambios drásticos de sus propiedades. En consecuencia, la formulación debe ser controlada con precisión, lo que realmente es un desafío debido a



la gran cantidad de grados de libertad que hay que tomar en cuenta en cualquier caso práctico.

Como ya se describió anteriormente, las microemulsiones más simples contendrán una fase orgánica, una fase acuosa y un surfactante a cierta temperatura y presión. Esto significa que son necesarias por lo menos cinco variables para definir el sistema. En la práctica, el formulador se encuentra confrontando una situación mucho más complicada; el agua contiene electrolitos, el aceite y los surfactantes comerciales son en su gran mayoría mezclas, y en muchos casos, especialmente para surfactantes iónicos, se agregan cosurfactantes, lo cual suma otras variables al sistema.

Antes de continuar, es conveniente sacar la cuenta de la cantidad de variables que son necesarias para describir un sistema simple que contiene un surfactante, un cosurfactante, un aceite puro y una solución de NaCl a temperatura y presión constantes. Es imposible de preparar sistemáticamente todas las formulaciones posibles, por lo tanto es primordial realizar experiencias muy ricas en información fisicoquímica. Después de medio siglo, diversos conceptos han sido propuestos para reducir el número de grados de libertad y facilitar la tarea del formulador.

2.2.11 COMPORTAMIENTO DE FASE

Winsor estudió el comportamiento de fase de los sistemas surfactante-agua-aceite en función de la naturaleza de los diferentes componentes que forman el sistema ternario (Winsor y colaboradores, 1968). Cambiando la naturaleza de los diferentes componentes y sus respectivas proporciones, construyó diagramas en los cuales caracterizó los diferentes tipos de equilibrio de fases, ubicando cada uno de los pseudocomponentes en un vértice, como se muestra en la figura 2.10

El comportamiento de fase tipo I (que se observa en la figura 2.10), es un sistema de micela tipo S_1 (y su extensión a micelas hinchadas cuando pocas micelas están presentes, o una microemulsión O/W si una gran cantidad de aceite es



solubilizado en el corazón de las micelas) que se encuentra en equilibrio con una fase de aceite casi puro. Este comportamiento de fase que se exhibe en una región polifásica del sistema ternario, y que es llamado Diagrama Winsor I, es usualmente referido bajo el símbolo nemotécnico dos abajo ($\underline{2}$), debido a que se trata de un sistema difásico donde el surfactante se encuentra en la fase inferior, es decir en la fase acuosa.

En tal sentido, un diagrama de comportamiento de fase de tipo Winsor II también denotado como dos arriba ($\bar{2}$), corresponde a la situación opuesta, en que el equilibrio polifásico consiste en una micela inversa en la solución orgánica (micela de tipo S_2 , que eventualmente solubiliza suficiente agua para convertirse en una microemulsión) en equilibrio con una fase acuosa esencialmente pura.

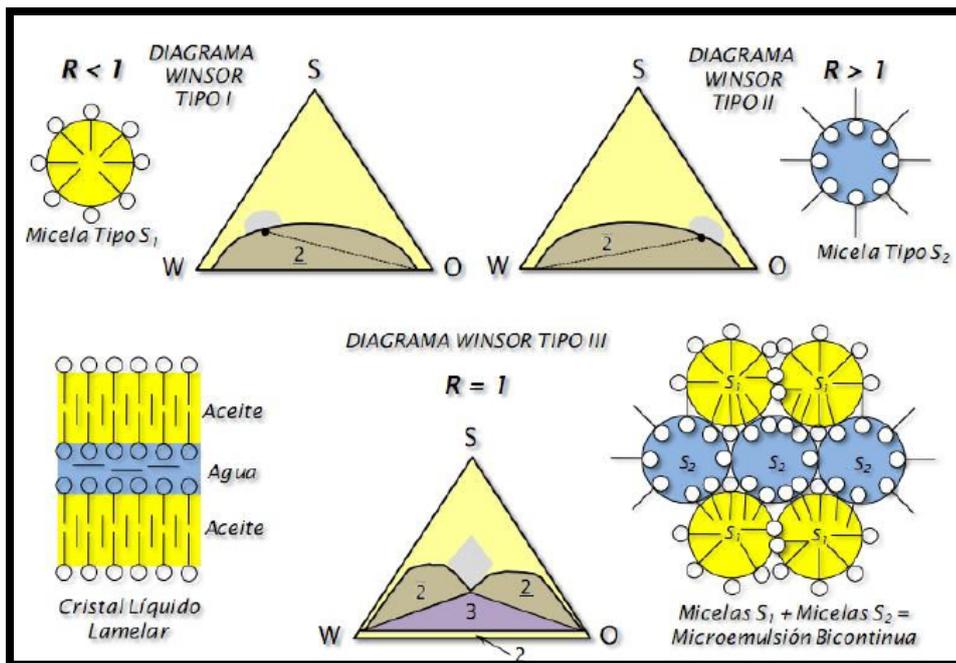


Figura 2.10. Comportamiento de fase, relación R y tipos de estructuras de acuerdo al modelo de Winsor (Paruta, 2008)

Es importante destacar que la línea de reparto de la región polifásica (que une los puntos representativos de las fases en equilibrio) indica claramente el fenómeno de



reparto del surfactante, el cual se relaciona con la formulación fisicoquímica, a través de la energía libre requerida para transferir una molécula del anfífilo de la fase acuosa a la fase aceite, en un sistema con baja concentración de éste (por debajo de la CMC).

Entre los casos Winsor I y II, uno podría esperar una situación en la que la línea de reparto entre las fases en equilibrio sea horizontal como una indicación de que el anfífilo se divide de igual forma en ambas fases.

Sin embargo este caso es sólo cierto para algunos anfífilos como los alcoholes, pero no en general para los surfactantes, en los cuales se presenta un comportamiento de fase del tipo Winsor III. La región polifásica contiene una zona trifásica rodeada por tres zonas bifásicas.

Los sistemas que se encuentran en la zona trifásica se separan en una fase rica en surfactante que se encuentra ubicada en el medio del diagrama, en el límite de la zona monofásica de la emulsión (sombreada) y dos fases en exceso, que son esencialmente agua y aceites puros.

Esta fase de microemulsión ha sido llamada fase intermedia porque aparece entre las fases agua y aceite en un tubo de ensayo, ya que presenta una densidad intermedia. Debido a que la fase intermedia está en equilibrio con ambas fases en exceso, ella no puede ser diluida ni por aceite ni por agua.

La tabla 2.1 muestra el efecto de diferentes variables de formulación para un sistema surfactante-agua-aceite sobre su comportamiento de fase. Como se puede observar, cualquier barrido unidimensional que se realice produce una transición, cuyo sentido depende de la variable en estudio.



Tabla 2.1
Efecto de las variables fisicoquímicas sobre el comportamiento de fase
en los sistemas SOW

Variable de barrido (aumento)	Transición observada
Salinidad	$\underline{2} \rightarrow 3 \rightarrow \bar{2}$
ACN (Número de carbono de la molécula de n- alcano)	$\bar{2} \rightarrow 3 \rightarrow \underline{2}$
Concentración alcohol liviano (C ₁ -C ₃)	$\bar{2} \rightarrow 3 \rightarrow \underline{2}$
Concentración alcohol pesado (C ₄ -C ₆)	$\underline{2} \rightarrow 3 \rightarrow \bar{2}$
EON (Número de óxido de etileno)	$\bar{2} \rightarrow 3 \rightarrow \underline{2}$
Temperatura (aniónicos)	$\bar{2} \rightarrow 3 \rightarrow \underline{2}$
Temperatura (no iónicos)	$\underline{2} \rightarrow 3 \rightarrow \bar{2}$

Fuente: Pérez, 1994

2.2.12 TEORÍA R DE WINSOR (RELACIÓN R)

Para caracterizar el comportamiento de un anfífilo, Winsor propuso la noción de energía de interacción del surfactante con el agua y el aceite; así, él estableció una relación cuantitativa entre el tipo de sistema observado y la afinidad relativa del surfactante por las fases agua y aceite. Las energías puestas en juego son del tipo electrostáticas. Las primeras (hidrofílicas) se deben a las cargas de los iones y a la presencia de dipolos permanentes, como en el caso de los enlaces por puentes de hidrógeno. Las segundas (lipofílicas) se deben al movimiento de los electrones en las moléculas y se conocen como fuerzas de dispersión o fuerzas de London (Salager, 1998).



Para modelar este concepto, Winsor introdujo la relación “R” de las energías de interacción por unidad de área interfacial, entre el anfífilo y el aceite por un lado y el anfífilo y el agua por el otro, como se muestra a continuación en la siguiente ecuación:

$$R = \frac{A_{CO}}{A_{CW}} \quad (2.1)$$

(Salager, 1998)

Donde:

C : interfase formada por el surfactante y eventualmente por algunas moléculas de cosurfactante.

O : fase aceite que puede contener eventualmente una fracción de cosurfactante.

W : fase acuosa que puede contener sales minerales y una fracción del cosurfactante.

De modo que A_{CO} , representa la energía de interacción por unidad de área interfacial entre el surfactante y las moléculas de aceite en la fase aceite. Por otro lado, A_{CW} corresponde a la energía de interacción por unidad de área interfacial entre el surfactante y las moléculas de agua de la fase acuosa.

La figura 2.11 representa la población molecular en las cercanías del límite interfacial entre las fases acuosa y aceite, donde *C* representa al surfactante o a la mezcla de un surfactante y un co-surfactante y el símbolo *A* representa las energías de interacción molecular por unidad de área. En la notación de Winsor:

$$A_{CW} = A_{HCW} + A_{LCW} \quad (2.2)$$

(Salager, 1998)

Donde:

A_{HCW} : interacción entre la cabeza hidrofílica del surfactante y el agua.

A_{LCW} : interacción entre la cola lipofílica del surfactante y el agua.

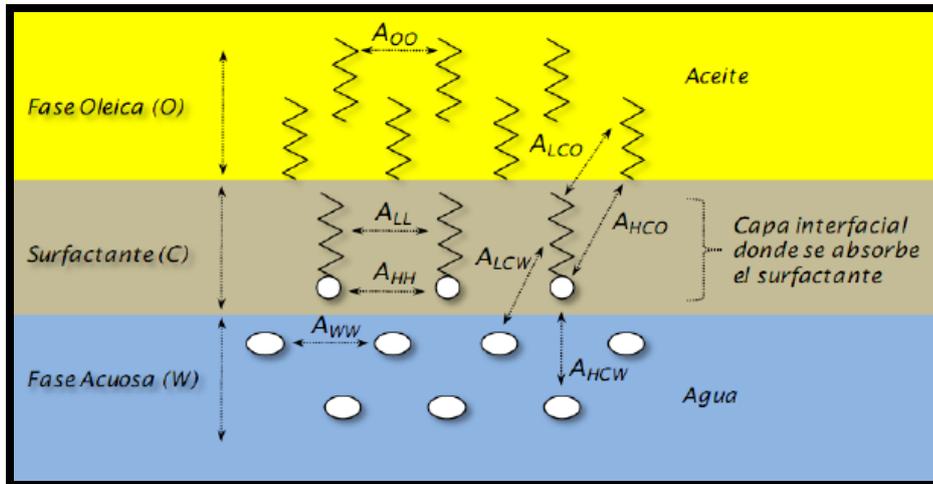


Figura 2.11. Interacciones moleculares involucradas en el R de Winsor (Salager, 1998)

De acuerdo con la teoría de Winsor, la estructura de una fase que contiene un surfactante, agua y aceite está directamente asociada con el llamado comportamiento de fase y varía con el valor de R.

Si $R < 1$, las interacciones hidrofílicas son las más fuertes que las lipofílicas, por lo que la parte hidrofílica del surfactante está más solvatada que la cola y por lo tanto la molécula solvatada forma como una cuña (de acuerdo al nombre de “wedge” dado por Langmuir); al juntar cuñas vecinas (figura 2.12) se induce una curvatura con la concavidad hacia el grupo apolar del surfactante y por lo tanto hacia el aceite.

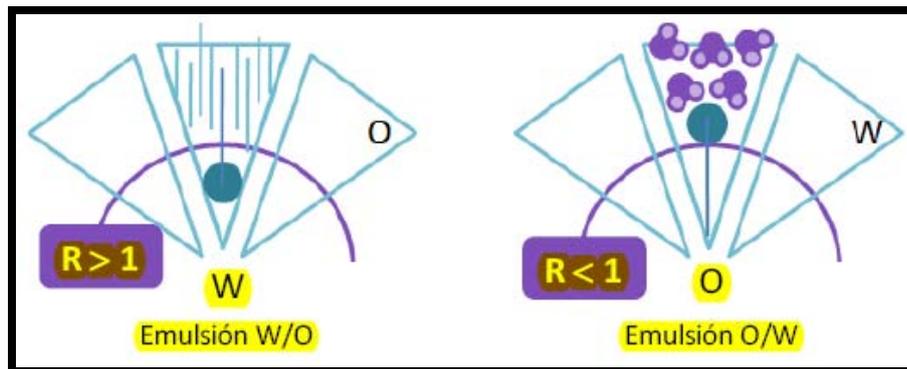


Figura 2.12. Relación entre el valor de R, la curvatura y el tipo de emulsión asociada (Velázquez, 2008)



Entonces, en la interfase hay más penetración del solvente del lado de la cabeza polar del surfactante, lo que produce una curvatura, siendo una micela tipo S_1 .

El centro de la micela es hidrófobo, y el aceite presente en el sistema, tiende a solubilizarse en el corazón de la micela S_1 . En presencia de una gran cantidad de aceite, las micelas tipo S_1 no pueden solubilizarse todo, por tanto el sistema se separa en dos fases: una fase acuosa compuesta de una solución micelar con micelas hinchadas por el aceite solubilizado en su interior, que cuando son bastantes numerosas se tocan para formar una microemulsión y una fase exceso de aceite que es esencialmente aceite puro.

Recíprocamente, para un sistema agua/aceite presentará la región C (capa interfacial donde se absorbe el surfactante) convexa hacia el aceite si $R > 1$ (ver figura 2.10), caso en el cual las interacciones lipofílicas son más importantes y la interfase se curva en sentido contrario, produciendo una micela inversa tipo S_2 , y por extensión emulsiones W/O. Es conveniente recordar que Winsor menciona que su modelo "R" no presenta un valor uniforme en un sistema dado, si no que al contrario se debe considerar como un valor promedio que corresponde a la estructura dominante S_1 o S_2 .

Es importante resaltar que esta descripción asume implícitamente que el caso $R=1$ esta asociado con una capa de curvatura cero, que podría ser obtenida tanto por una estructura de cristal líquido lamelar que alterna O y W en capas llanas o como una combinación de estructuras S_1 y S_2 que fluctúan de manera dinámica.

Si el sistema se encuentra por encima de la línea binodal se pueden contener sistemas monofásicos, conformado por cristales líquidos del tipo lamelar u otras estructuras. En algunos casos, esta zona monofásica es reportada como comportamiento de fase de Winsor tipo IV (Paruta, 2008).



Se puede decir que generalmente es el valor de R que determina la curvatura interfacial, y como consecuencia el tipo de micela, de comportamiento de fase y de emulsión que se obtiene al agitar un sistema surfactante-agua-aceite.

2.2.13 BARRIDO DE FORMULACIÓN

Para modificar de manera controlada la formulación de un sistema agua-aceite-surfactante, se utiliza el método unidimensional. Este consiste en preparar una serie de mezclas agua-aceite-surfactante idénticas a excepción de las variables de formulación llamada variable de barrido. Generalmente, la composición es escogida de manera que el punto representativo del sistema se encuentre situado en medio de la zona polifásica del diagrama de Winsor, es decir, se toma como composición de ensayo un punto que tiene una alta probabilidad de encontrarse en las zonas de (1-3)% de surfactante y relación agua/aceite (WOR) de (0,5-5)%, típicamente 1.

Se escoge el porcentaje de surfactante de tal manera que sea netamente superior a la CMC, pero suficientemente bajo para no alcanzar la zona monofásica. Los valores mencionados permiten, en la gran mayoría de los casos, obtener sistemas difásicos o trifásicos. Para cada valor de la variable de barrido de un componente se puede definir el tipo de diagrama observado el comportamiento de fase del punto de ensayo. En ciertos casos es necesario realizar un análisis físico o químico de las fases para determinar la fase rica en surfactante y, en consecuencia, para decidir entre el tipo I y el tipo II.

Sin embargo, se puede en general, decidir rápidamente por una observación visual. En efecto, la fase rica en surfactante contiene micelas, a veces micelas hinchadas y por éstas presenta a menudo un efecto Tyndall. Este efecto se traduce por una turbidez azulada o por la difusión del haz de luz de un láser de baja intensidad que detecta la presencia de micelas (Salager y Anton, 1991).



El cambio en una variable de formulación, produce una transición en el comportamiento de fase. Esta transición va desde un sistema con una afinidad del surfactante por la fase acuosa hasta uno que presenta una alta afinidad del surfactante hacia la fase oleica, pasando por un sistema trifásico donde la afinidad del surfactante es igual para ambas fases. Se observa entonces la transición desde un diagrama tipo Winsor I hasta un tipo Winsor II, pasando por un diagrama tipo Winsor III como muestra la figura 2.13 (Salager, 1979).

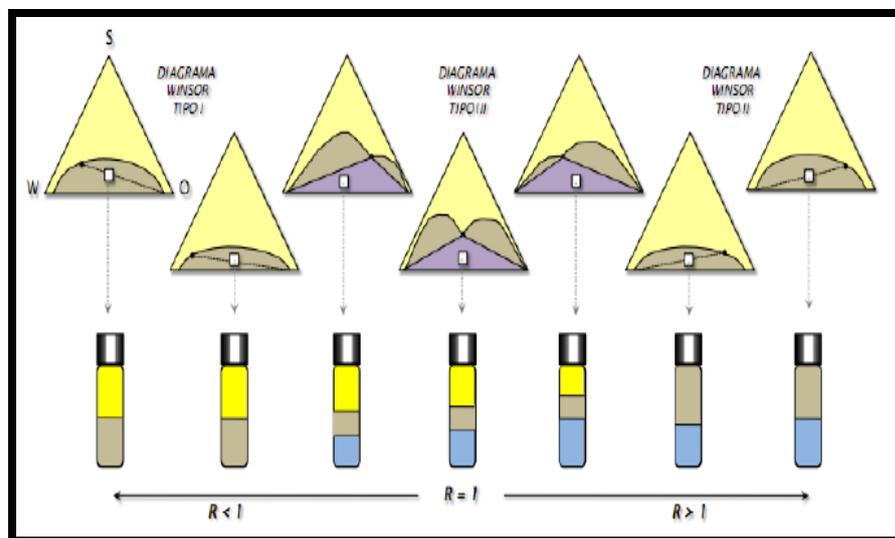


Figura 2.13. Comportamiento de fase en un barrido de formulación (Salager, 1979)

2.2.14 FORMULACIÓN ÓPTIMA

Uno de los objetivos de realizar barridos de formulación unidimensionales es encontrar la formulación óptima a la cual las interacciones del surfactante por las fases acuosa y oleica son iguales. El sistema presenta ciertas propiedades características: $R=1$, tensión interfacial ultrabaja, alta solubilización tanto de agua como de aceite en la microemulsión, mínima estabilidad, mínima viscosidad, entre otras propiedades. El calificativo de “óptima” tiene su origen en la búsqueda de las condiciones fisicoquímicas más favorables para maximizar la recuperación de petróleo por inyección de soluciones de surfactantes (Salager, 1979).



2.2.15 DESVIACIÓN HIDROFÍLICA-LIPOFÍLICA (HLD)

En trabajos un poco recientes (Salager, 2001), se introdujo el término HLD (del inglés Hydrophilic-Lipophilic Deviation, Desviación Hidrofílica-Lipofílica) definido como la relación SAD/RT referida a la formulación óptima. El HLD es un número adimensional que, como el R de Winsor, incluye todas las contribuciones fisicoquímicas de la formulación.

El HLD es una expresión numérica que permite hacer cálculos, a diferencia del R de Winsor, y predecir las compensaciones entre los efectos de las diferentes variables de formulación, donde los términos que aumenten el valor del HLD incrementan la afinidad del surfactante por el aceite o disminuyen su afinidad por el agua y recíprocamente. Se propusieron dos correlaciones importantes que toman en cuenta las variables de formulación y el ambiente fisicoquímico del sistema SOW (Salager, 1988) según el tipo de surfactante:

- Para surfactantes aniónicos:

$$HLD = \sigma + LnS - k.EACN - f(A) - a_T.\Delta T \quad (2.3)$$

(Salager, 1979)

- Para surfactantes no iónicos (tipo alcohol o fenol poli-etoxilado):

$$HLD = \alpha - EON + b.S - k.EACN - \phi(A) - C_T.\Delta T \quad (2.4)$$

(Bourrel, 1980)

Donde:

S : salinidad de la fase acuosa expresado en porcentaje másico de electrolito (%p/p).

σ, k, α : parámetros característicos del surfactante considerado (adim.).

$EACN$: número de átomos de carbono de la molécula de n-alcano equivalente, que caracteriza la fase aceite (adim.).

$f(A), \phi(A)$: función del tipo y concentración de alcohol.



ΔT : diferencia de temperatura del sistema referido a la temperatura de referencia (25°C).

a_T, C_T : constantes de la temperatura (adim.).

b : constante de salinidad según el tipo de electrolito (adim.).

Cuando el $HLD=0$ se obtiene la formulación óptima, donde indica que el surfactante presenta igual afinidad por el agua y por el aceite, lo que significa que se genera un sistema trifásico con iguales cantidades de agua y aceite disueltas en la microemulsión y la relación agua y aceite son apropiadas, produciéndose un comportamiento de fase de tipo Winsor III. La tensión interfacial pasa por un mínimo extremadamente marcado que puede alcanzar un valor ultrabajo (10^{-3} mN/m), requerido por los procesos de recuperación mejorada de petróleo.

Por el contrario, para valores de $HLD < 0$, la afinidad del surfactante en la fase acuosa supera su afinidad en la fase aceite; el surfactante se reparte preferencialmente en la fase acuosa y el sistema difásico obtenido es un Winsor I. Lo opuesto se aplica para $HLD > 0$, que corresponde a un sistema Winsor II como se puede apreciar en la figura 2.14.

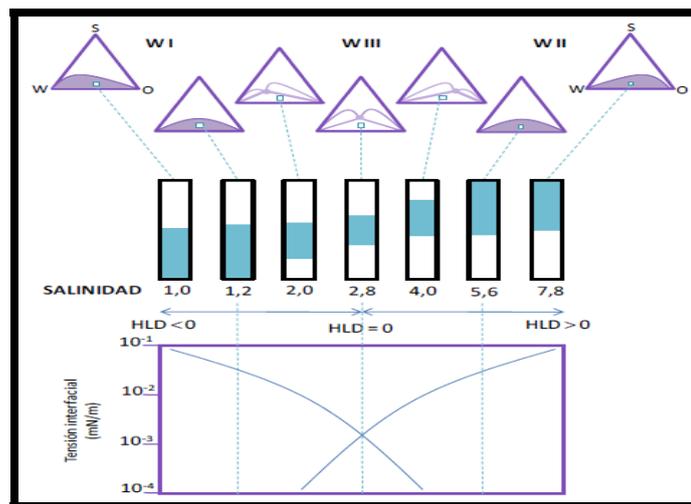


Figura 2.14. Influencia de la salinidad sobre los diagramas de fase, el aspecto de los tubos de ensayo y las tensiones interfaciales (Salager, 2001)



La figura 2.14 ilustra el aspecto de una serie de tubos de ensayo correspondiente a un barrido de salinidad para un sistema que contiene una salmuera, un alcano, un surfactante iónico y un poco de 2-butanol (3%). Todos los tubos contienen los mismas cantidades de los cuatro constituyentes. El punto representativo del sistema global es indicado por un cuadrado sobre los diagramas de fase; correspondiendo aquí al 2,8% de surfactante y proporciones iguales de agua y aceite. Cuando la salinidad de la salmuera aumenta gradualmente, el aspecto de los tubos y de los diagramas de fase, evolucionan como se indica sobre la figura 2.14, donde la fase sombreada contiene la mayor parte del surfactante.

Se localiza fácilmente en la práctica, puesto que ella presenta, en la vecindad de la formulación óptima, cierta turbidez debido a la difusión de luz por las estructuras formadas por el surfactante. Si varios tubos presentan tres fases, la salinidad óptima (aquí 2,8% de NaCl) corresponde al centro de la zona donde se obtienen los sistemas trifásicos de tipo Winsor III.

2.2.16 NÚMERO DE ALCANO EQUIVALENTE (EACN)

Cuando la fase oleosa no está constituida por un alcano lineal puro, se utiliza la noción de alcano equivalente (EACN en inglés). Por definición, el EACN del aceite estudiado es igual al ACN del alcano lineal que produce la formulación óptima dentro de las mismas condiciones experimentales que el evaluado. El EACN depende del número total de átomos de carbono de la molécula, pero también de la ramificación y de la ciclización del esqueleto hidrocarbonado, así como de la presencia de doble enlaces y heteroátomos.

El EACN de un aceite puede medirse experimentalmente o calcularse cuando su estructura molecular deriva de un aceite más simple ya tabulado. Así, el EACN de los alquilbencenos son simplemente iguales al número de átomos de carbono de la cadena alquil, ya que el núcleo bencénico aporta una contribución nula. De la misma manera, los EACN de los alquilociclohexanos se obtienen sumando 3,5 unidades al número de



átomos de carbono de la cadena alquil. Los valores de los EACN de algunos aceites típicos se muestran en la siguiente tabla 2.2:

Tabla 2.2
Valores de EACN de algunos aceites típicos

Tipo de aceite	EACN
Aceite de parafina	+20 a +25
Aceite de soya	+18
Triglicérido de C ₈ -C ₁₀	+15
Diglicérido de C ₈ -C ₁₂	+9
Alcanos lineales de n carbonos	+n
Kerosene	+9 a +11
Limoneno	+9
Pineno	+7,5
Oleato de etilo	+6,5
Ciclohexano	+3,5
Tetracloroetileno	+3
p-xileno	+2
Tolueno	+1
Benceno	0
Tetraclorometileno	0
1,1,1- tricloroetano	-2,5
Tricloroetileno	-4
1,2-diclorobenceno	-5
1,2-dicloroetano	-12
Diclorometano	-14
Cloroformo	-14
1,1,2,2-tetracloroetano	-22

Fuente: (Salager, 2001)



2.2.17 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO EN SUSTRATOS SÓLIDOS

Las técnicas de tratamiento de residuos sólidos consisten en la aplicación de procesos químicos, biológicos o físicos a desechos peligrosos o materiales contaminados a fin de cambiar su estado en forma permanente. Estas técnicas destruyen contaminantes o los modifican a fin de que dejen de ser peligrosos, además pueden reducir la cantidad del material contaminado presente en un lugar, retirar el componente de los desechos que los hace peligrosos o inmovilizar el contaminante en los desechos (Riojas y Otros, 2010).

A continuación se exponen las características más relevantes de las técnicas de remoción seleccionadas.

➤ **Emulsiones**

Es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersada en la otra figura 2.15, termodinámicamente inestable y tarde o temprano debe separarse en dos fases. Es relativamente fácil decir que una emulsión se ha roto, pero es difícil definir experimentalmente un valor de su estabilidad. La única medida realmente absoluta de la estabilidad de una emulsión es la variación del número de gotas en función del tiempo. Tal información no se puede obtener experimentalmente sino mediante la variación de la distribución del tamaño de gota con el tiempo.

La noción de estabilidad es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un período de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a algunos años. Son sustancias orgánicas o inorgánicas susceptibles de aumentar o de disminuir la densidad de absorción o el espesor de la doble capa eléctrica. Por ejemplo la adición de electrólitos a sistemas iónicos tienden a comprimir la doble capa eléctrica y por tanto a reducir la repulsión electrostática, lo que resulta en general en una reducción de estabilidad de una emulsión O/W.

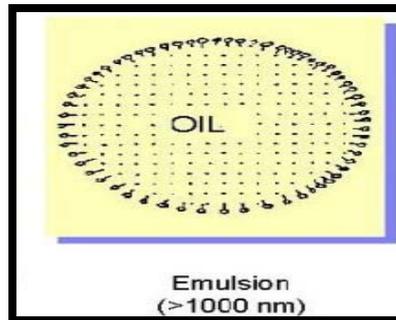


Figura 2.15. Tamaño de gota en una emulsión (Patel, 2007)

Por lo tanto la estabilidad de una emulsión se relaciona en general con el volumen de las fases separadas. Después de algún tiempo el sistema se separa típicamente en tres zonas: una zona central que contiene una nata o emulsión de alto contenido de fase interna y dos fases separadas: la interna (coalescida) y la externa (clarificada) (Patel, 2007).

En ausencia de surfactante, la dispersión líquido-líquido coalesce rápidamente (ejemplo aceite y vinagre). En presencia de un agente emulsionante, la emulsión puede presentar una cierta segregación gravitacional pero la coalescencia de las gotas es notablemente retardada, aun cuando se tocan (ejemplo de la mayonesa).

Sin embargo, se tiene que la adición de un surfactante modifica el comportamiento en la interfase agua/aceite, siendo éste un factor dominante en la estabilización de emulsiones, aunque otras variables pueden influenciar los fenómenos dinámicos, tales como la presencia de electrólitos (afecta la doble carga), o la presencia de polímeros (gelifica el solvente). La tecnología de emulsiones abarca una amplia variedad de industrias y aplicaciones comerciales, cuyos requerimientos son extremadamente diversos. No es sorprendente que frente al gran número de factores, dicha tecnología se haya desarrollado de manera esencialmente empírica.

La presencia de surfactante es lo que permite controlar los diferentes fenómenos involucrados en la etapa de drenaje/floculación, cuya escala de tiempo puede variar de



una fracción de segundo a varios años y hasta más en sistemas perfectamente metaestables. La adsorción de surfactante en la interfase, particularmente los surfactantes de alto peso molecular, puede resultar en un efecto de repulsión estérico. Este efecto depende por supuesto del tamaño del grupo que produce la interacción, y de la densidad de adsorción interfacial. Según que la presencia de surfactante aumenta las repulsiones electrostática y estérica, o las reduce se tendrá a estabilizar o a desestabilizar la emulsión.

La concentración del agente emulsionante es variable, pero en la práctica existen dos límites. Debajo de una concentración mínima del orden de algunos miles de ppm (0,1% por ejemplo), no hay bastante emulsionante para estabilizar la emulsión. Más allá de algunos porcientos (5% por ejemplo), no se gana nada aumentando la concentración del surfactante. En las aplicaciones prácticas se encuentra una concentración de emulsionante en el rango 0,2 - 3%.

Las cantidades relativas de fase dispersa y de fase continua (referidas también como fase interna y fase externa) influyen notablemente sobre las propiedades. Debajo de 20% de fase interna se habla de una emulsión de bajo contenido de fase interna. En tales emulsiones se puede considerar que hay poca interacción de las gotas entre si, lo que permite modelizar ciertos comportamientos. Al otro extremo están las emulsiones de alto contenido de fase interna, en las cuales las gotas de la fase interna ocupan más del 60-70% del volumen. En tales emulsiones las interacciones entre gotas dominan los efectos. Más allá de 75%, las gotas están literalmente al contacto y la emulsión se torna muy viscosa. (Patel, 2007).

➤ **Soluciones micelares**

Las micelas son agregados coloidales que se forman a partir de una concentración llamada concentración micelar crítica (CMC). La concentración micelar crítica es un fenómeno que presentan los surfactantes debido a la estructura polar-apolar de sus moléculas, éstos disminuyen la tensión superficial de la sustancia en



concentraciones por debajo de la crítica, en que estos mismos han cubierto la totalidad de la superficie. Arriba de esta concentración las moléculas del surfactante se dirigen hacia el interior del líquido formando agregados de moléculas sencillas (micelas), como consecuencia se produce una estructura con una orientación específica de alto peso molecular.

Debido a esto se observan cambios bruscos en las propiedades fisicoquímicas, dicha concentración se consigue más fácilmente si el surfactante es predominantemente hidrofílico. Al aumentar la concentración de surfactante en agua, la tensión superficial disminuye debido a que las moléculas se adsorben en la superficie del agua. Al agregar mayor cantidad de surfactante se alcanza un punto donde las moléculas están totalmente empaquetadas en la superficie, de forma totalmente vertical, con la parte hidrofílica orientada hacia el agua y la parte lipofílica hacia el aire.

Si se continua agregando surfactante, no caben más moléculas en la superficie, y se agregan en estructuras denominadas micelas. Ocurre entonces que la tensión superficial no disminuye más y permanece aproximadamente constante. La concentración a la que comienza la formación de micelas se llama concentración micelar crítica (CMC).

Cada micela contiene un cierto número de moléculas de monómeros, número de agregación (N), que determina su forma y tamaño figura 2.16. El tamaño exacto y la forma de las micelas son aún inciertos, habiéndose propuesto una serie de modelos que tratan de explicar las evidencias experimentales. Se asume que una micela iónica en disolución acuosa, es más o menos esférica. Los grupos hidrofílicos están dirigidos a la fase acuosa (Capa de Stern), mientras que las cadenas hidrocarbonadas se orientan fuera del agua, formando el core hidrofóbico central (Ontiveros, 2011).

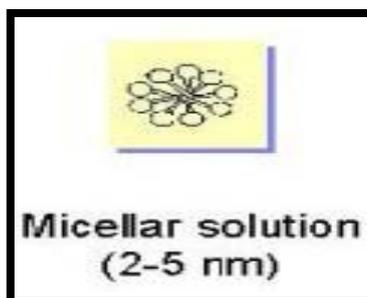


Figura 2.16. Tamaño de gota en una solución micelar (Patel, 2007)

Una vez formadas, las micelas pueden estar integradas por un número n de moléculas, el tamaño es variable y depende de la naturaleza del surfactante, de la concentración, de la temperatura y de los iones presentes. Estas soluciones micelares son dinámicas, ya que las moléculas son objeto de reestructuraciones continuas.

El poder solubilizante de las micelas es probablemente la propiedad de mayor importancia desde el punto de vista analítico. La solubilización de un analito en una micela determinada es un proceso de equilibrio dinámico y depende tanto de la naturaleza del soluto como del medio micelar empleado. En medios micelares, la cantidad de soluto solubilizado es, en general, directamente proporcional a la concentración de surfactante utilizado, una vez que la formación de las micelas ha tenido lugar (Ontiveros, 2011).

Las características de las micelas se modifican tanto con las propiedades del surfactante como con las correspondientes al medio en que se encuentran. El sistema micelar puede verse afectado por cambios de presión, temperatura y fuerza iónica de la disolución, así como por la naturaleza y concentración de los solutos presentes en el medio micelar.

La localización de los compuestos solubilizados en la micela o su entorno depende de la polaridad de los solutos. Aunque el mecanismo real de solubilización es complejo, se puede aceptar, de una manera simple, que los sustratos iónicos con carga



opuesta a los grupos cabeza de micela, pueden enlazarse fuertemente a ellos. Las especies no polares que poseen electrones polarizables, como sucede en los compuestos aromáticos, residen cerca del grupo cabeza, mientras que los radicales alquílicos parece ser que interactúan con el “core” de la micela, de modo que las interacciones hidrofóbicas y electrostáticas micela-soluto sean máximas (Quintana y otros, 2003).

Los surfactantes iónicos se disocian en solución acuosa y forman micelas iónicas, cuyas cabezas hidrofílicas (orientadas al agua) poseen una carga neta negativa o positiva. El manto polar interactúa con el agua y, como consecuencia, las micelas están muy hidratadas. Las micelas formadas en soluciones diluidas de surfactante son aproximadamente esféricas. Al aumentar su concentración las micelas aumentan de tamaño. Siendo demasiado grandes para conservar la forma esférica, adoptan estructura elipsoidal, cilíndricas y finalmente laminares, lo cual afecta la solubilidad y viscosidad de la solución (Quintana y otros, 2003).

Una de las propiedades más importantes que presentan estas soluciones es su capacidad para solubilizar sustancias que normalmente no son afines al solvente. Las micelas, ya sea en su interior o en su superficie, ofrecen a ciertos solutos un entorno más amigable que el agua. El término no debe ser confundido con emulsificación, donde una fase se dispersa en otra fase en presencia de un surfactante, debido a que en la solubilización, a diferencia de la primera, el soluto está en la misma fase que el solvente y el sistema es termodinámicamente estable.

➤ **Microemulsiones**

Es una mezcla monofásica de surfactante, agua y aceite, generalmente con alcohol, que exhibe estabilidad permanente y comportamiento de fluido. Son mezclas transparentes, homogéneas, isótropas y termodinámicamente estables, que contienen proporciones relativamente importantes de agua o de disolución acuosa, de aceite y uno o más compuestos anfífilos de entre los cuales uno al menos debe ser



surfactante, pueden emplearse en extracción líquido-líquido en sustitución de los disolventes orgánicos clásicos. Estas dispersiones líquidas de agua y aceite se hacen termodinámicamente estable mediante la adición de un tensoactivo y un co-tensoactivo y tiene un diámetro de gotas figura 2.17, en el intervalo de 100 a 1000 Å (10 - 100 nm).

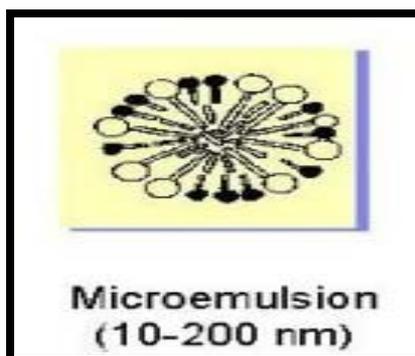


Figura 2.17. Tamaño de gota en una microemulsión (Patel, 2007)

En ciertas condiciones de formulación, se alcanza una situación llamada microemulsión óptima, donde la tendencia hidrofílica y la tendencia hidrófoba del surfactante se igualan, y los cristales líquidos formados tienen una estructura lamelar multicapas. Estos cristales líquidos lamelares son capaces de incorporar moléculas de agua y aceite, sin que éstas entren en contacto y, por tanto, sin que aumente la energía libre del sistema.

Al hincharse con agua y aceite, los cristales líquidos lamelares pueden flexibilizarse y perder su geometría plana para tornarse en una estructura que contiene una mono (o multicapa) de surfactante; en esta geometría la película que separa los dominios de agua y aceite ofrece una mayor área para la adsorción de las moléculas de surfactantes que en el caso de una interfase plana, por lo que el sistema posee una energía libre menor.

Este tipo de microemulsión se llama bicontinua porque contiene dos redes de dominios interconectados, una de agua y otra de aceite.



Una microemulsión puede verse como un cristal líquido lamelar “fundido” porque es lo que pasa cuando un aumento de temperatura produce un desorden geométrico suficiente por agitación térmica de las moléculas.

En el presente caso, el desorden puede también ser producido por la formulación adecuada de la capa de surfactante con el fin de que pierda su rigidez, por ejemplo: (a) al mezclar moléculas de tamaños diferentes como es el caso en surfactantes no-iónicos polietoxilados comerciales, o (b) al mezclar anfífilos de gran dimensión (surfactantes) y de pequeño tamaño (alcoholes), que son los métodos más utilizados.

Es cierto que una microemulsión no es una solución micelar corriente. El tamaño de la microgota sobrepasa los 100 Å, es decir es mucho mayor que la longitud del grupo lipofílico del surfactante, el interior consiste esencialmente de aceite, y las interacciones de los grupos lipofílicos del surfactante, que fueron la razón de ser de la micela, son inexistentes o despreciables.

De igual manera, en una microemulsión se tiene una concentración de surfactante considerablemente superior a la CMC, lo que resulta en la presencia de muchas micelas que se contactan en un fenómeno llamado percolación.

Por otra parte, en una microemulsión óptima, las proporciones de agua y aceite deben ser del mismo orden de magnitud. Finalmente se sabe ahora que la obtención de una microemulsión requiere un cierto balance hidrofílico – lipofílico del anfífilo e incluso condiciones que reducen las interacciones entre las moléculas vecinas de surfactante. Ninguno de los requerimientos anteriores es aplicable a una solución micelar.

A pesar de llevar incluida la palabra emulsión, una microemulsión tiene características muy diferentes de una macroemulsión. Primero, es un sistema estable desde el punto de vista termodinámico, lo que implica que se forma espontáneamente, con un descenso de energía libre. Tal proceso implicaría una tensión interfacial negativa



para una emulsión. Segundo, se comporta como una fase única y presenta interfase definida al estar en equilibrio con agua y aceite.

Tercero, la microemulsión puede pasar del tipo microgota de agua al tipo microgota de aceite de manera continua, sin la transición macroscópica que se presenta en la inversión de una macroemulsión. Conviene mejor visualizar las microemulsiones como sistemas complejos de gran área interfacial entre microestructuras de agua y de aceite.

Es justamente el gran área interfacial que hace que el surfactante pueda disponer de un medio adecuado para satisfacer su afinidad dual, y, por lo tanto, producir un sistema con energía libre inferior a aquella de las fases separadas.

Se podría, por supuesto, obtener una gran área superficial con una macroemulsión que contenga gotas extremadamente pequeñas. Sin embargo, existe una relación entre la curvatura de la interfase y el balance hidrofílico lipofílico del surfactante. Gotas extremadamente pequeñas implicarían una alta curvatura, es decir un surfactante netamente hidrofílico o netamente lipofílico. Se sabe que en tales condiciones, no se obtienen sistemas termodinámicamente estables (Salager, 2000).

El requerimiento de un balance hidrofílico – lipofílico equilibrado exige que la estructura tenga poca curvatura. En su turno eso implica que las interacciones entre moléculas vecinas de surfactantes estén relativamente débiles. Por eso las microemulsiones son más estables en presencia de alcohol y electrolitos, cuyo efecto es reducir estas interacciones.

Las microemulsiones son generalmente poco viscosas y termodinámicamente estables, y presentan tensiones interfaciales ultra bajas con agua y con aceite. Gracias a estas características pueden usarse a baja concentración de surfactante para formar un sistema trifásico (microemulsión-agua-aceite) como tapón de desplazamiento en



recuperación mejorada del petróleo, puesto que la baja tensión y la baja estabilidad de las macroemulsiones eventualmente formadas, garantizan un recobro considerable de crudo en la zona barrida.

Por otra parte, y esta vez a concentración de surfactante suficientemente alta para lograr la cosolubilización completa de agua y aceite, se pueden utilizar como agentes limpiadores de pozo, con el fin de producir un incremento de permeabilidad para inyección, restauración de la producción o corrección de un daño de formación.

La formación de las microemulsiones está favorecida por todos los factores que tienden a producir un aumento del tamaño micelar (o una disminución de la CMC) tales como electrolitos, acercamiento al punto de turbidez para los surfactantes no iónicos, etc. Tales mesófases se producen siempre y cuando las afinidades del surfactante para las fases orgánica y acuosa están cerca del equilibrio, es decir cerca en la formulación óptima. En las microemulsiones la concentración del surfactante es varias veces superior a la CMC y las proporciones de agua y aceite deben ser similares.

2.2.18 DETERGENCIA

Es la remoción de un material no deseado de un sustrato sumergido en cierto medio, generalmente con el uso de una fuerza mecánica y en presencia de una sustancia química que puede reducir la adherencia del material no deseado al sustrato. Este proceso se ve afectado principalmente por la concentración y estructura del surfactante.

Así mismo, se refiere al proceso de limpieza de una superficie sólida o de una estructura fibrosa mediante un baño líquido, en el cual la acción limpiadora del solvente está considerablemente aumentada por procesos fisicoquímicos atribuibles al surfactante y demás componentes del detergente (Salager, 1988).



CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se define el tipo de investigación y se exponen las etapas metodológicas seguidas para el desarrollo de la misma, así como la descripción detallada de la estrategia y métodos utilizados para el logro de cada uno de los objetivos planteados.

3.1. Tipo de investigación

Es importante considerar una investigación en relación al horizonte que se quiere llegar, ya que cada una tiene una estrategia metodológica diferente. En este sentido, esta investigación según los objetivos planteados pretende dar respuesta al comportamiento de los sistemas SOW utilizando diversos alcoholes. Lo cual sería un aporte a nuevas investigaciones en cuanto al uso de los sistemas SOW en la remoción de crudo y el impacto que estas ocasionan a nivel ambiental.

En cuanto a la estrategia o diseño de la investigación, es de tipo experimental, ya que, según el Manual de Trabajo Especial de Grado del Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño” (2006), establece que el Trabajo Especial de Grado en dicha modalidad consiste en realizar ensayos a nivel de laboratorio donde se manipulan variables a diferentes condiciones de operación (concentración, solubilidad, naturaleza del solvente, entre otras), para finalmente obtener una combinación de variables que garantizaran las mejores condiciones de recuperación del suelo contaminado.

Por otro lado, los análisis y todos los datos de interés serán recolectados de forma directa de la realidad, en visitas y entrevistas realizadas directamente con expertos en el área, con el propósito de obtener datos primarios que describan e interpreten la naturaleza del problema, haciendo uso de métodos y procedimientos que requiera la investigación, que posteriormente servirán de soporte en los resultados de la misma.



3.2. Desarrollo sistemático de la investigación.

Para el desarrollo sistemático de la investigación (DSI), se plantean las siguientes fases: barridos de formulación a los sistemas surfactante-aceite-agua (SOW), determinar la influencia de diferentes alcoholes y las variaciones de sus concentraciones en los sistemas SOW, calcular el número de alcano equivalente (EACN) del crudo de Yaracal, determinar el porcentaje de remoción del crudo presente en las muestras de suelo de Yaracal, planteamiento de la(s) alternativa(s) de tratamiento a los suelos contaminados y finalmente selección técnica de la(s) alternativa(s) más apropiada(s) que mejor se adapte al proceso de remoción de crudo.

A continuación se presenta la descripción de las actividades llevadas a cabo para el logro de los objetivos propuestos ordenadas de acuerdo al desarrollo sistemático de la investigación:

3.2.1. Realización de barridos de formulación a los sistemas surfactante-aceite-agua, empleando como variables: la salinidad de la fase acuosa y tipo de alcohol, con la finalidad de encontrar la salinidad óptima.

Para llevar a cabo el barrido, se realizan búsquedas minuciosas de información relacionada con los barridos de formulación. A continuación se mencionan las siguientes actividades realizadas para lograr encontrar la salinidad óptima:

3.2.1.1 Revisión de bases teóricas, equipos y reactivos necesarios para llevar a cabo los barridos de formulación.

Para dar inicio al desarrollo de la investigación se recolectó, de diversas fuentes bibliográficas la información necesaria relacionada con los sistemas SOW. Esto con el objeto de realizar una revisión exhaustiva de las bases teóricas que sustentan los barridos de formulación, las condiciones de operación, surfactantes, diagramas de Winsor, soluciones, reactivos necesarios para llevar a cabo los barridos de formulación y el manejo de variables para la recopilación de datos, así como un gran número de tópicos referentes al área con la finalidad de construir las gráficas.



A través de este medio, se adquirieron conocimientos, que conllevaron a la adecuada comprensión de los barridos de formulación.

3.2.1.2 Planificación del experimento.

Para la ejecución del experimento se toman en cuenta una serie de pasos que se mencionan a continuación:

3.2.1.2.1 Preparación de soluciones.

Para la preparación de las soluciones madres al 10% p/v se consideró la naturaleza del surfactante (lipofílico o hidrofílico), ya que de éste depende la solubilidad del mismo en la solución a preparar. Es decir, si dicho surfactante es de naturaleza hidrofílico, el solvente a emplear es el agua. De lo contrario, si el surfactante es de naturaleza lipofílico se utiliza un determinado aceite.

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

Tabla 3.1

Materiales y reactivos utilizados para realizar los barridos de formulación

Reactivos	Tipo de alcohol	Aceites	Materiales
NaCl	1-pentanol	Kerosene	Tubos de ensayos graduados con tapas, buretas, balones aforados, pipetas, beackers, apuntador, embudos, entre otros.
SDS	1-butanol		
Agua destilada	2-butanol		
Heptano	1-propanol 1-hexanol		

Es importante destacar, que ninguno de los reactivos empleados en el presente trabajo fueron previamente tratados ni purificados. Sino que fueron manipulados considerando que todas las descripciones del etiquetado de cada uno de ellos correspondían correctamente con la sustancia o solvente en cuestión. Las



características físicas y químicas principales de cada uno de los reactivos, aceites y alcoholes mencionados anteriormente se presentan de forma detallada en el Apéndice C.

A continuación se prepararon las siguientes soluciones madres:

- Dodecil sulfato de sodio (SDS) al 10% p/v.

Se pesaron $(11,8000 \pm 0,0001)$ g de SDS en un beacker utilizando una balanza analítica, seguidamente se disolvieron en agua destilada y con agitación suave empleando una varilla de vidrio para evitar la formación de espuma; se pasó la solución a un balón aforado de 100 mL. Luego se colocó en el equipo de ultrasonido hasta que desapareciera la espuma formada de acuerdo a la figura 3.1, ya que, a pesar de la agitación suave no se logra evitar la formación de ésta, finalmente se realiza el aforo y se enrasa. Para preparar las solución madre del surfactante, se toma en cuenta su naturaleza y, de acuerdo a ésta se utiliza el solvente más adecuado (fase acuosa: agua; fase aceite: kerosene).



Figura 3.1. Equipo de ultrasonido utilizado para bajar la espuma formada al preparar la solución madre de SDS para su posterior enrase.



- Cloruro de sodio (NaCl) al 10 y 20% p/v.

Se pesaron $(10,0000 \pm 0,0001)$ g y $(20,0000 \pm 0,0001)$ g de NaCl respectivamente en un beacker utilizando una balanza analítica, seguidamente se disolvieron en agua destilada y agitación vigorosa empleando una varilla de vidrio hasta que desapareciera el sólido; se pasaron cada una a balones aforados de 100 mL y se realizó el aforo y el enrase de cada una de ellas.

Una vez determinado la masa de surfactante o sal necesaria para preparar un volumen fijo de solución (ver Apéndice A) se sigue el procedimiento que se muestra en la figura 3.2:

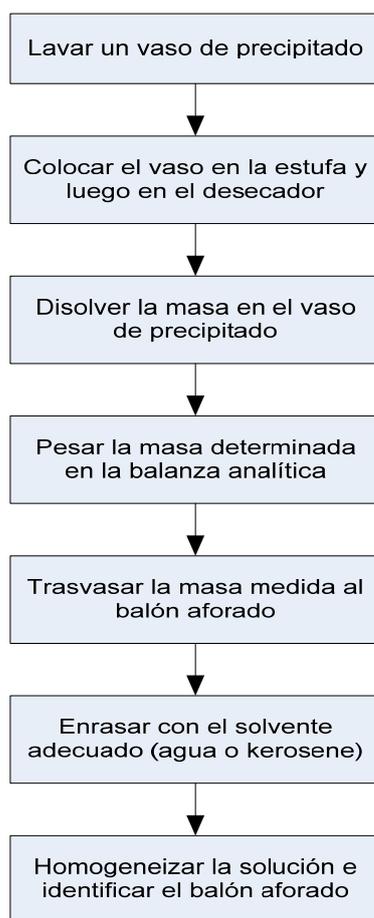


Figura 3.2. Procedimiento para preparar las soluciones madre.



Adicionalmente, se disponen de todos los alcoholes en frascos con tapas para evitar la volatilización de los mismos.

3.2.1.1.1 Identificación de las variables involucradas en la toma de datos.

A través de revisión bibliográfica especializada, consulta con profesores expertos en el área de formulación, se identifican las variables necesarias para la recolección de datos.

3.2.1.1.2 Diseño de los instrumentos de recolección de datos.

Para llevar a cabo el barrido de formulación del presente estudio, es esencial medir las siguientes variables: la salinidad en la fase acuosa y el tipo de alcohol. Los volúmenes de agua y NaCl presente en cada tubo se calculan usando la fórmula A.4 (ver Apéndice A), la concentración del surfactante SDS, el tipo de alcohol, al igual que el volumen de aceite a utilizar se fijaron por referencias bibliográficas y por los expertos en el área.

Tabla 3.2
Relación de volumen de los componentes empleados
para preparar los sistemas SOW con NaCl

Nº Tubo	Agua ($V \pm 0,01$)mL	NaCl ($V \pm 0,01$)mL	Alcohol ($V \pm 0,01$)mL	Volumen SDS ($V \pm 0,01$)mL	Kerosene ($V \pm 0,02$)mL	Volumen total ($V \pm 0,01$)mL

Finalmente, realizado los barridos de salinidad es necesario cuantificar los volúmenes de la fase acuosa, fase oleosa y microemulsión obtenidos. Estos valores serán tabulados en el modelo de tabla 3.3.



Tabla 3.3
Salinidades y volúmenes de las fases obtenidos en los sistemas
SOW para diferentes tipos de alcoholes

Salinidad (C ± 0,05)% p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL

3.2.1.1.3 Realización de barridos de formulación.

Para realizar los barridos de formulación de los sistemas SOW, se prepararon una serie de tubos de ensayo calibrados donde se varió la salinidad del sistema (el porcentaje p/v NaCl y el tipo de alcohol), agua, manteniendo composición constante de 1% p/v surfactante, 5,2% v/v de alcohol (1-pentanol, 1-butanol, 1-hexanol, 1-propanol, 2-butanol), 5,00 mL del kerosene.

La adición de reactivos a cada tubo del barrido se efectuó de acuerdo al siguiente orden establecido:

- Dodecil sulfato de sodio (SDS) al 1% p/v.
- Agua destilada.
- Cloruro de sodio (NaCl).
- Hidrocarburo: Kerosene.
- Alcohol.

Luego de preparar los sistemas con todos los componentes mencionados anteriormente, se cerraron los tubos de ensayo, se les realizó una agitación leve un par de veces en sentidos contrarios dejándolos en reposo hasta alcanzar el equilibrio (dependiendo del sistema este equilibrio se daba en minutos, horas o días).



El comportamiento de fase fue evaluado por inspección visual de los tubos una vez alcanzado el respectivo equilibrio (bifásico o trifásico), como se puede apreciar en la figura 3.3. El procedimiento de observación, consistió en determinar para cada tubo, la fase de microemulsión del sistema óptimo, donde estaba presente el surfactante en mayor proporción y se obtuvo una relación de Winsor igual a la unidad ($R=1$), es decir, cuando se igualan las interacciones entre el surfactante con el aceite y el agua respectivamente.



Figura 3.3. Visualización de la fase intermedia (microemulsión) para determinar la salinidad óptima.

Adicionalmente se nota una similitud en los volúmenes de las fases acuosa y oleosa. La ubicación del surfactante en las fases, se observó haciendo pasar un láser de luz, empleando un apuntador.

Los diversos sistemas que se prepararon fueron los siguientes:

- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/1-pentanol 5,2% v/v
- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/ 1-propanol 5,2% v/v
- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol 5,2% v/v
- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/2-butanol 5,2% v/v
- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/1-hexanol 5,2% v/v



3.2.1.1.4 Identificación de condición óptima en el sistema.

Es importante mencionar, que estos barridos de formulación se realizaron para identificar la condición óptima en el sistema; donde se observó un trifásico con volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa, en un volumen total de 10,0 mL. En este caso, se estaría en una interacción del surfactante, equivalente con la fase acuosa y la fase aceite, donde se encuentra una diferencia hidrofílica y lipofílica igual a cero ($HLD=0$) (Salager y Col, 2005).

3.2.1.1.5 Toma de datos.

Alcanzado el equilibrio, se procede a anotar el porcentaje de salinidad, volumen de la fase acuosa, volumen de microemulsión y volumen de la fase oleosa de todos los sistemas formados.

3.2.1.1.6 Elaboración de gráficas y análisis de resultados.

Finalmente con los datos obtenidos en la sección anterior 3.2.1.1.5 se elaboran las gráficas donde se muestran los volúmenes de las fases en relación al porcentaje de salinidad para cada barrido de formulación efectuado.

3.2.2 Determinación de la influencia de diferentes alcoholes y las variaciones de sus concentraciones en los sistemas surfactante-aceite-agua, con el propósito de obtener el comportamiento de la salinidad óptima.

Para el desarrollo de este objetivo, se realizan búsquedas minuciosas de información relacionada con los diferentes alcoholes. A continuación se mencionan las siguientes actividades realizadas para obtener el comportamiento de la salinidad óptima.

3.2.2.1 Planificación del experimento.

Para la ejecución del experimento se lleva a cabo el procedimiento realizado en la sección 3.2.1.2.



3.2.2.2 Identificación de las variables involucradas en la toma de datos.

A través de revisión bibliográfica especializada, consulta con profesores expertos en el área de formulación, se identifican las variables necesarias para la recolección de datos.

3.2.2.3 Realización de barridos de formulación con diversos alcoholes a diferentes concentraciones.

Para realizar los barridos de formulación de los sistemas SOW, se prepararon una serie de tubos de ensayos calibrados, donde se varió la salinidad del sistema (el porcentaje p/v, NaCl y las concentraciones de diversos alcoholes), agua, manteniendo composición constante de 1% p/v surfactante y 5,00 mL del kerosene. La adición de reactivos a cada tubo del barrido se efectuó de acuerdo al siguiente orden o protocolo establecido en el aparte 3.2.1.1.3.

Luego de preparar los sistemas con todos los componentes, se cerraron los tubos de ensayo, se inclinaron un par de veces en sentidos contrarios dejándolo en reposo hasta alcanzar el equilibrio (dependiendo del sistema, este equilibrio se daba en minutos, horas o días). Los diversos sistemas que se prepararon fueron los siguientes:

- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/1-pentanol al (4%v/v, 6%v/v, 7%v/v)
- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol al (4%v/v, 6%v/v, 8%v/v)
- Dodecil sulfato de sodio (SDS)/Agua/NaCl/Kerosene/2-butanol al (2%v/v, 4%v/v, 6%v/v, 8%v/v)

3.2.2.4. Toma de datos.

Alcanzado el equilibrio, se procede anotar el porcentaje de salinidad, volumen de la fase acuosa, volumen de microemulsión y volumen de la fase oleosa de todos los sistemas formados.



3.2.2.5. Elaboración de gráficas y análisis de resultados.

Finalmente con los datos obtenidos en la sección anterior se elaboran las graficas y los resultados.

3.2.3 Determinación del número de alcano equivalente (EACN) del crudo de Yaracal, empleando el concepto de correlación para la formulación óptima de Desviación Hidrofilica-Lipofílica (HLD), con el propósito de caracterizar el aceite utilizado.

Para desarrollar este objetivo, se realizan búsquedas minuciosas de información relacionada con el número de alcano equivalente. A continuación se mencionan las siguientes actividades realizadas para determinar el EACN del crudo de Yaracal.

3.2.3.1 Revisión de valores reportados de EACN y del concepto de correlación para la formulación óptima de Desviación Hidrofilica-Lipofílica (HLD) en diversas bibliografías.

Se recopiló información de valores reportados de EACN, que constó principalmente de papers, así como trabajos de grado, internet, material bibliográfico en las que podía visualizarse de forma genérica los conceptos relacionados con ésta, algunas de ellas con explicaciones que justifican su aplicación. También se analizaron las diversas correlaciones que se indican según el tipo de surfactante utilizado.

3.2.3.2 Realización de reuniones con las personas especializadas en formulaciones para la verificación de los datos obtenidos.

Para conocer información de las condiciones a las que se pueden utilizar las correlaciones para el cálculo del EACN; se realizaron continuas entrevistas al personal especializado de la misma, y especialistas en el área de fenómenos interfaciales. Todo esto se respaldó con el reconocimiento en laboratorio de las condiciones adecuadas para la obtención de la formulación óptima; necesaria para llevar a cabo los barridos de formulación y el manejo de variables para la recopilación de datos.



3.2.3.3. Planificación del experimento.

Para la ejecución del experimento se toman en cuenta una serie de pasos que se mencionan a continuación:

3.2.3.3.1 Preparación de soluciones.

- Preparación de la solución madre:

Para preparar una solución madre de crudo se procedió a medir una alícuota de 5mL con una pipeta del crudo suministrado por el laboratorio de petróleo, hidrocarburos y derivados (PHD), luego se añadió a un balón aforado de 100 mL, posteriormente se le agregó el kerosene utilizado en los barridos de formulación anteriores y se homogeneizó. Una vez que el crudo se ha disuelto completamente, se enrasa e identifica el balón.



Figura 3.4. Envase que contiene el crudo extraído del Mene de San Lorenzo suministrado por el laboratorio de petróleo, hidrocarburos y derivados (PHD).

A continuación se prepararon soluciones de crudo en un rango de (0,5-5) % v/v, como se describe a continuación:



- Dilución de la solución madre al 0,5%v/v

Se tomó de la solución madre una alícuota apreciable en un beacker limpio y seco y se midieron 0,5 mL con una pipeta graduada para luego añadirla en un balón de 100 mL, donde una vez que el crudo se ha disuelto completamente con kerosene, se enrasa y se identifica el balón.

A continuación en la tabla 3.4 se muestran los diferentes porcentajes de diluciones y sus respectivos volúmenes:

Tabla 3.4

Porcentaje de dilución y los volúmenes respectivos a partir de la solución madre

Concentración de la solución madre (%v/v)	Porcentaje de dilución (%v/v)	Volumen (V ± 0,01) mL
5	0,5	0,50
	1	1,00
	3	3,00
	5	5,00

3.2.3.3.2 Identificación de las variables involucradas en la toma de datos.

A través de revisión bibliográfica especializada, consulta con profesores expertos en la determinación de los parámetros necesarios para el cálculo del EACN, se identifican las variables necesarias para la recolección de datos.

3.2.3.3.3 Diseño de los instrumentos de recolección de datos.

Para llevar a cabo el barrido de formulación del presente estudio, es esencial medir las siguientes variables: la salinidad en la fase acuosa, las concentraciones de las diluciones. Los volúmenes de agua y NaCl presente en cada tubo se calculan usando la fórmula A.4 (ver apéndice A), la concentración del surfactante SDS, el alcohol y el volumen de crudo diluido a utilizar se fijaron por referencias bibliográficas y por los



expertos en el área, por otro lado se realizó el mismo procedimiento para determinar la salinidad óptima del sistema de referencia.

A continuación en la tabla 3.5 se muestran los modelos de las tablas de recolección de datos:

Tabla 3.5
Salinidades y volúmenes de las fases obtenidos en los sistemas
SOW para diferentes diluciones del crudo

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen crudo ($V \pm 0,2$) mL

Tabla 3.6
Salinidades y volúmenes de las fases obtenidos en los sistemas
SOW utilizando heptano como referencia

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen crudo ($V \pm 0,2$) mL

3.2.3.3.4 Realización de barridos de formulación.

Se prepararon en una serie de tubos las formulaciones, manteniendo composición constante en: surfactante SDS al 1% p/v, 1-pentanol al 5,2% v/v, agua y por último 5 mL de crudo diluido.

La variable a cambiar de un tubo a otro es el contenido de sal, por lo que se denomina barrido de salinidad, el cual permite la determinación del EACN del crudo utilizado.



Adicionalmente, se prepararon en una serie de tubos los barridos de formulación, manteniendo composición constante en: surfactante SDS al 1% p/v, 1-pentanol al 5,2% v/v, agua y por último 5 mL de heptano, con la finalidad de obtener la salinidad óptima de referencia.

3.2.3.3.5 Identificación de condición óptima en el sistema.

Una vez preparados los tubos para cada barrido de formulación, estos se dejaron reposar durante cuatro o cinco días para que el sistema alcanzara el equilibrio. El sistema óptimo se logró determinar de forma visual cuando la microemulsión medida contenía volúmenes iguales de agua y de aceite, es decir una relación de volúmenes 1:1.

3.2.3.3.6 Toma de datos.

Alcanzado el equilibrio, se procede anotar el porcentaje de salinidad, volumen de la fase acuosa, volumen de microemulsión y volumen de la fase oleosa de todos los sistemas formados.

3.2.3.4 Elaboración de gráficas y análisis de resultados.

Finalmente con los datos obtenidos en la sección anterior se elaboran las gráficas y los resultados.

3.2.3.5 Cálculo del número de alcano equivalente.

Una vez que se encontró la formulación óptima para cada sistema, se procedió luego a calcular el valor del EACN (número de átomos de carbono o su equivalente EACN) mediante la ecuación 2.3 del capítulo 2 de la Desviación Hidrofílica-Lipofílica (HLD) para surfactantes iónicos. De igual forma, se aplicó para el cálculo del EACN del sistema de referencia.



3.2.4 Evaluación del comportamiento de los sistemas surfactante-aceite-agua en las muestras de suelo contaminado, a fin de determinar el porcentaje de remoción de crudo.

Para llevar a cabo el desarrollo de este objetivo, una vez obtenidas las formulaciones de las microemulsiones óptimas se procedió a la aplicación de los sistemas SOW formulados, como una técnica preliminar de remediación a las muestras de suelo contaminado de Yaracal. A continuación se mencionan las actividades realizadas para determinar la remoción de crudo:

3.2.4.1 Preparación de las microemulsiones de los sistemas óptimos, para cada sistema formulado en los objetivos anteriores.

Obtenidos los sistemas óptimos formulados con los diferentes alcoholes en los objetivos anteriores, se procedió a repetirlos pero a una escala mayor, con la finalidad de alcanzar volúmenes mayores de microemulsión, ya que las formulaciones anteriores eran llevadas a cabo en tubos de 10 mL donde se obtenían volúmenes pequeños de éste. Estas formulaciones se realizaron utilizando cilindros graduados de 100 mL, figura 3.5, donde la adición de los reactivos es igual que en los objetivos anteriores.

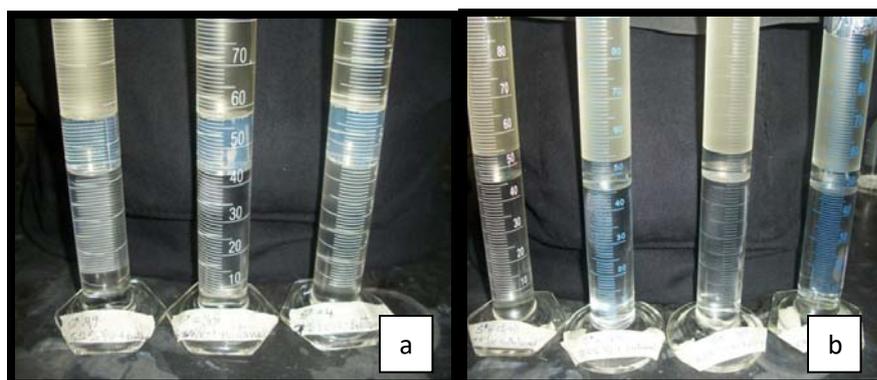


Figura 3.5. (a) Sistemas óptimos formulados para extraer la microemulsión formulada con 1-pentanol. (b) 1-butanol a diferentes concentraciones.



Posteriormente, el sistema formado se dejó reposar de 24 horas a 48 horas, para luego proceder a retirar el volumen obtenido de microemulsión con una pipeta graduada, figura 3.6(a) y trasladar a un envase el cual se mantendrá tapado hasta su posterior uso en la remoción, figura 3.6(b).



Figura 3.6. (a) Extracción de la microemulsión mediante una pipeta graduada.
(b) Frascos contentivos de las microemulsiones extraídas de los cilindros graduados de los diferentes sistemas estudiados.

Por su parte, las microemulsiones extraídas serán utilizadas en la siguiente sección.

3.2.4.2 Aplicación de las preparaciones anteriores a las muestras de suelo contaminado.

Luego de obtener la microemulsión del sistema óptimo, para cada sistema formulado, se colocó en contacto 2,00 mL de cada una, con 250 mg aproximadamente de suelo contaminado, (previamente tamizado con una malla de orificios tamaño 0,078 μm^2), de la muestra extraída de la zona de Yaracal, Estado Falcón.

Seguidamente, para la aplicación de los sistemas SOW al suelo contaminado se emplearon tubos de vidrio de aproximadamente 5 mL, como se aprecia en la figura 3.7.

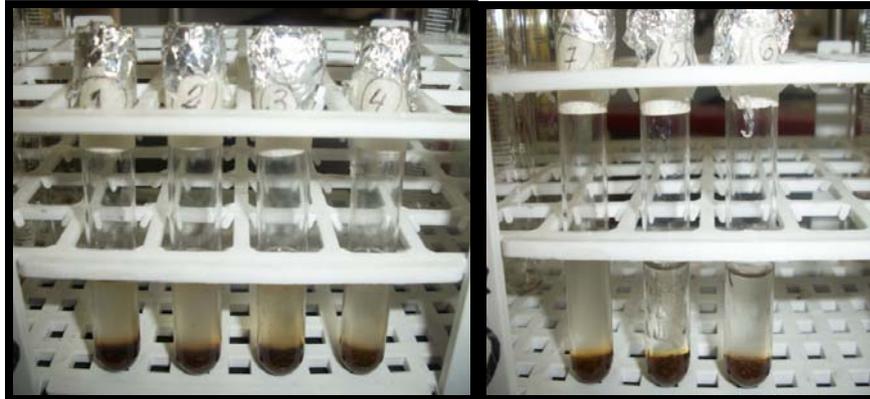


Figura 3.7. Muestras de suelo contaminado con crudo en contacto con la solución limpiadora (sistemas SOW) antes de la agitación mecánica.

En la figura 3.7, se observan los tubos de 5 mL contentivos de las microemulsiones óptimas en contacto con el suelo contaminado de crudo. Una vez finalizada la adición de los compuestos (suelo contaminado y sistemas SOW) a cada tubo; éstos se colocan en un sistema de agitación mecánica (disponible en el laboratorio PHD) por espacio de 4 horas para realizar la mezcla en forma homogénea a temperatura ambiente, figura 3.8.



Figura 3.8. Equipo utilizado para la agitación mecánica ubicado en el laboratorio PHD.

Luego de haber transcurrido el tiempo estipulado para el tratamiento del suelo contaminado en contacto con la microemulsión de los diferentes sistemas se procedió a retirar los tubos del agitador mecánico y se dejan reposar 24 horas, figura 3.9.



Figura 3.9. (a) Suelo contaminado con la solución limpiadora (sistemas SOW) luego de 4h de agitación y 24h de reposo. (b) Procedimiento de extracción del líquido sobrenadante después del tratamiento del suelo con los sistemas SOW.

A continuación se procedió a separar la solución limpiadora sobrenadante del suelo sedimentado mediante el uso de una pipeta Pasteur por succión, manteniendo el cuidado de no extraer partículas de suelo, figura 3.10.



Figura 3.10. Extracción de la solución con la pipeta Pasteur por succión luego de la agitación mecánica.

Una vez extraído el líquido sobrenadante después del tratamiento del suelo con los sistemas SOW, el sólido contenido en los tubos se filtró por gravedad, empleando papel de filtro Watman #1, lavándolo posteriormente con abundante agua para eliminar



el exceso de SOW, figura 3.11. Finalmente, se deja secar por 3 o 4 días a temperatura ambiente.



Figura 3.11. Filtrado y lavado del suelo con agua, para eliminar el exceso de SOW.

3.2.4.3 Toma de datos.

Finalmente al secarse las muestras de suelo lavado, se procede a pesar la cantidad de suelo limpio contenido en el papel filtro para cada sistema.



Figura 3.12. (a) Procedimiento para pesar la muestra de suelo contaminada con crudo y (b) suelos tratados con los sistemas SOW.

3.2.4.4 Cálculo del porcentaje de remoción de crudo.

Para la determinación del porcentaje de remoción de crudo del suelo remediado, se evaluó primeramente, el contenido de crudo presente en el suelo contaminado en Yaracal, Estado Falcón. Para ello la muestra puntual tomada del sitio en estudio, fue



tratada inicialmente por un método físico de tamizado (tamaño del orificio de malla, $0,078 \text{ plg}^2$), para homogeneizar el tamaño de las partículas de suelo y garantizar un comportamiento uniforme en todas las pruebas realizadas, figura 3.13.



Figura 3.13. Muestras de suelo contaminado (SC) y suelo de referencia (SR), tamizados.

Luego se procedió a determinar el contenido de materia orgánica proveniente de hidrocarburos (MOH), mediante la técnica de extracción por Soxhlet, con una mezcla de solventes, cloroformo-metanol ($\text{CHCl}_3\text{-CH}_3\text{OH}$) en relación 7:3 respectivamente (Pereira, 2000). Con la mezcla de solventes recomendada (Pereira, 2000), se prepararon las muestras para el análisis. Colocando aproximadamente 250 mg de SC y de SR respectivamente y por triplicado, en pliegos de papel de filtro tipo Watman #1, para llevarlos al equipo de extracción por Soxhlet, figura 3.14.



Figura 3.14. Equipo Soxhlet para extracción con solvente.



El ensayo se desarrolló, usando 250,0 mL de la mezcla CHCl_3 - CH_3OH en el balón de destilación, y ubicando las muestras envueltas y amarradas dentro del equipo, por espacio de cuatro horas, cumplido el tiempo establecido, se retiró cada muestra y se dejó secar en una estufa por espacio de 30,0 min a $100,0^\circ\text{C}$, figura 3.15, y enfriando en un desecador para luego ser pesada y registrar la pérdida de peso. El procedimiento se realizó hasta lograr peso constante, en una balanza analítica.



Figura 3.15. Estufa empleada para el secado del sólido.

Seguidamente, se realizó la determinación del contenido de materia orgánica (MO) con fines comparativos entre las muestras (suelo limpio y contaminado), antes y después del tratamiento con los sistemas SOW. Para ello, se emplearon técnicas analíticas tales como: gravimetría y espectroscopia infrarrojo (FT-IR).

Posteriormente, para la determinación del desempeño de la detergencia de los sistemas SOW sobre el suelo tratado, se realizó la determinación gravimétrica de la pérdida de peso de las muestras de suelo contaminado (SC), del suelo limpio de referencia (SR) y de las muestras tratadas, lavadas y secadas para cada sistema SOW. También, se realizó análisis de IR-FT a las muestras de suelo tratado con las microemulsiones óptimas formuladas mediante el espectrofotómetro, figura 3.16.



Figura 3.16. Espectrofotómetro de FTIR.

Para determinar la pérdida de peso de las muestras de suelo contaminado con los sistemas SOW formulados en las secciones anteriores se utilizó la ecuación A.3.

3.2.5 Planteamiento de la(s) alternativa(s) de tratamiento a los suelos contaminados con el fin de obtener diferentes opciones para el mejoramiento de éstos.

Para llevar a cabo el desarrollo de este objetivo, se realizaron búsquedas minuciosas de información relacionada con sistemas SOW en el tratamiento de suelos contaminados. Luego aplicando los conocimientos acerca de formulaciones para el tratamiento a éstos y mediante consultas bibliográficas se identificó cuales son las alternativas que deben emplearse para remoción de crudo. Así se consideró como posibilidad todas sin decidir aún cuales o como emplearlas. A continuación se mencionan las siguientes actividades realizadas que permiten conocer los diversos tratamientos.

3.2.5.1 Revisión de las diferentes técnicas de tratamiento de suelos.

El estudio de tecnologías de restauración ambiental como método para la eliminación de cualquier tóxico de carácter ambiental comienza en la década de los 80 y 90. En un principio, para poder limpiar un sitio contaminado era necesario realizar una extracción del material contaminado para trasladarlo a otro lugar donde se almacenaba para posteriormente incinerarlo. Sin embargo, por razones ambientales obvias, el



incineramiento puede resultar perjudicial para las comunidades cercanas a las instalaciones dedicadas a la recepción y cremación de los residuos.

En este sentido, se tiene que la industria petrolera emplea desde hace mucho tiempo la formulación de sistemas emulsionados para controlar la estabilidad y las propiedades reológicas durante el proceso de extracción. Su posterior almacenamiento y transporte de crudo; cuando el crudo alcanzó precios muy altos a finales de los años 70, se desarrollaron formulaciones en sistemas SOW, que permitieran vencer las fuerzas capilares para aumentar la extracción del crudo restante en los pozos, que eran considerados ya agotados según los métodos tradicionales de explotación petrolera.

La tecnología a utilizar depende entre otros muchos factores, del tipo de contaminante, tipo de terreno, afectación de las aguas subterráneas, del tiempo necesario para descontaminar, del costo de la actuación, etc. Sin embargo, para el desarrollo del presente trabajo son de mayor interés las técnicas de remoción de crudo a través de los sistemas SOW, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Emulsiones.
- Soluciones micelares.
- Microemulsiones.

3.2.5.2 Comparación entre las diversas técnicas de remoción de crudo en suelos contaminados.

En la sección anterior se especificaron algunas técnicas de tratamientos de suelos por medio de sistemas SOW, que fueron seleccionadas luego de una búsqueda bibliográfica minuciosa, revisión a través de Internet y consulta con expertos en el área de formulación y limpieza de suelos contaminados con crudo liviano; por lo cual en la sección 2.2.17 se muestra una descripción de cada una de ellas.



3.2.5.3 Identificación de la técnica necesaria para la remoción del crudo presente en las muestras de suelo estudiadas.

De la sección anterior se tiene que el tipo de técnica necesaria para el tratamiento de suelo depende de los contaminantes que se encuentren en el mismo, sin embargo, generalmente se utilizan soluciones con agentes tensoactivos. Las soluciones con agentes tensoactivos son eficaces para retirar contaminantes oleosos. También se tiene el uso de solventes orgánicos como solución de enjuague.

Los solventes orgánicos, como los alcoholes, se emplean para disolver ciertos contaminantes que el agua sola no puede disolver, además por razones prácticas se utilizan como cosurfactantes, sea por el papel físico de éste o bien por su influencia fisicoquímica.

En este sentido, se tiene que las técnicas necesarias para la remoción de crudo aplicables a la presente investigación son: emulsiones, soluciones micelares y microemulsiones.

3.2.5.4 Planteamiento de las alternativas.

Por lo expuesto en las secciones anteriores, se propusieron alternativas para el tratamiento de suelo contaminado con crudo liviano en Yaracal, Estado Falcón.

3.2.6 Selección técnica de la(s) alternativa(s) más apropiada(s) que mejor se adapte al proceso de remoción.

A través del desarrollo de la sección 3.2.5 se lograron plantear las alternativas que favorecerían la remoción del crudo presente en el suelo. Para la selección de la técnica más adecuada, se compararon cada una de las propuestas haciendo uso de una matriz de ponderación de puntos. En la cual se estableció cual alternativa resultaba más influyente en la remoción. Para ello, se utilizó una matriz de selección en la cual se definen los parámetros de discriminación y ponderación como la que se muestra en la tabla 3.7.



3.2.6.1 Definición de los factores de mayor importancia para la remoción de crudo que afecte la selección.

Con la finalidad de generar una matriz de selección que facilitará la escogencia de la mejor alternativa planteada, fue necesario decidir cuales serán los factores que se evaluarán en la misma.

3.2.6.2 Priorización de los factores proporcionándoles un porcentaje según su importancia.

A cada factor se la asoció un porcentaje para poder realizar un cálculo ponderado al momento de seleccionar la alternativa, en el cual cada parámetro evaluado tuviera una jerarquía sobre el otro, priorizándolo por importancia y requerimientos.

3.2.6.3 Selección de un rango de puntuación para la matriz.

Para evaluar cada parámetro, se seleccionaron ponderaciones que parten desde el 1 hasta el 5, ya que permite la sencilla decisión del puntaje que debe atribuirse a cada factor.

3.2.6.4 Selección de la puntuación para cada factor de las alternativas y escoger la mejor.

Ya conformada la matriz de selección y manteniéndose disponible toda la información referente a cada alternativa, se procedió a decidir los puntos que se atribuirían a cada factor de las alternativas, según los criterios planificados para la remoción de crudo.

3.2.6.5 Selección la alternativa que debe implantarse.

Los pasos para lograr el establecimiento de la alternativa más adecuada fueron los siguientes:

- La ponderación de las alternativas planteadas.
- La aplicación de la matriz de selección.
- La selección de la estrategia más adecuada.



Para la escogencia se utilizó una matriz de selección en la cual se define los parámetros de discriminación y ponderación como se muestra en la tabla 3.7. Su construcción se llevará a cabo mediante los siguientes pasos:

1. Definir las alternativas que van a ser jerarquizadas.
2. Definir los criterios de evaluación.
3. Definir el peso de cada uno de los criterios.
4. Construir la matriz.
5. Definir la escala de cada criterio: se elabora del 1 al 5; donde 1 representa la condición menos favorable para el criterio seleccionado; 3 representa la condición intermedia y 5 la condición más favorable. (Ver tabla 3.7).
6. Estimar cada alternativa aplicando la valoración del criterio mediante el uso de la escala definida anteriormente.
7. Multiplicar el valor asignado, por el porcentaje del criterio correspondiente y anotarlo en la alternativa seleccionada.
8. Sumar todas las casillas de la alternativa y anotar el resultado en la casilla total.

Una vez ponderadas cada una de las casilla de la matriz de selección y totalizadas las columnas de cada alternativa, se escoge como la propuesta seleccionada aquella que posea el mayor valor en la casilla total. A continuación en la tabla 3.7 se muestra el modelo de la matriz de selección a utilizar.

Tabla 3.7

Modelo de matriz de selección

Criterios	Ponderación (%)	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
		Valoración (1-5)		
Total				

Por último, después de haber aplicado la herramienta de depuración a cada una de las alternativas antes expuestas, se escoge la alternativa que presenta mayor puntaje.



CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos luego del desarrollo de las herramientas metodológicas propuestas.

4.1 Realización de barridos de formulación a los sistemas surfactante-aceite-agua, empleando como variables: la salinidad de la fase acuosa y tipo de alcohol, con la finalidad de encontrar la salinidad óptima.

Luego de una revisión bibliográfica exhaustiva de los barridos de formulación, y el desarrollo de la sección 3.2.1 se logra conocer las salinidades óptimas de los diversos sistemas formulados.

Para modificar de manera controlada la formulación de un sistema agua-aceite-surfactante, se utiliza el método llamado barrido unidimensional de formulación. Éste consiste en preparar una serie de sistemas agua-aceite-surfactante idénticos, a excepción de una de las variables de formulación llamada variable de barrido. Generalmente, la composición se escoge para que el punto representativo del sistema esté situado en medio de la zona polifásica del diagrama de Winsor, es decir con algunos por cientos de surfactante (0,5 a 5) % y volúmenes iguales de agua y aceite.

La variable de barrido puede ser cualquiera; por comodidad, se prefiere frecuentemente manipular las variables que provocan los mayores cambios del HLD, a saber la salinidad para los surfactantes iónicos y el EON promedio para los surfactantes no iónicos. Después de haber preparado la serie de tubos correspondientes a un barrido de HLD, se dejan equilibrar los sistemas a temperatura constante durante uno o dos días.

Cuando la salinidad aumenta gradualmente, el aspecto de los tubos y de los diagramas de fase, evolucionan como se indica sobre la figura 4.1. La fase que contiene la mayor parte del surfactante, se localiza fácilmente en la práctica, puesto que ella presenta, en la vecindad de la formulación óptima, cierta turbidez debido a la difusión de



luz por las estructuras formadas por el surfactante (micelas hinchadas o microemulsión). A continuación se muestra en la figura 4.1 un barrido de formulación similar al realizado experimentalmente.

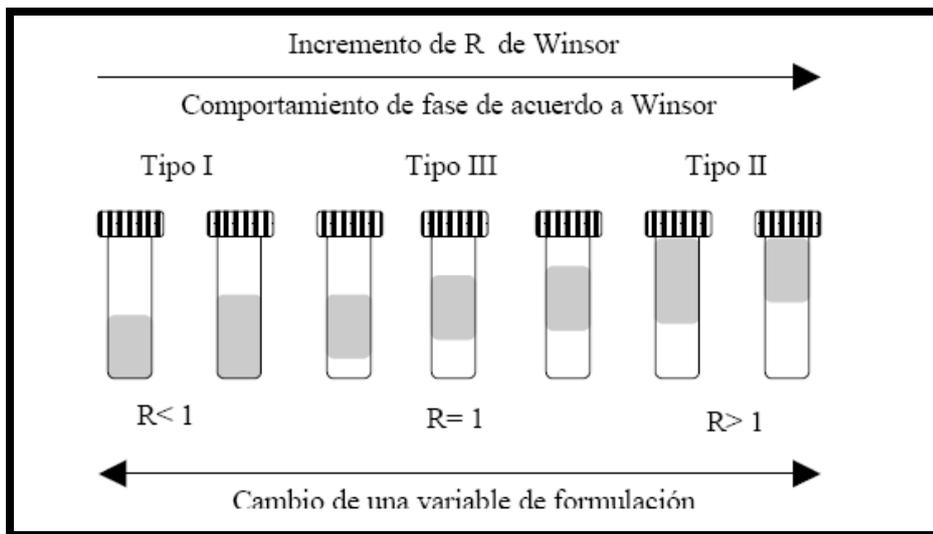


Figura 4.1. Barrido de formulación unidimensional similar al empleado experimentalmente. (Salager, 1998).

En el caso en que todas las fases son perfectamente incoloras, se puede detectar la fase que contiene la solución micelar o la microemulsión con la ayuda de un láser ya que el haz de luz coherente es visible por el efecto Tyndall, figura 4.2; puesto que las micelas gozan de la propiedad de reflejar y refractar la luz. De este modo, el trayecto que sigue el rayo luminoso en una solución coloidal es visualizado gracias a las partículas coloidales, convertidas en centros emisores de luz. La salinidad óptima corresponde al centro de la zona donde se obtienen los sistemas trifásicos de tipo Winsor III.

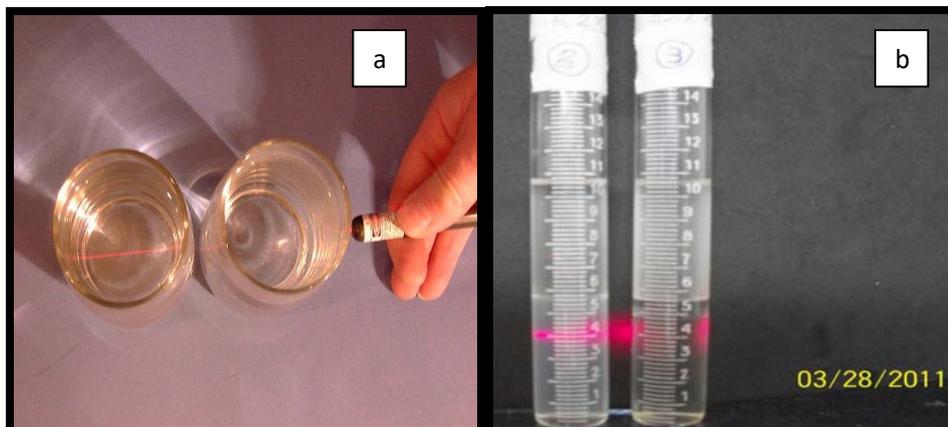


Figura 4.2. (a) Puede verse claramente el efecto Tyndall. El vaso de la derecha tiene una solución, mientras que el de la izquierda contiene un coloide. El haz de laser solo se ve en el segundo. (b) Paso del haz de luz donde el surfactante se encuentra en la fase acuosa.

El tubo correspondiente a esta “formulación óptima” ($HLD=0$) puede detectarse fácilmente por su relación volumétrica agua/aceite que es igual a uno. Es el tubo para el cual la fase intermedia (microemulsión) contiene cantidades iguales de agua y aceite y para el cual las fases oleosa y acuosa (situadas arriba y abajo de la microemulsión) tienen volúmenes iguales. En ciertos casos, no se obtiene sistema trifásico, sea porque se pasa de un lado a otro de la zona trifásica en el barrido cuando el incremento de HLD de un tubo al siguiente es demasiado grande, o porque el surfactante no es suficientemente eficaz para formar una microemulsión.

La formulación óptima también puede determinarse con más precisión, midiendo la tensión interfacial entre las fases de cada tubo con el fin de localizar la posición de la mínima tensión que coincide con la formulación óptima. Estas medidas necesitan un tensiómetro de gota giratoria ya que las tensiones interfaciales pueden ser inferiores a $0,1 \text{ mN/m}$. Éstas son a veces tan bajas que es difícil determinarlas de manera precisa. De hecho, esto importa poco porque lo que se busca es detectar la posición del mínimo de tensión y no su valor exacto.



Para llevar a cabo los barridos de formulación fue necesario preparar soluciones de surfactante al 1% p/v, solución de cloruro de sodio (NaCl) al 10% p/v y 20% p/v (Apéndice A), y filtrar previamente el aceite a utilizar (específicamente kerosene), como se aprecia en la figura 4.3.



Figura 4.3 Kerosene filtrado para eliminar impurezas.

Cabe considerar, por otra parte, que las concentraciones de las soluciones preparadas para el surfactante SDS, se presentan en la tabla C.6 del Apéndice C, con el fin de calcular la relación de los componentes.

La formulación de sistemas SOW, según diversas publicaciones (Salager, 2001), permiten la formación de microemulsiones al alcanzar el equilibrio. Estos son sistemas monofásicos y termodinámicamente estables, que son independientes de las fases acuosa y orgánica (Salager, 2001).

A continuación se detallan los resultados obtenidos para los diversos sistemas formados:

4.1.1 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2% v/v 1-propanol.

En la tabla 4.1 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-propanol al 5,2 %v/v.



Tabla 4.1
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-propanol al 5,2%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	5,6	0,0	4,8
3,00	5,4	0,0	4,8
5,00	5,4	0,0	5,0
7,00	5,6	0,0	4,8
8,00	4,2	0,0	6,0
9,00	5,4	0,0	4,8
10,00	5,2	0,0	5,0
11,00	4,2	0,0	5,8
14,00	5,4	0,0	5,0
15,00	5,4	0,0	5,2
16,00	5,8	0,0	4,8
17,00	5,4	0,0	4,8
18,00	5,2	0,0	5,2
20,00	5,2	0,0	5,0
20,50	5,2	0,0	4,8
21,00	5,6	0,0	4,8
21,10	5,0	0,6	4,8
21,20	4,0	0,8	4,8
21,30	4,6	0,8	4,8
21,35	4,6	0,6	4,8
21,36	5,0	0,6	4,8
21,40	4,6	0,8	5,0
21,45	5,0	0,6	5,0
21,50	5,0	0,8	4,8
22,00	5,0	0,8	4,6
24,00	5,0	0,6	4,8



La figura 4.4 muestra el barrido de salinidad para el sistema especificado, en la misma se pueden observar en los tubos el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1% hasta 24% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (Kerosene) y 5,2 % v/v (1-Propanol).



Figura 4.4. Barrido de formulación obtenido para el 1-propanol, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1% p/v hasta 21% p/v de sal; a partir de 21,1% p/v de salinidad aparece un sistema trifásico. Se realizó un ajuste en los tubos a valores de salinidad próximos a la de los tubos trifásicos con la finalidad de hallar el valor de salinidad óptima (S^*), ya que para este sistema el comportamiento de fase para encontrar la condición óptima variaba de un sistema trifásico a otro en pequeños volúmenes.

Alcanzada una salinidad de 21,45% p/v se obtiene volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (5,0 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (0,6 mL). Ver figura 4.5.

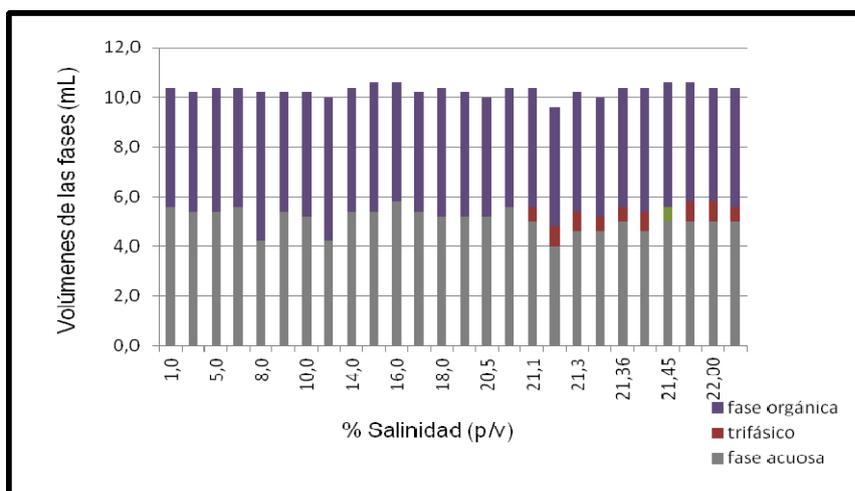


Figura 4.5. Barrido de formulación obtenido para el 1-propanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.

Cabe destacar, que justo en el sistema trifásico donde se igualan las interacciones entre el surfactante con el aceite y por otra parte con el agua ($R=1$), se considera el sistema óptimo. Es allí, donde se observan volúmenes iguales de las fases acuosa y oleosa en condiciones óptimas de salinidad, donde se alcanza la máxima solubilización simultánea de agua y aceite, para el sistema con SDS 1% p/v y 5,2% v/v 1-propanol, se pudo observar el sistema óptimo en 21,45% p/v de salinidad.

Así mismo, se logra obtener una interacción del surfactante, equivalente con la fase acuosa y la fase aceite, donde se encuentra una diferencia hidrofílica y lipofílica igual a cero ($HLD=0$); además se logran tensiones ultrabajas en las interfases microemulsión/agua y microemulsión/aceite del sistema óptimo, (Salager y Cols., 2005).

4.1.2 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2% p/v 1-pentanol.

En la tabla 4.2 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 5,2 %v/v.



Tabla 4.2
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-pentanol al 5,2%v/v

Salinidad (C ± 0,05)% p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
1,00	5,2	0,0	5,4
1,50	5,0	0,0	4,8
2,00	5,4	0,0	5,2
2,50	5,2	0,0	4,8
3,00	5,6	0,0	4,8
3,50	3,8	1,8	5,0
4,00	4,4	1,4	4,8
4,50	4,4	1,2	4,6
4,60	4,4	1,6	4,6
4,80	4,2	1,8	4,4
4,90	4,4	1,6	4,4
5,00	4,6	1,2	4,4
5,50	4,8	1,4	4,6
6,00	4,6	1,6	4,4
6,50	4,4	0,2	5,6
7,00	4,6	0,0	5,8

La figura 4.6 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado que va desde 1% hasta 7% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (Kerosene) y 5,2 % v/v (1-Pentanol). Para este sistema formulado, se logró el paso del respectivo surfactante estudiado, desde la fase acuosa, pasando por varios sistemas de microemulsión o trifásico (Winsor III), hasta llegar a la fase oleosa, figura 4.6.



Figura 4.6. Barrido de formulación obtenido del 1-pentanol, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

Para este barrido, en la figura 4.6 se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 1% p/v hasta 3% p/v de sal; a partir de 3,5% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 4,9%p/v, se obtiene volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,4 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,6 mL).

Por otro lado, se pudo notar que en las interfases microemulsión/agua y microemulsión/aceite de los tubos que presentan un sistema trifásico no se forman los meniscos cóncavo o convexo, como los conocidos para algunos líquidos, debido a las tensiones ultrabajas existentes, figura 4.7.

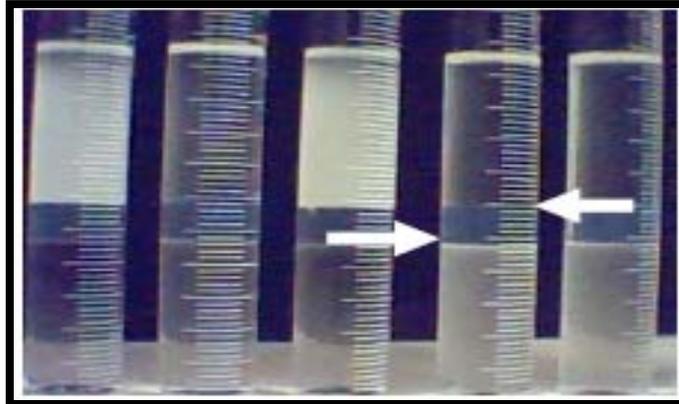


Figura 4.7. Apreciación del menisco plano formado en la microemulsión/agua (flecha inferior) y microemulsión/aceite (flecha superior).

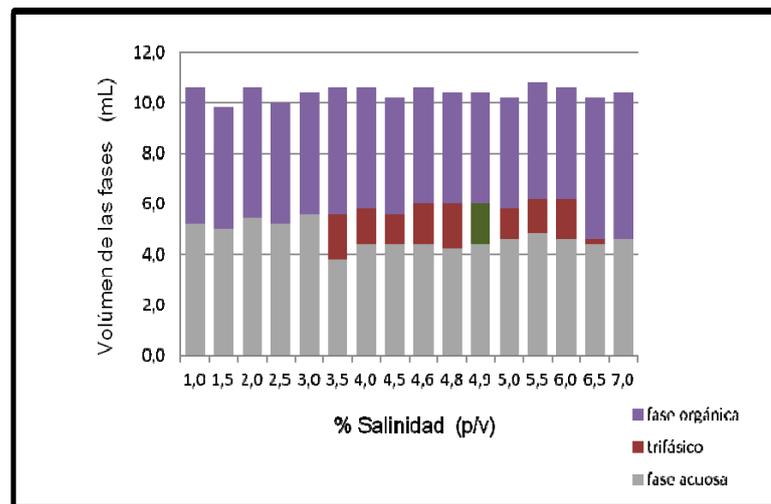


Figura 4.8. Barrido de formulación obtenido para el 1-pentanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.

La figura 4.8 muestra el típico comportamiento de un barrido de formulación para un sistema SOW, en el cual a medida que se aumenta la cantidad de la sal añadida se favorece la transición de surfactante desde la fase acuosa (en un sistema Winsor I, en el cual dominan las interacciones hidrofílicas) a una serie de sistemas trifásicos hasta obtener o alcanzar la formulación óptima en el cual se presentan iguales las



interacciones hidrofílicas y lipofílicas. Por último, hacia la fase orgánica donde las interacciones lipofílicas son las más fuertes. Finalmente, para el sistema con SDS 1% p/v y 5,2% v/v 1-pentanol, se pudo observar el sistema óptimo en 4,9% p/v de salinidad.

4.1.3 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2% p/v 1-butanol.

En la tabla 4.3 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-butanol al 5,2 %v/v.

Tabla 4.3
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol al 5,2%v/v

Salinidad (C ± 0,05)% p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
1,00	5,4	0,0	5,2
1,50	5,6	0,0	5,2
2,50	5,2	0,0	5,2
3,00	5,6	0,0	5,2
3,50	5,6	0,0	5,4
4,50	4,6	0,0	5,4
6,00	5,4	0,0	4,8
6,50	5,6	0,0	4,8
7,00	5,4	0,0	4,8
7,20	4,4	1,0	4,8
7,50	4,4	1,0	5,0
7,80	4,4	1,0	5,0
8,00	4,6	1,0	5,0
8,20	4,4	1,0	4,8
8,50	4,4	1,0	4,8
9,00	4,6	0,8	4,8
9,20	4,6	0,8	4,6
9,50	4,6	0,8	5,0
9,90	4,8	1,2	4,8
10,00	4,6	1,1	5,0



Tabla 4.3 (Continuación)
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol al 5,2%v/v

Salinidad (C ± 0,05)% p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
11,00	4,6	1,0	4,8
12,20	4,7	1,0	4,8
12,40	4,6	0,8	5,0
13,00	4,4	0,8	4,8
14,00	5,0	0,8	4,6
16,00	4,6	0,6	5,0

La figura 4.9 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1% hasta 16% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (Kerosene) y 5,2 % v/v (1-butanol).



Figura 4.9. Barrido de formulación unidimensional del 1-butanol al 5,2%v/v.



Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1% p/v hasta 7% p/v de sal; a partir de 7,2% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 9,90% p/v se obtiene volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,8 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,2 mL). Pudiéndose notar que los volúmenes de los trifásicos eran de menor cantidad en comparación con las obtenidas en el sistema estudiado para el 1-pentanol, como consecuencia de que los barridos efectuados de éste no presentaron una buena solubilización de las fases acuosa y oleosa en la microemulsión.

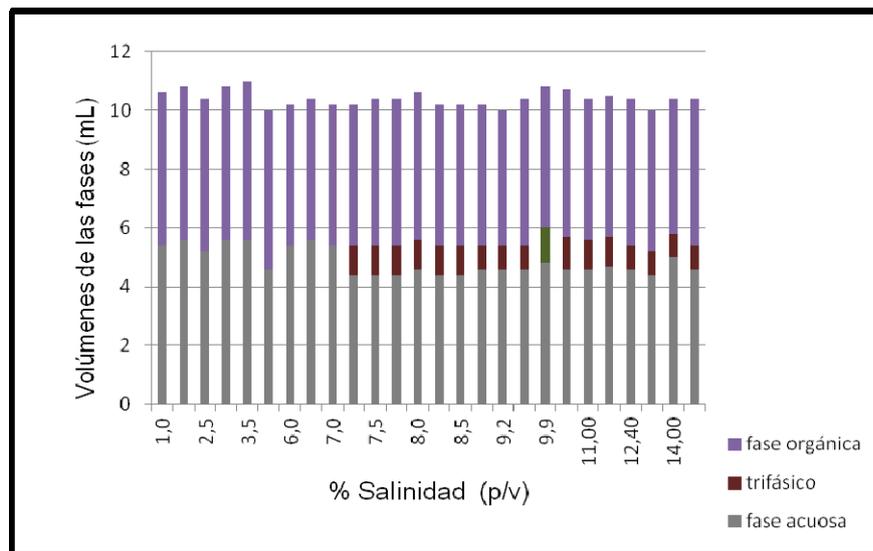


Figura 4.10. Barrido de formulación obtenido para el 1-butanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.

Para el sistema con SDS 1% p/v y 5,2% v/v 1-butanol, se pudo observar el sistema óptimo en 9,90% p/v de salinidad.



4.1.4 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2% p/v 2-butanol.

En la tabla 4.4 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 2-butanol al 5,2 %v/v.

Tabla 4.4
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2-butanol al 5,2%v/v

Salinidad (C ± 0,05)% p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
1,00	5,4	0,0	4,8
3,00	5,4	0,0	5,0
5,00	5,4	0,0	5,0
7,00	5,6	0,0	5,0
8,00	5,4	0,0	5,2
9,00	5,4	0,0	4,8
10,00	5,4	0,0	5,0
12,00	5,4	0,0	5,0
14,00	5,2	0,0	5,0
16,00	4,6	0,8	5,0
20,00	4,8	0,6	4,8

La figura 4.11 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1% hasta 20% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 5,2 % v/v (2-butanol).



Figura 4.11. Barrido de formulación obtenido del 2-butanol, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 1% p/v hasta 14% p/v de sal; a partir de 16% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Por otro lado, en la figura 4.12 para un barrido de salinidad en el rango de 1% p/v a 8% p/v de NaCl, sólo se obtuvieron sistemas bifásicos.



Figura 4.12. Barrido de formulación obtenido del 2-butanol, donde se indica la formación sólo de sistemas bifásicos en un rango de [1-8] % p/v de NaCl.

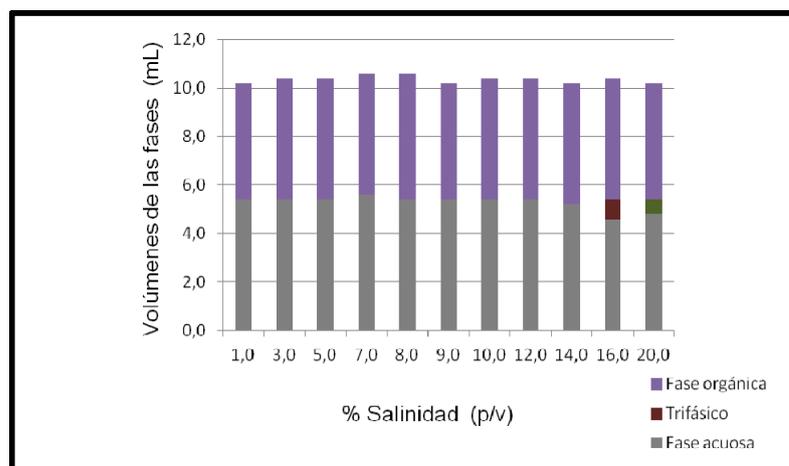


Figura 4.13. Barrido de formulación obtenido para el 2-butanol, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.

Para el sistema con SDS 1%p/v y 5,2%v/v 2-butanol, se obtiene la salinidad óptima al 20% p/v de NaCl.

4.1.5 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2% p/v 1-hexanol.

En la tabla 4.5 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-hexanol al 5,2 %v/v.

Tabla 4.5
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-hexanol al 5,2%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
0,20	4,8	0,0	5,6
0,40	5,0	0,0	5,6
0,60	4,6	0,0	5,8
0,80	4,6	0,0	5,8



Tabla 4.5 (Continuación)
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-hexanol al 5,2%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	4,6	0,0	6,2
3,00	4,0	0,0	6,2
4,00	4,0	0,0	6,2
5,00	4,6	0,0	5,8
6,00	4,8	0,0	6,0
7,00	4,4	0,0	5,8
8,00	4,4	0,0	5,8

La figura 4.14 muestra el barrido de salinidad para el hexanol. En la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1% hasta 8% p/v de sal, así como para concentraciones de 0,2 % hasta 1,0 % de sal manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 5,2 % v/v (1-hexanol).



Figura 4.14. Barrido de formulación obtenido del hexanol, donde se aprecia sólo la formación de sistemas bifásicos en un rango de salinidad de [0,2-1,0] %p/v de NaCl.



Para el hexanol se presenta un comportamiento muy peculiar, ya que a pesar de que el surfactante utilizado es muy hidrofílico, el mismo migra rápidamente hacia la fase oleosa, específicamente kerosene, es decir que ocasionó que el surfactante tardará más en transferirse a la interfase, evidenciándose luego que para alcanzar el equilibrio perdurara más tiempo en comparación con los demás barridos.

Esta situación no es conveniente para el estudio de formulación, por lo tanto, este alcohol se descarta para la remoción de crudo, puesto que no se formaron sistemas trifásicos para luego encontrar la salinidad óptima y con ello realizar la remoción, sino más bien se formaron sistemas bifásicos en todos los barridos estudiados, lo que implica que a medida que aumenta la cadena hidrocarbonada del alcohol, éste se absorbe menos, es decir, se queda en el aceite. A continuación se muestra en la figura 4.15 el barrido de formulación para el sistema SOW con 1-hexanol.

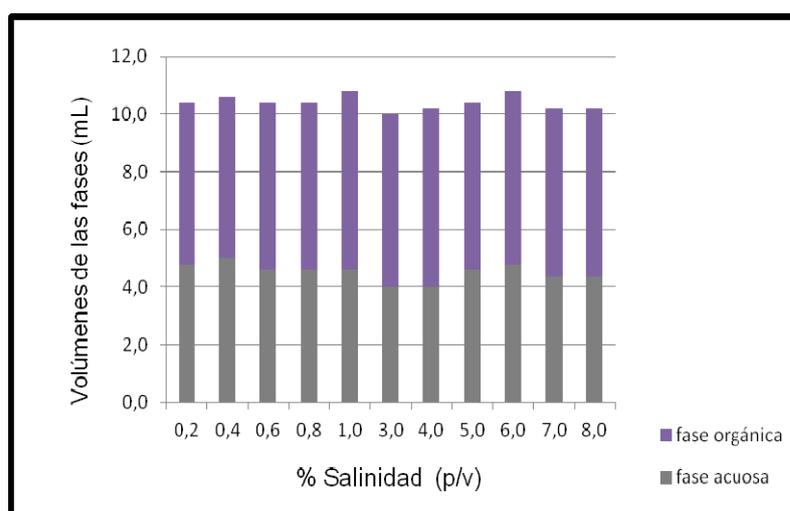


Figura 4.15. Barrido de formulación obtenido para el 1-hexanol, donde se indica la ubicación de sólo sistemas bifásicos (Winsor II).

En otro orden de ideas, se muestra en la tabla 4.6, el resumen de las salinidades óptimas de los sistemas con SDS al 1% p/v y 1-hexanol, 1-pentanol, 1-butanol, 2-butanol y 1-propanol al 5,2% v/v.



Tabla 4.6

Contenido de salinidad (%p/v), para la formulación óptima de los sistemas con SDS al 1% p/v y alcohol al 5,2%v/v

Tipo de alcohol	Salinidad en la formulación óptima (C± 0,02)% p/v	Volumen del trifásico (V ± 0,2) mL
1- hexanol	-----	-----
1- pentanol	4,90	1,6
1- butanol	9,90	1,2
2- butanol	20,00	0,6
1-propanol	21,45	0,6

De acuerdo a los datos obtenidos y los reflejados en la tabla 4.6, se tiene que generalmente los sistemas SOW se formulan con alcoholes, los cuales tienen una doble función: por un lado actúan como co-surfactantes o cosolventes, reduciendo o eliminando las estructuras de geles o cristales líquidos que tienden a formar los surfactantes puros, y por la otra tienen influencia en el balance de afinidad entre el anfífilo y su ambiente fisicoquímico. El efecto de esta variable depende de su estructura y de la concentración. En muchos casos contribuye a incrementar la lipofiliidad de la mezcla de surfactantes en la interfase, lo cual conlleva a una transición en el comportamiento de fase.

En este mismo orden de ideas, una parte de las moléculas de alcohol se van a insertar entre las moléculas de surfactantes constituyentes de la película interfacial, mientras que el resto se reparte entre las fases acuosa y oleosa según su afinidad relativa. En este caso los alcoholes de cadena corta como el propanol es más hidrofílico en comparación con el hexanol, mediante el cual incrementa ligeramente la afinidad del surfactante SDS por la fase acuosa, mientras que el hexanol y el pentanol se localizan primordialmente en el aceite. Así mismo, el 1-butanol y el 2-butanol poseen afinidades



casi igual por el aceite y por el agua, ellos por tanto, no modifican notablemente el HLD pero flexibilizan la película interfacial y aceleran la obtención del estado de equilibrio.

Para ilustrar la tabla 4.6 se muestra a continuación la figura 4.16 para una visualización más conveniente de los resultados.

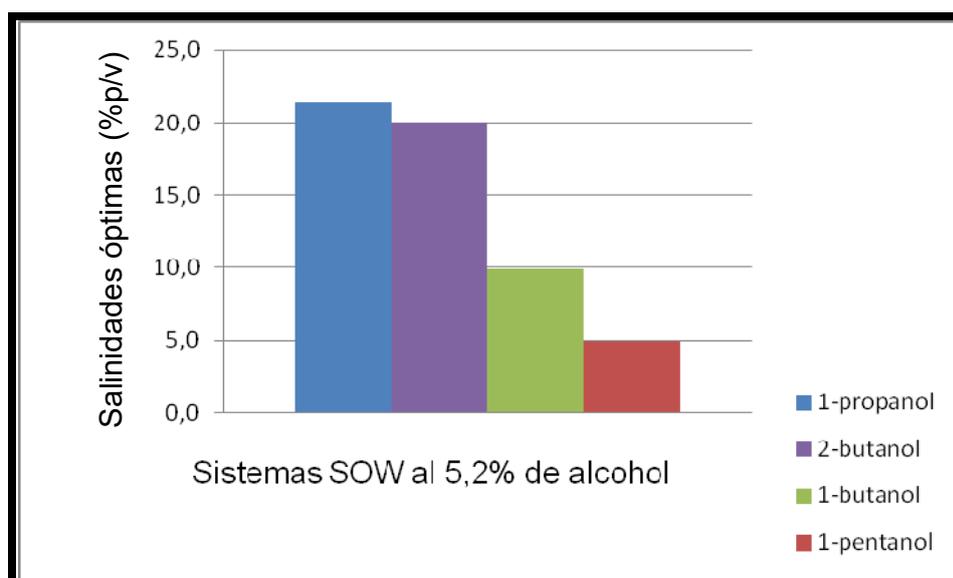


Figura 4.16. Comportamiento de diversos alcoholes a la concentración de 5,2%v/v.

En la figura 4.16 se puede visualizar de forma rápida que los elementos de mayor altura son los sistemas SOW que presentan las mayores concentraciones de sal para poder obtener los trifásicos, mientras que los elementos más cercanos al eje constituyen los que tienen menos contenido de sal.

Por consiguiente, en la figura 4.16, se puede observar que para el 1-propanol se obtuvo una salinidad óptima de 21,45 %p/v de NaCl. Este valor tan alto de salinidad hace suponer que para hacer migrar el surfactante de la fase acuosa a la fase oleosa se requiere añadir una elevada cantidad de sal para disminuir la interacción en el agua y por lo tanto la afinidad que posee el surfactante por el agua, puesto que el surfactante es de carácter hidrofílico. No obstante este comportamiento se debe a la naturaleza del



alcohol, puesto que es de cadena corta, es decir de tendencia hidrofílica, por tanto se le puede atribuir a la mezcla una cierta tendencia hacia el agua por contener una mayor proporción de un alcohol hidrofílico. Sin embargo, por todo lo mencionado anteriormente éste alcohol se descarta del presente estudio.

Por su parte, para el 1-butanol se obtuvo una salinidad óptima de 9,90 %p/v de NaCl. Este valor hace suponer que para hacer migrar el surfactante de la fase acuosa a la fase oleosa se requiere añadir una elevada cantidad de sal. Puesto que por ser un alcohol intermedio de afinidad casi equitativa tanto por el agua como por la fase oleosa no permite que el surfactante vaya con tanta facilidad a la fase de la microemulsión y luego hacia la fase oleosa.

Por último, se tiene que para el 1-pentanol el contenido de sal es bajo como se aprecia en el gráfico. En consecuencia, el hecho que se halla encontrado la formulación óptima a 4,9 %p/v de NaCl en comparación con los otros sistemas se debe a la naturaleza de éste. En tal sentido a pesar de tener una cadena larga de carbonos en su estructura tendencia favorable hacia la fase aceite, contrarresta de cierta forma la afinidad del surfactante por la fase acuosa, logrando de esta forma que se necesite una baja cantidad de sal para disminuir la actividad del agua en el barrido y a su vez que disminuya la hidrofiliidad del surfactante haciendo que éste migre de la fase acuosa con relativa facilidad en comparación con los sistemas anteriormente estudiados.

4.2 Determinación de la influencia de diferentes alcoholes y las variaciones de sus concentraciones en los sistemas surfactante-aceite-agua, con el propósito de obtener el comportamiento de la salinidad óptima.

Después de una revisión bibliográfica exhaustiva de los diferentes tipos de alcoholes utilizados en los sistemas SOW además del desarrollo de la sección 3.2.2 se logran identificar las salinidades óptimas obtenidas con las diferentes concentraciones de alcoholes utilizados. Es importante mencionar que los alcoholes seleccionados para este objetivo son los mostrados en la tabla 4.7, no utilizando en este caso el 1-propanol



por su naturaleza hidrofílica, puesto que se obtienen salinidades óptimas muy elevadas las cuales no son convenientes para el presente estudio.

Para llevar a cabo los barridos de formulación fue necesario preparar soluciones de surfactante al 10%p/v, solución de cloruro de sodio (NaCl) al 10%p/v y 20%p/v (Apéndice A), y filtrar previamente el aceite a utilizar (específicamente kerosene). Las concentraciones de las soluciones preparadas para el SDS, se presentan en la tabla C.6 del Apéndice C. A continuación en la tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 4.7

Salinidades óptimas de diversos alcoholes a distintas concentraciones

Concentración de alcohol (%v/v)	Salinidades óptimas (C± 0,05)% p/v				
	2	4	6	7	8
1-pentanol	No forma trifásico	7,00	4,50	4,00	No forma trifásico
1-butanol	-----	12,40	9,00	-----	8,00
2-butanol	No forma trifásico	a altas concentraciones	a altas concentraciones	a altas concentraciones	a altas concentraciones

En esta tabla 4.7 se puede apreciar que para el 1-pentanol se obtuvieron sistemas trifásicos a concentraciones de éste en 4,6 y 7 %v/v, mientras que a concentraciones de 2 y 8%v/v de alcohol no se obtuvieron trifásicos, sólo sistemas bifásicos. Por otra parte, para el 1-butanol sólo se encontraron trifásicos en las concentraciones de 4,6 y 8%v/v y en las de 2 y 7%v/v no se formó ni trifásico ni bifásico. Por último para el 2-butanol para las concentraciones de 4,6,7 y 8 %v/v sólo se forman trifásicos pero a elevadas concentraciones de sal, siendo no convenientes para el



estudio, debido a la naturaleza hidrofílica de éste alcohol, por lo cual se descarta para su estudio en el presente trabajo.

4.2.1 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 4,0 %v/v 1-pentanol.

En la tabla 4.8 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 4,0 %v/v.

Tabla 4.8

Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-pentanol al 4,0%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	5,4	0,0	5,0
3,00	5,4	0,0	4,8
3,80	5,2	0,0	4,8
4,00	5,4	0,0	5,0
4,50	3,0	2,6	4,6
5,00	3,4	2,0	4,8
5,50	3,6	2,0	4,8
7,00	4,2	1,6	4,8
8,00	4,8	1,0	4,4
9,00	4,6	1,4	4,6
10,00	5,8	0,0	4,6
11,00	4,8	0,0	5,6
12,00	4,8	0,0	5,6
14,00	5,0	0,0	5,4
16,00	5,0	0,0	5,2

La figura 4.17 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1,00% hasta



16,00% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, un volumen de 5,00 mL de aceite (kerosene) y 4,0 % v/v 1-pentanol.



Figura 4.17. Barrido de formulación obtenido del 1-pentanol al 4% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

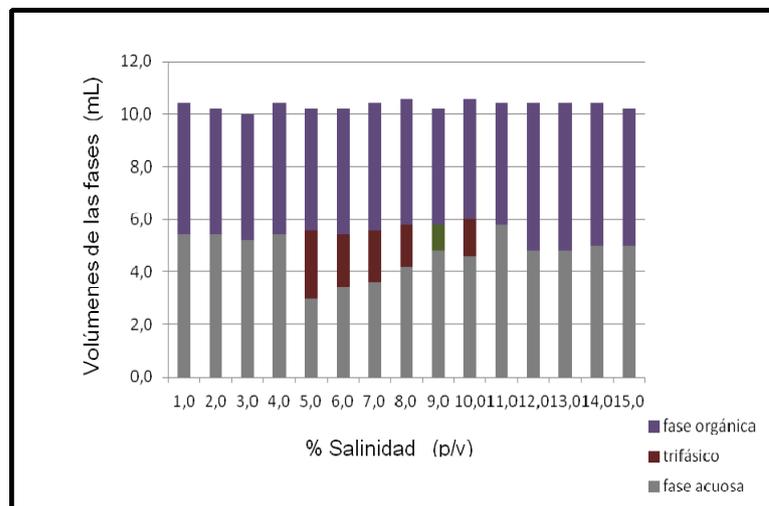


Figura 4.18. Barrido de formulación obtenido para el 1-pentanol al 4% v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.



Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 1,00% p/v hasta 4,00% p/v de sal; a partir de 4,50% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada la salinidad óptima de 9,0 %p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,6mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,6 mL).

4.2.2 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 6,0 %v/v 1-pentanol.

En la tabla 4.9 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 6,0 %v/v.

Tabla 4.9
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-pentanol al 6,0%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	5,6	0,0	4,8
2,00	5,4	0,0	5,4
3,00	5,6	0,0	4,8
3,20	3,2	2,2	4,8
3,40	3,2	1,6	4,8
3,50	3,8	2,0	5,0
4,00	4,4	1,2	4,8
4,50	4,4	1,4	4,4
5,00	4,6	1,4	4,6
5,50	4,4	1,6	4,6
5,80	4,8	1,4	4,4
6,00	4,6	0,0	6,0
7,00	4,8	0,0	5,6
8,00	4,8	0,0	5,8



La figura 4.19 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado que va desde 1% hasta 8% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 6,0 % v/v (1-pentanol).



Figura 4.19. Barrido de formulación obtenido del 1-pentanol al 6% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

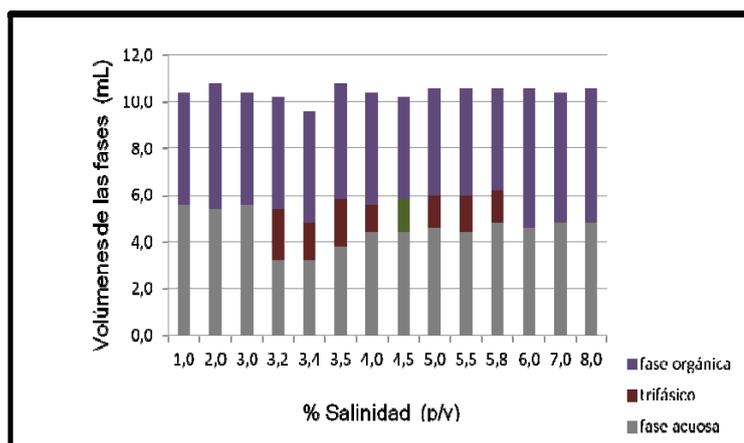


Figura 4.20. Barrido de formulación obtenido para el 1-pentanol al 6% v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.



Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 1,00% p/v hasta 3,00% p/v de sal; a partir de 3,20% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 4,50% p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,4 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,4 mL).

4.2.3 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 7,0 %v/v 1-pentanol.

En la tabla 4.10 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 7,0 %v/v.

Tabla 4.10
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-pentanol al 7,0%v/v

Salinidad (C ± 0,05)% p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
1,00	5,4	0,0	5,2
1,50	5,4	0,0	5,2
2,00	5,4	0,0	5,2
2,50	5,6	0,0	5,2
3,00	4,0	1,8	4,6
3,50	4,4	1,6	4,8
4,00	4,6	1,6	4,6
4,50	4,8	1,4	4,2
4,80	4,6	0,0	5,0
5,00	4,8	0,0	5,8
6,00	5,0	0,0	6,0
7,00	4,4	0,0	6,0
8,00	4,6	0,0	5,8

La figura 4.21 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida



que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado que va desde 1% hasta 8% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 7,0 % v/v 1-pentanol.



Figura 4.21. Barrido de formulación obtenido del 1-pentanol al 7% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

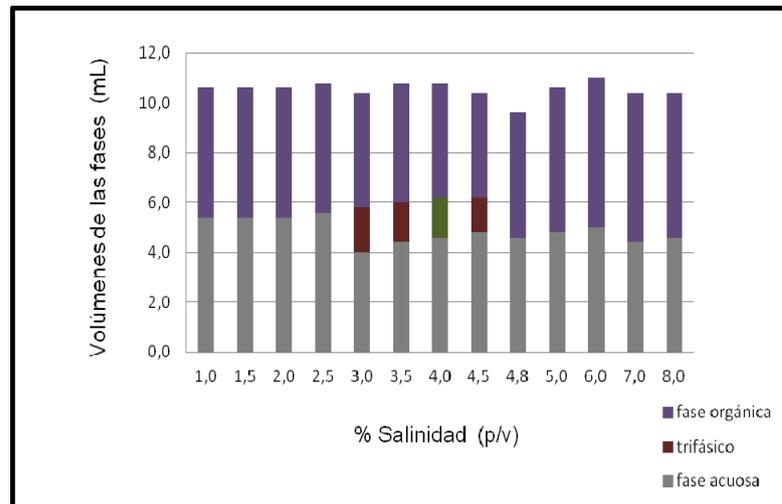


Figura 4.22. Barrido de formulación obtenido para el 1-pentanol al 7% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.



Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 1,00% p/v hasta 2,5% p/v de sal; a partir de 3,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 4,0% p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,6 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,6 mL).

4.2.4 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 4,0 %v/v 1-butanol.

En la tabla 4.11 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-butanol al 4,0 %v/v.

Tabla 4.11
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol al 4,0%v/v

Salinidad (C ± 0,05) %p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
8,00	5,4	0,0	5,0
9,00	4,2	1,0	4,8
10,00	4,4	1,0	4,8
11,00	4,2	1,0	4,8
12,00	4,4	1,0	4,8
12,40	4,8	0,8	4,8
13,00	4,8	0,8	4,6
14,00	4,6	0,8	5,0
15,00	4,7	0,8	4,9
16,00	4,8	0,8	4,6

La figura 4.23 muestra el barrido de salinidad para el 1-butanol, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1% hasta 16% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 4,0 % v/v 1-butanol.

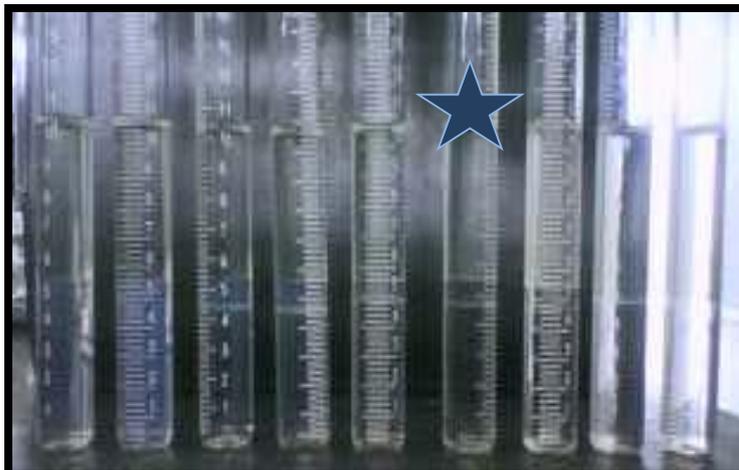


Figura 4.23. Barrido de formulación obtenido del 1-butanol al 4% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

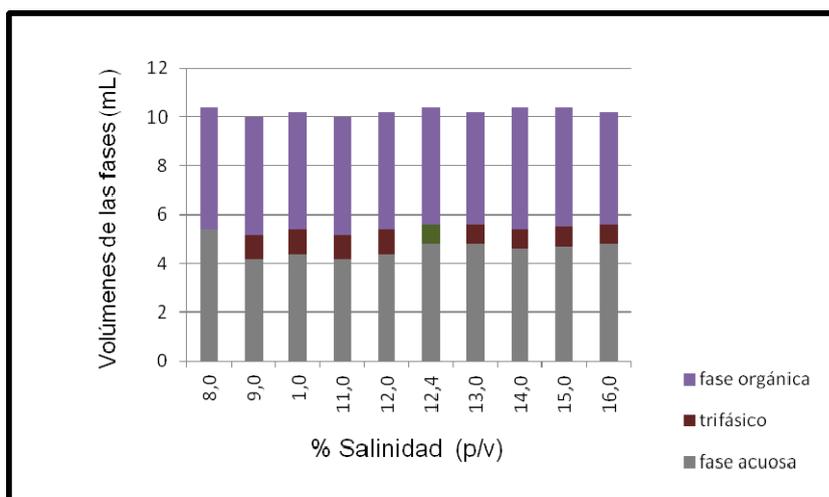


Figura 4.24. Barrido de formulación obtenido para el 1-butanol al 4% v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 1,00% p/v hasta 8,0% p/v de sal; a partir de 9,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 12,4% p/v, se observan volúmenes iguales



de fases acuosa y oleosa (4,8 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (0,8 mL).

4.2.5 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 6,0 %v/v 1-butanol.

En la tabla 4.12 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-butanol al 6,0 %v/v.

Tabla 4.12
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol al 6,0%v/v

Salinidad (C ± 0,05) %p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
1,00	5,6	0,0	5,0
3,00	5,2	0,0	5,0
5,00	5,4	0,0	5,2
6,00	5,2	0,0	5,2
6,20	5,3	0,0	5,1
6,30	5,6	0,0	5,2
6,40	4,4	1,0	4,8
6,50	4,6	1,0	5,0
7,00	4,4	0,8	5,2
8,00	4,6	1,0	5,0
8,20	4,6	0,9	5,0
9,00	4,4	1,8	4,4
10,00	4,8	0,8	5,0
11,60	4,6	1,2	4,6
12,00	4,6	1,2	4,8



Tabla 4.12 (Continuación)
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol al 6,0%v/v

Salinidad (C ± 0,05) %p/v	Volumen acuoso (V ± 0,2) mL	Volumen trifásico (V ± 0,2) mL	Volumen aceite (V ± 0,2) mL
13,00	4,7	1,4	4,6
14,00	4,8	1,4	4,4
16,00	4,8	0,8	5,0

La figura 4.25 muestra el barrido de salinidad para el 1-butanol al 6% v/v, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1% hasta 16% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 6,0 % v/v 1-butanol.

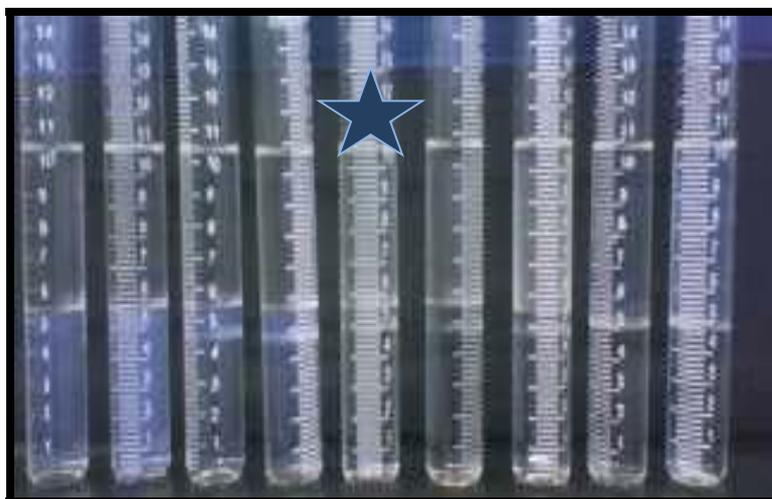


Figura 4.25. Barrido de formulación obtenido del 1-butanol al 6% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

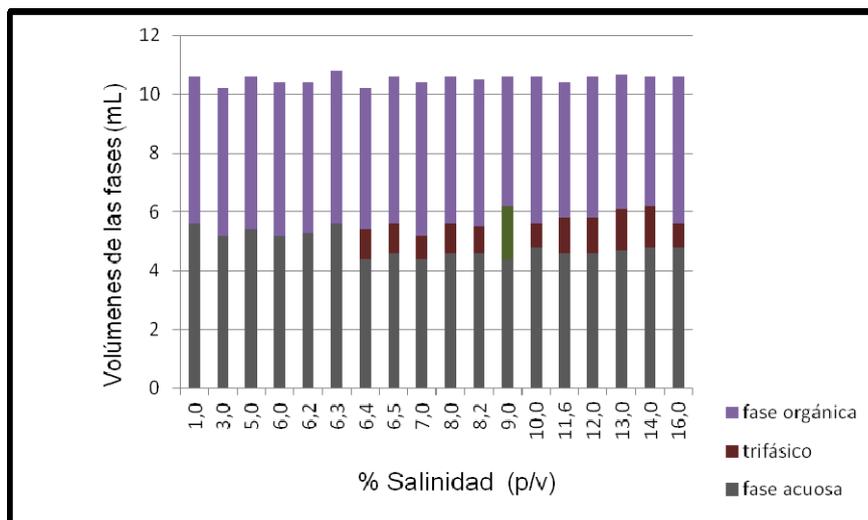


Figura 4.26. Barrido de formulación para el 1-butanol al 6% v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1,0% p/v hasta 6,3% p/v de sal; a partir de 6,4% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 9,0% p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,4 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,8 mL).

4.2.6 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 8,0 %v/v 1-butanol.

En la tabla 4.13 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-butanol al 6,0 %v/v.



Tabla 4.13
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/1-butanol al 8,0%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$) %p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	5,4	0,0	5,2
3,00	5,6	0,0	5,2
4,00	5,6	0,0	5,2
4,40	5,4	0,0	5,2
4,60	5,4	0,0	5,2
4,80	4,4	1,0	5,2
5,00	4,4	1,2	5,2
6,00	4,6	1,0	5,0
7,00	4,9	1,0	5,2
7,20	4,6	0,9	5,0
7,40	4,8	0,8	5,2
7,60	4,6	0,8	5,0
7,80	4,8	1,0	5,0
8,00	4,6	1,8	4,6
9,00	4,8	0,8	5,0
10,00	5,0	0,8	5,0
11,00	4,8	0,8	5,0
12,00	4,8	0,8	5,2
13,00	4,6	0,8	5,2
15,00	4,6	0,0	6,0



La figura 4.27 muestra el barrido de salinidad para el 1-butanol al 8% v/v, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1% hasta 15% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 8,0 % v/v 1-butanol.



Figura 4.27. Barrido de formulación obtenido experimentalmente del 1-butanol al 8% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo).

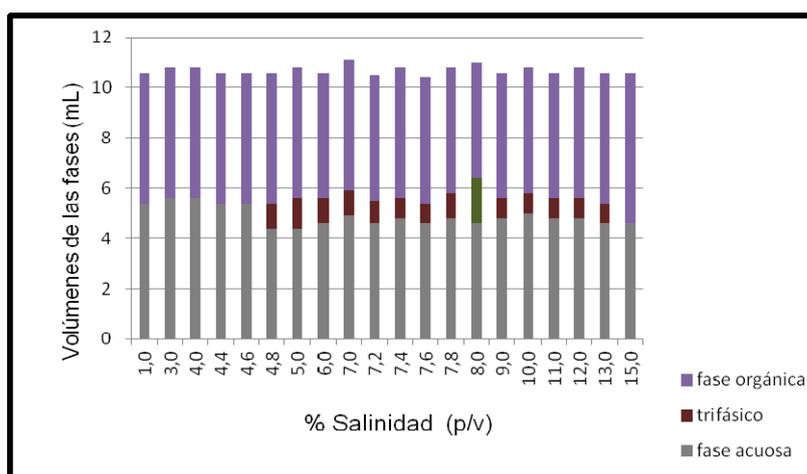


Figura 4.28. Barrido de formulación obtenido para el 1-butanol al 8% v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado, Winsor III (óptimo) de color verde.



Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 1,00% p/v hasta 4,6% p/v de sal; a partir de 4,8%p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 8,0%p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,6 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,8 mL).

4.2.7 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 2,0 %v/v 2-butanol

En la tabla 4.14 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 2-butanol al 2,0 %v/v.

Tabla 4.14
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2-butanol al 2,0%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)%p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	4,8	0,0	5,2
3,00	5,2	0,0	5,0
5,00	5,4	0,0	4,6
7,00	5,2	0,0	5,0
8,00	5,2	0,0	5,0

La figura 4.29 muestra el barrido de salinidad para el 2-butanol al 2% v/v, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso directo del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1,0% hasta 8,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 2 % v/v 2-butanol.

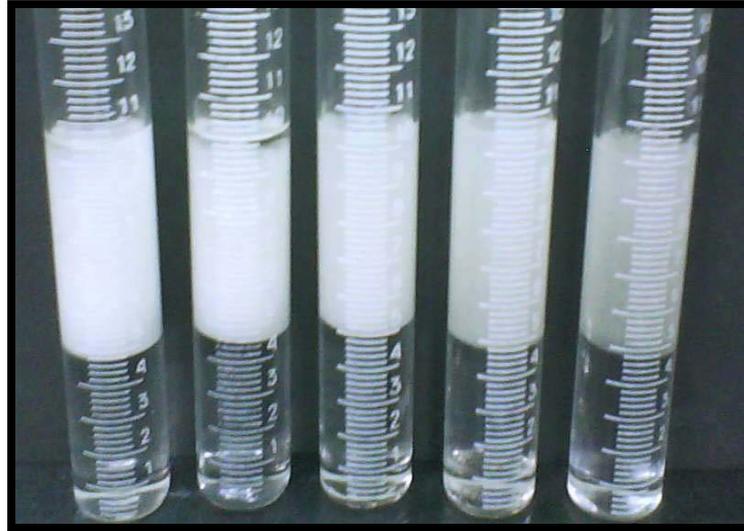


Figura 4.29. Barrido de formulación obtenido del 2-butanol al 2%v/v, donde se aprecia sólo la formación de sistemas bifásicos en un rango de salinidad de [1,0-8,0] %p/v de NaCl.

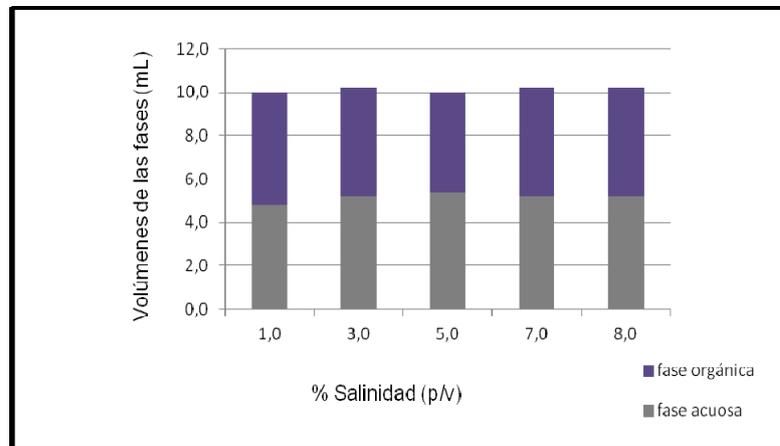


Figura 4.30. Barrido de formulación obtenido para el 2-butanol al 2%v/v, donde se indica la ubicación de sólo sistemas bifásicos (Winsor II).

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1,0% p/v hasta 8,0% p/v de sal; no pudiéndose formar sistemas trifásicos y por ende tampoco la salinidad óptima.



4.2.8 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 4,0 %v/v 2-butanol

En la tabla 4.15 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 2-butanol al 4,0 %v/v.

Tabla 4.15
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2-butanol al 4,0%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
9,00	5,0	0,0	5,0
10,00	4,8	0,0	5,2
12,00	5,4	0,0	4,6
14,00	5,2	0,0	5,2
16,00	5,2	0,0	4,8

La figura 4.31 muestra un comportamiento parecido al barrido anterior para el 2-butanol al 2% v/v, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso directo del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 9,0% hasta 16,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 2 % v/v 2-butanol.

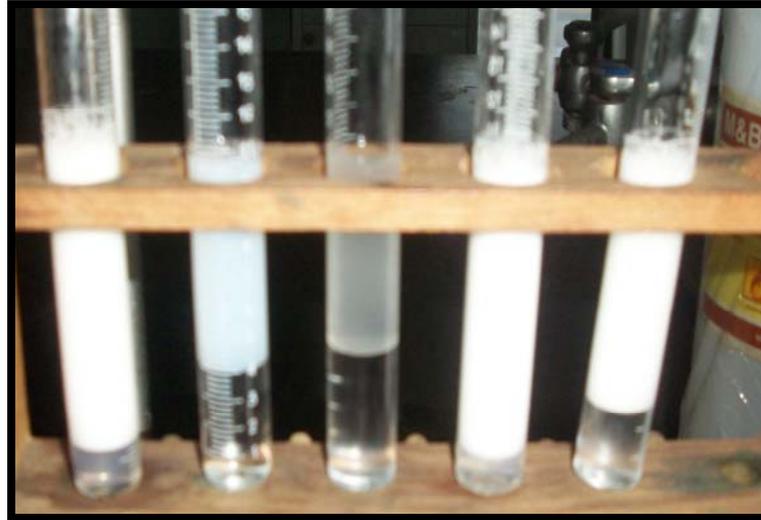


Figura 4.31. Barrido de formulación obtenido del 2-butanol al 4%v/v, donde se aprecia sólo la formación de sistemas bifásicos en un rango de salinidad de [9,0-16,0] %p/v de NaCl.

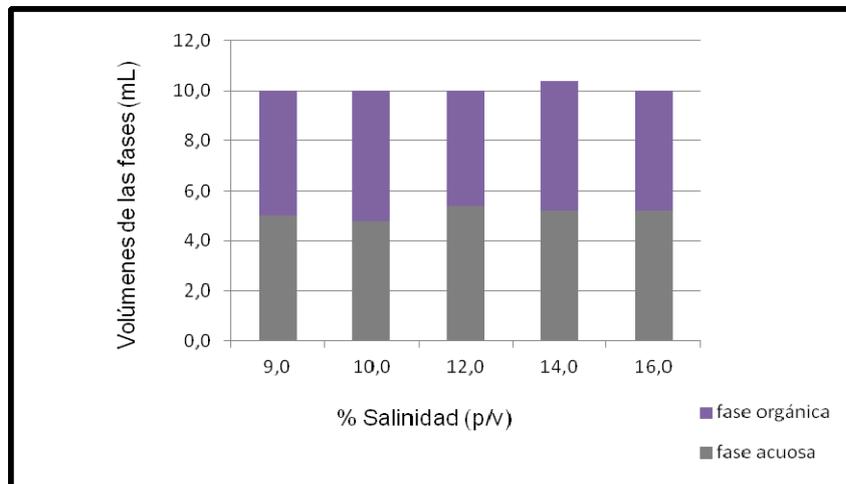


Figura 4.32. Barrido de formulación obtenido para el 2-butanol al 4%v/v, donde se indica la ubicación de sólo sistemas bifásicos (Winsor II).

Para este barrido, sucede igual que el sistema anterior donde sólo se pudo observar en los tubos un sistema bifásico desde 9,0% p/v hasta 16,0% p/v de sal; no



pudiéndose formar sistemas trifásicos y por ende tampoco encontrándose la salinidad óptima.

4.2.9 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 6,0 %v/v 2-butanol

En la tabla 4.16 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 2-butanol al 6,0 %v/v.

Tabla 4.16
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2-butanol al 6,0%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
8,00	5,6	0,0	5,0
10,00	5,4	0,0	5,0
12,00	5,4	0,0	5,2
14,00	4,6	0,8	5,2
14,50	4,4	1,2	5,0
15,00	4,0	1,2	5,2
16,00	4,6	0,8	5,0

La figura 4.33 muestra el barrido de salinidad para el 2-butanol al 6% v/v, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 8,0% hasta 16,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 8,0 % v/v 2-butanol.



Figura 4.33. Barrido de formulación obtenido del 2-butanol al 6% v/v, donde se visualiza la formación de bifásicos y trifásicos en el sistema.

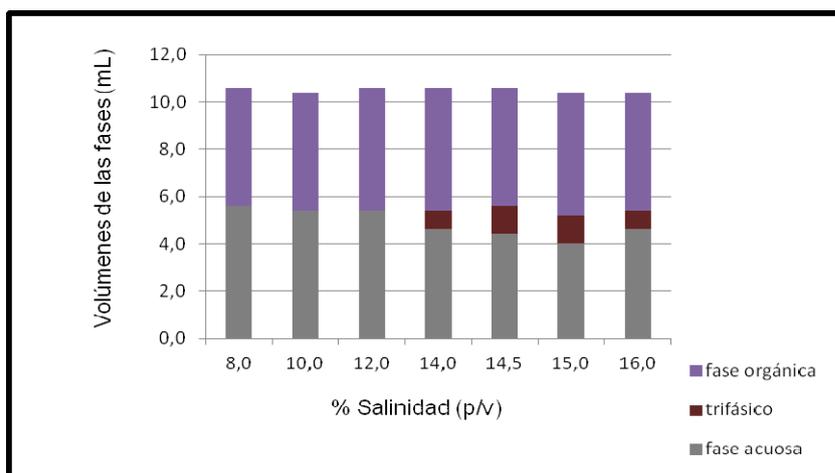


Figura 4.34. Barrido de formulación obtenido para el 2-butanol al 6% v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 8,0% p/v hasta 12,0% p/v de sal; a partir de 14,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. No hay formación de volúmenes iguales tanto para la fase acuosa como la fase oleosa (microemulsión).



4.2.10 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 8,0 %v/v 2-butanol

En la tabla 4.17 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 2-butanol al 8,0 %v/v.

Tabla 4.17
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/Kerosene/2-butanol al 8,0%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
8,00	5,6	0,0	5,2
10,00	5,6	0,0	5,4
11,00	5,4	0,0	5,2
12,00	4,6	1,0	5,0
13,00	4,8	0,8	5,0
13,50	4,6	0,8	5,2
14,00	4,8	0,8	5,0
15,00	4,6	1,0	5,4
16,00	4,2	1,0	5,0
20,00	4,6	1,0	5,0

La figura 4.35 muestra el barrido de salinidad para el 2-butanol al 8% v/v, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 8,0% hasta 16,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 8,0 % v/v 2-butanol.



Figura 4.35. Barrido de formulación obtenido del 2-butanol al 8% v/v, donde se visualiza la formación de bifásicos y trifásicos en el sistema.

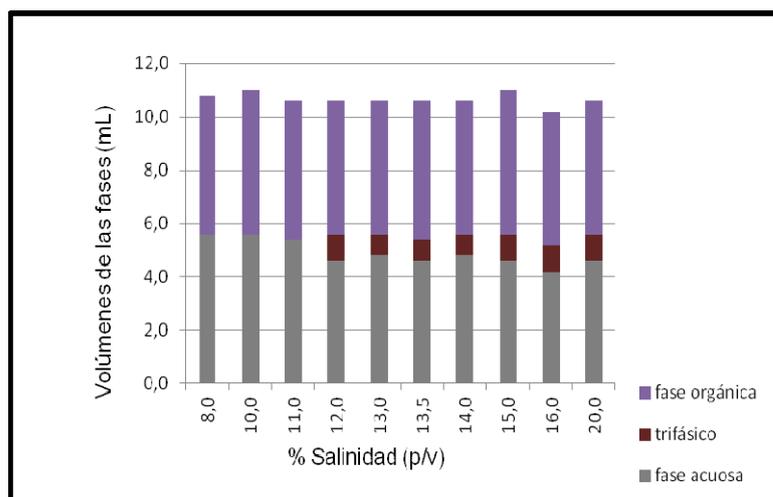


Figura 4.36. Barrido de formulación obtenido para el 2-butanol al 8% v/v, donde se indica la ubicación del surfactante en el sistema formulado.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 8,0% p/v hasta 11,0% p/v de sal; a partir de 12,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. No hay formación de volúmenes iguales tanto para la fase acuosa como la fase oleosa (microemulsión).



Por último se muestra en la figura 4.37 los resultados obtenidos de la influencia de los alcoholes estudiados y las variaciones de sus concentraciones en los sistemas SOW y así conocer el comportamiento de la salinidad óptima.

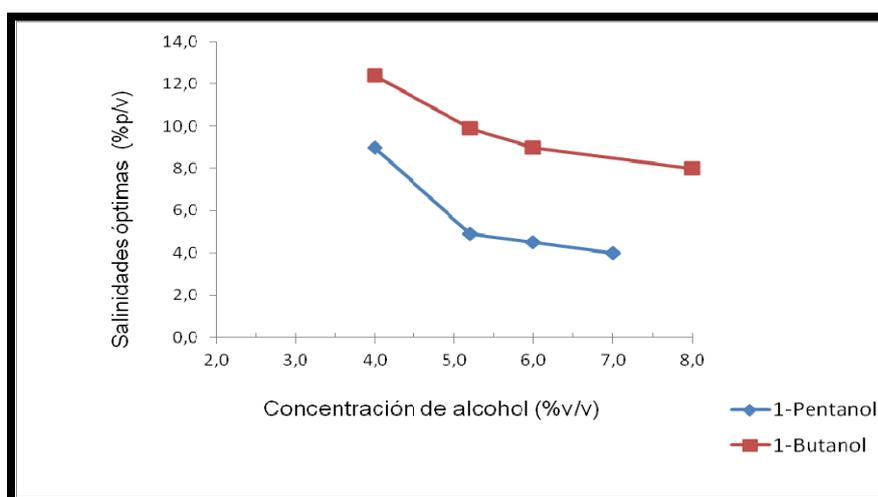


Figura 4.37. Salinidades óptimas obtenidas para el 1-pentanol y 1-butanol a diferentes concentraciones.

En la figura 4.37, nótese que para el 1-butanol a medida que se aumenta la concentración de éste se necesita menor cantidad de sal para desplazarse de la fase oleosa a la fase acuosa, mientras que para el 1-pentanol la disminución de la cantidad de sal que se requiere para obtener la formulación óptima es mucho menor, éste comportamiento se debe a la naturaleza de los alcoholes, puesto que el 1-pentanol es de tendencia lipofílica, lo que implica que es afín a la fase oleosa, por lo que se desplaza con mayor facilidad el surfactante con sólo añadir al sistema pequeñas cantidades de NaCl y por consiguiente se obtiene la salinidad óptima más rápidamente, mientras que el 1-butanol es un alcohol que presenta afinidad casi equitativa tanto por la fase acuosa como por la oleosa, por tanto al anfifilo le cuesta desplazarse y por ello necesita más cantidad de NaCl.



Lo expuesto anteriormente, presenta tanto para el 1-pentanol como para el 1-butanol una tendencia a seguir disminuyendo a mayores concentraciones de alcohol, puesto que a pesar que los alcoholes poseen un grupo hidróxilo que es hidrófilo (con afinidad por el agua) cuya unidad estructural le confiere sus propiedades físicas características capaz de establecer puentes de hidrógeno con las moléculas del agua, presenta además un alcano cuya unidad estructural (alquilo) es la que modifica el sistema SOW dependiendo de su tamaño y forma, así como la tendencia observada en la figura 4.37.

Desde el punto de vista fisicoquímico, el 1-pentanol se absorbe más rápido debido al balance entre el grupo OH y la cola hidrocarbonada; esto acelera la baja de tensión evidenciándose en las salinidades óptimas obtenidas, por esta razón el 1-butanol es menos efectivo a pesar que tiene el menor número de carbonos en su cadena hidrocarbonada.

4.3 Determinación del número de alcano equivalente (EACN) del crudo de Yaracal, empleando el concepto de correlación para la formulación óptima de Desviación Hidrofilica-Lipofilica (HLD), con el propósito de caracterizar el aceite utilizado.

Para determinar el número de alcano equivalente, en primer lugar se determinó σ , luego se realizó un barrido unidimensional con un sistema surfactante/agua/NaCl/kerosene/1-pentanol/crudo a diversas concentraciones. Se trabajó con el heptano como la fase oleosa y sistema de referencia, ya que se conoce su valor de ACN, como sal, cloruro de sodio y como alcohol 1-pentanol. Es importante resaltar que existen valores tabulados como referencias para el surfactante en estudio. Sin embargo, es necesario realizar un barrido de referencia, ya que las propiedades físicas y químicas reportadas para éste, no son iguales a las del surfactante empleado en la investigación, a su vez se garantiza un valor acorde y de esta forma poder determinar los valores de EACN del aceite utilizado en este estudio.



A continuación en la tabla 4.18 se muestra los resultados obtenidos del sistema de referencia.

Tabla 4.18

Salinidades y volúmenes de las fases obtenidos del sistema de referencia

Salinidad ($C \pm 0,05$)%p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
5,00	6,4	0,0	3,8
5,20	3,0	3,8	3,0
5,30	2,6	4,4	3,4
5,40	2,0	4,6	3,4
5,60	2,8	4,2	3,2
5,80	3,6	4,2	2,4
6,00	3,8	0,0	6,4
7,00	4,0	0,0	6,4
8,00	4,4	0,0	5,8

El barrido de referencia se efectúa con la finalidad de estudiar, observar, analizar y caracterizar las diversas contribuciones que tienden a variar un determinado sistema a formular, dentro de estas variables se tiene: la contribución del surfactante, de la sal, del aceite, de la temperatura y del alcohol. En este barrido se emplearon, dos aceites cuyos valores de ACN eran conocidos por estar ya reportados en la bibliografía, uno alcano lineal (heptano) y el kerosene localizado en el Laboratorio de PHD.

En este orden de ideas, cabe mencionar que las diluciones sucesivas fueron realizadas, con el propósito de conocer con mayor detalle la composición del kerosene utilizado para la formulación de los sistemas SOW a fin de estimar el comportamiento del aceite al combinarse con el resto de los componentes que conforman dichos sistemas. Los valores del porcentaje de salinidad óptima junto con los de EACN para cada barrido de referencia efectuado se anexa en la tabla 4.19.



Tabla 4.19
Valores de porcentaje de salinidad óptima y EACN para cada barrido
de referencia analizado

Sistema analizado	Salinidad óptima (% p/v)	EACN
SDS/agua/NaCl/kerosene/1-pentanol/crudo al 0,5% v/v	4,5	5,5542
SDS/agua/NaCl/kerosene/1-pentanol/ crudo al 1% v/v	5,0	6,9608
SDS/agua/NaCl/kerosene/1-pentanol/ crudo al 3% v/v	5,2	7,0000
SDS/agua/NaCl/kerosene/1-pentanol/ crudo al 5% v/v	5,5	7,5608

En la tabla 4.19, se muestran los resultados obtenidos para cada barrido de referencia analizado. Con respecto al valor de EACN determinado para los sistemas, resultó ser que a medida que aumenta la salinidad óptima también aumenta el EACN. Lo anteriormente expuesto, muestra que a medida que aumenta el EACN del aceite utilizado, se incrementan las interacciones entre las moléculas del aceite, disminuyendo las interacciones de las mismas con el surfactante de acuerdo al modelo de Winsor.

Por otro lado, si se continúa agregando más sal más rápido aún disminuyen las interacciones con la fase acuosa, arrastrándose hacia el aceite el surfactante trayendo luego como consecuencia la no formación de sistemas trifásicos convenientes para obtener las salinidades óptimas. Para los valores de EACN obtenidos se asume que hay presencia de alifáticos en el kerosene utilizado en la experiencia práctica.

Seguidamente, la validación del método del HLD a las condiciones experimentales realizadas fue del todo satisfactorio, ya que se encontraron las distintas formulaciones óptimas con la menor cantidad de sal posible, la solubilización del tensoactivo en las microemulsiones fueron eficaces dado el tamaño de volúmenes de dichas zonas.



4.3.1 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2 %v/v 1-pentanol con crudo al 0,5% v/v

En la tabla 4.20 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 5,2 %v/v con crudo al 0,5% v/v.

Tabla 4.20
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/1-pentanol al 5,2%v/v/ crudo al 0,5%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	5,4	0,0	5,0
3,00	5,6	0,0	4,8
4,00	4,0	1,8	4,6
4,50	4,4	1,6	4,4
5,00	4,4	1,6	4,6
6,00	4,6	1,6	4,0
7,00	4,6	0,6	5,2
8,00	4,8	0,6	5,6

La figura 4.38 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1,0% hasta 8,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 5,2 % v/v 1-pentanol.



Figura 4.38. Barrido de formulación unidimensional del 1-pentanol al 5,2%v/v con crudo al 0,5% v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante.

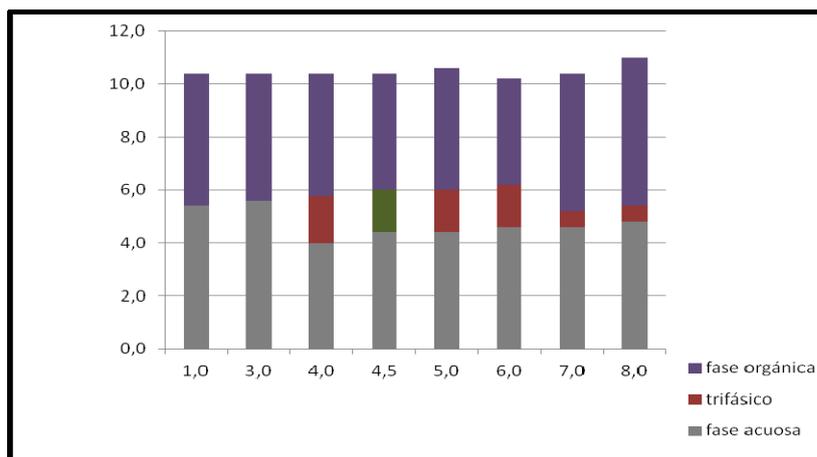


Figura 4.39. Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1% p/v, 0,5% de crudo v/v y 5,2% v/v de 1-pentanol.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1,0% p/v hasta 3,0% p/v de sal; a partir de 4,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 4,5% p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,4 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,6 mL).



4.3.2 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2 %v/v 1-pentanol con crudo al 1% v/v

En la tabla 4.21 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 5,2 %v/v con crudo al 1% v/v.

Tabla 4.21

Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/1-pentanol al 5,2%v/v/crudo al 1%v/v

Salinidad (C± 0,05)% p/v	Volumen acuoso (mL)	Volumen trifásico (mL)	Volumen aceite (mL)
1,00	5,4	0,0	5,0
3,00	5,6	0,0	4,8
4,00	3,6	1,8	4,6
5,00	4,4	1,6	4,4
7,00	4,6	1,8	4,0
8,00	4,6	0,0	5,8

La figura 4.40 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1,0% hasta 8,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 5,2 % v/v 1-pentanol.

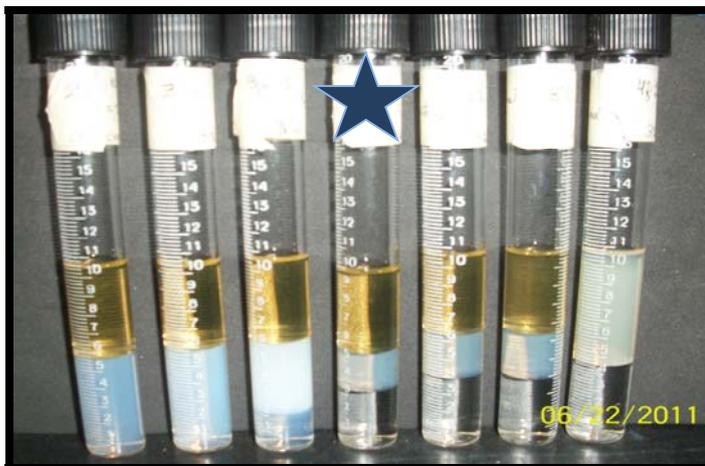


Figura 4.40. Barrido de formulación unidimensional del 1-pentanol al 5,2%v/v con crudo al 1%v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante.

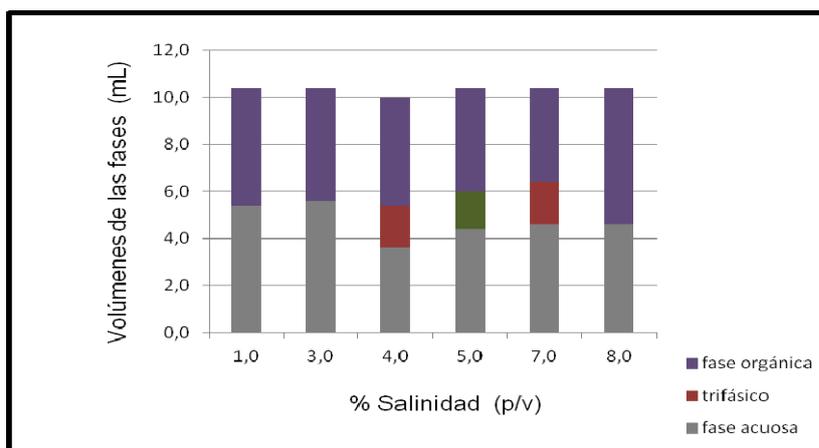


Figura 4.41. Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1% p/v, 1%v/v de crudo y 5,2% v/v de 1-pentanol.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1,0% p/v hasta 3,0% p/v de sal; a partir de 4,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 5,0% p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,4 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,6 mL).



4.3.3 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2 %v/v 1-pentanol con crudo al 3% v/v

En la tabla 4.22 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 5,2 %v/v con crudo al 3% v/v.

Tabla 4.22

Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/1-pentanol al 5,2%v/v/crudo al 3%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	5,4	0,0	5,0
3,00	5,8	0,0	4,6
4,00	3,6	2,0	4,6
5,00	4,0	2,0	4,4
5,20	4,2	1,8	4,2
6,00	4,4	1,8	4,2
7,00	4,6	0,0	5,8
8,00	4,6	0,0	5,8

La figura 4.42 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1,0% hasta 8,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 5,2 % v/v 1-pentanol.

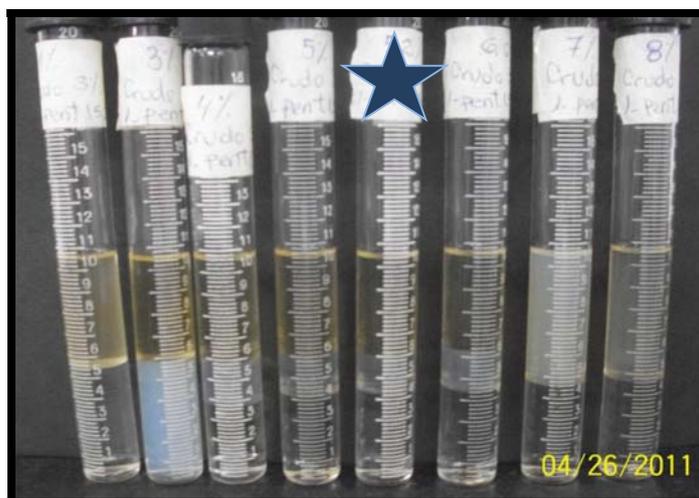


Figura 4.42. Barrido de formulación unidimensional del 1-pentanol al 5,2%v/v con crudo al 3%v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante.

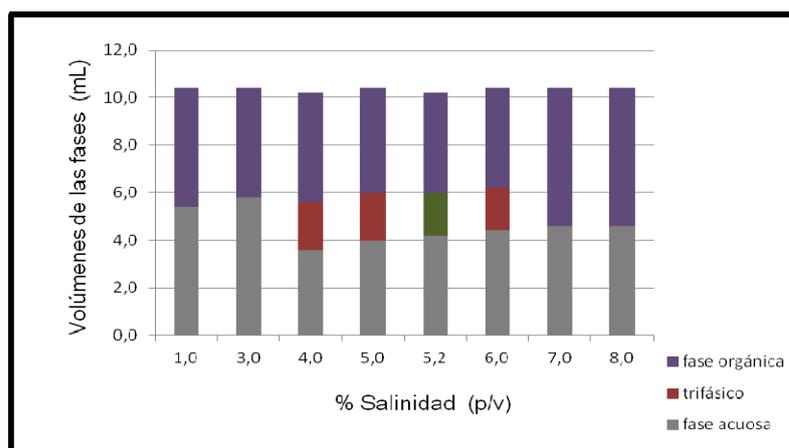


Figura 4.43. Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1% p/v, 3%v/v de crudo y 5,2% v/v de 1-pentanol.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1,0% p/v hasta 3,0% p/v de sal; a partir de 4,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 5,2% p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,2 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,8 mL).



4.3.4 Barrido de salinidad de los sistemas SOW con SDS 1% p/v y 5,2 %v/v 1-pentanol con crudo al 5% v/v

En la tabla 4.23 se muestran a continuación los resultados obtenidos del barrido de salinidad de los sistemas SOW para el 1-pentanol al 5,2 %v/v con crudo al 5% v/v.

Tabla 4.23
Salinidades y volúmenes obtenidos para el sistema
SDS/Agua/NaCl/1-pentanol al 5,2%v/v/crudo al 5%v/v

Salinidad ($C \pm 0,05$)% p/v	Volumen acuoso ($V \pm 0,2$) mL	Volumen trifásico ($V \pm 0,2$) mL	Volumen aceite ($V \pm 0,2$) mL
1,00	5,2	0,0	5,0
3,00	5,6	0,0	4,8
4,00	5,4	0,0	5,0
5,00	4,2	1,6	4,4
5,20	4,2	2,0	4,4
5,50	4,4	1,8	4,4
5,80	4,4	1,8	4,2
6,00	4,6	1,8	4,0
6,50	4,4	1,6	4,0
6,80	4,6	2,8	3,2
7,00	4,6	2,6	3,2
8,00	4,6	0,0	5,8

La figura 4.44 muestra el barrido de salinidad, en la misma se pueden observar, claramente en los tubos, el paso del surfactante desde el agua hasta el aceite, a medida que se aumenta la concentración de la sal, en un barrido realizado desde 1,0% hasta 8,0% p/v de sal, manteniendo constante el resto de los componentes. Es decir, 5,00 mL de aceite (kerosene) y 5,2 % v/v 1-pentanol.



Figura 4.44. Barrido de formulación unidimensional del 1-pentanol al 5,2%v/v con crudo al 5%v/v, donde se indica con el símbolo azul la ubicación del surfactante.

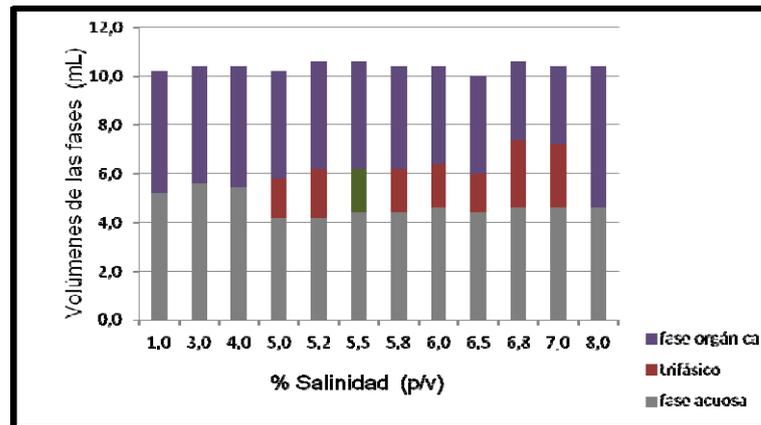


Figura 4.45. Barrido de salinidad para los sistemas SOW con SDS al 1% p/v, 5%v/v de crudo y 5,2% v/v de 1-pentanol.

Para este barrido, se pudo observar en los tubos un sistema bifásico que va desde 1,0% p/v hasta 4,0% p/v de sal; a partir de 5,0% p/v de sal aparece un sistema trifásico. Alcanzada una salinidad óptima de 5,5% p/v, se observan volúmenes iguales de fases acuosa y oleosa (4,4 mL de c/u en un volumen total de 10,0 mL) y una tercera fase intermedia correspondiente a la microemulsión (1,8 mL).



4.4 Evaluación del comportamiento de los sistemas surfactante-aceite-agua en las muestras de suelo contaminado, a fin de determinar el porcentaje de remoción del crudo.

La contaminación ambiental ocasionada por el petróleo y productos petroquímicos (mezclas complejas de hidrocarburos) se reconoce como uno de los más graves problemas de la actualidad. Una vez derramado este contaminante en el suelo, la mayoría de los compuestos alifáticos se pierden por volatilización, mientras que algunos hidrocarburos como los policíclicos persisten en la superficie, generando un gran impacto negativo a los ecosistemas y a la salud de los seres vivos.

Debido a las diferentes propiedades de los suelos algunos tienen mayor tendencia a absorber y retener cualquier tipo de contaminante. Es decir, suelos finos de tipo limoso y arcilloso son más absorbentes de contaminantes que los de diámetro grueso como las arenas y gravas.

En este orden de ideas, es importante mencionar, que el suelo contaminado (SC) por emanación espontánea de crudo liviano, correspondió a una muestra puntual tomada alrededor de uno, de los pozos marginales de la zona del Mene de San Lorenzo, en Yaracal Estado Falcón, zona en la cual ya existe referencia de estudios de las condiciones del área, que comprende parte de los doscientos (200) pozos marginales abandonados. En un estudio realizado por Barrios y colaboradores (2005), se evaluaron las condiciones del suelo contaminado y no contaminado, así como sus propiedades fisicoquímicas (Apéndice B).

La figura 4.46 (a y b), muestran la identificación y ubicación del punto muestreado para llevar a cabo la investigación. Mientras que, la figura 4.47 presenta las condiciones como se encuentra impactado el ambiente en dicha zona. El interés de esta investigación fue aplicar como alternativa preliminar de remediación los sistemas SOW formulados, a fin de evaluar su poder de solubilización y detergencia, en la remoción del



crudo presente en la muestra tratada. Esta investigación, se realizó a escala de laboratorio.



Figura 4.46 (a) Ubicación de la zona de muestreo, Yaracal- Edo. Falcón. (b) Identificación del pozo en el lugar del muestreo



Figura 4.47. Condición ambiental en que se encuentra el área afectada por derrame de crudo liviano, Yaracal-Falcón.

De acuerdo a los ensayos realizados en la sección 3.2.4.4, se determinó el contenido de materia orgánica presente en el suelo contaminado tomado en la zona de estudio, con la finalidad de determinar el contenido real de crudo presente en dicho suelo. La figura 4.48 muestra el suelo contaminado tratado con la solución limpiadora y el suelo limpio de referencia.



Figura 4.48. Comparación del color del suelo lavado con la mezcla de solventes y el suelo de referencia (limpio).

Como resultado del ensayo, se determinó que el SR contiene ($8,51 \pm 0,05$) % de materia orgánica vegetal (MOV), mientras que en el SC se obtuvo un valor de ($9,84 \pm 0,05$) % de materia orgánica de tipo hidrocarburo (tabla 4.24). Estos resultados fueron confirmados con el trabajo de Barrios y colaboradores, 2005. En éste, se estudió las características fisicoquímicas del suelo en la zona de Yaracal, a fin de evaluar un sistema de biorremediación.

En dicho estudio, se reportan como contenido de materia orgánica para el suelo virgen (no contaminado de la zona) un valor de ($7,41 \pm 0,02$) % y para el suelo contaminado se reportó ($10,54 \pm 0,02$) %. Estos resultados demuestran que los valores obtenidos por la metodología aplicada, están dentro de lo esperado para el suelo en estudio.



Tabla 4.24

Contenido inicial de materia orgánica, para el suelo de referencia y contaminado, por extracción con solvente

Suelo	Pérdida de peso por extracción ($m \pm 0,0001$) g	Contenido de materia orgánica ($C \pm 0,05$)%p/p	Contenido de materia orgánica total ($C \pm 0,05$) %p/p
Referencia	0,0859	8,51	8,51
Contaminado	0,1872	9,84	18,35

A continuación la tabla 4.25 se muestran los sistemas SOW aplicados en cada tubo.

Tabla 4.25

Peso del suelo contaminado en los diferentes tubos de ensayo calibrado de 5 mL

Número de tubo	Peso tubo vacío ($m \pm 0,0001$) g	Peso suelo contaminado ($m \pm 0,0001$) g
1	4,6171	0,2565
2	4,8980	0,2541
3	4,7197	0,2540
4	3,5875	0,2589
5	4,7232	0,2542
6	5,3509	0,2588
7	5,8283	0,2565



Teniendo el valor inicial de crudo del SC, determinado como se explicó en el punto anterior, se procedió a tratar el SC con los diferentes sistemas SOW preparados. Los resultados obtenidos de las muestras de suelos tratadas con la microemulsión, luego de la agitación mecánica y dejadas en reposo en un papel de filtro se muestran en la tabla 4.26.

En otro orden de ideas, el presente trabajo de grado está enmarcado en una línea de investigación donde hay un antecedente, el cual estableció el tiempo de tratamiento de los sistemas SOW con crudo para posteriormente agitarlos, donde al poner en contacto por espacios de 2, 4, 8, 24 y 48 horas de agitación dos soluciones limpiadoras (Winsor I y mezcla de cloroformo-metanol) obtuvieron la máxima remoción en un tiempo de 4 horas, motivo por el cual los sistemas formulados en este trabajo fueron agitados por ese espacio de tiempo.

Tabla 4.26

Resultados obtenidos del suelo limpio con los diferentes sistemas SOW formulados

Número de tubo	Peso papel filtro vacío (m ± 0,0001)g	Suelo limpio + Peso papel filtro (m ± 0,0001)g	Suelo limpio (m ± 0,0001)g
1	0,5518	0,7852	0,2334
2	0,5772	0,8189	0,2417
3	0,4598	0,6987	0,2389
4	0,4514	0,7094	0,258
5	0,4606	0,7133	0,2527
6	0,4617	0,7140	0,2523
7	0,4447	0,6931	0,2484

Haciendo uso de la ecuación A.3 y los datos de la tabla 4.26, se procedió al cálculo del porcentaje removido por cada sistema formulado. En la tabla 4.27 se muestran los porcentajes de remoción obtenidos para cada sistema formulado con SDS al 1% p/v.



Tabla 4.27

Resultados obtenidos en el tratamiento del suelo contaminado con los distintos sistemas SOW formulados con SDS al 1% p/v con 1-pentanol y 1-butanol a diferentes concentraciones

Número de tubo	Sistema analizado	Pérdida de peso por tratamiento ($m \pm 0,0001$)g	Contenido removido ($Re \pm 0,05$)%p/p	Desempeño de los sistemas aplicados ($D \pm 0,05$)%
1	SDS/agua/kerosene/ 5,2%v/v 1-Pentanol	0,0231	9,00	90,06
2	SDS/agua/kerosene/ 6%v/v 1-Pentanol	0,0124	4,88	48,79
3	SDS/agua/kerosene/ 7%v/v 1-Pentanol	0,0151	5,94	59,45
4	SDS/agua/kerosene/ 4%v/v 1-Butanol	0,0009	0,35	3,48
5	SDS/agua/kerosene/ 5,2%v/v 1-Butanol	0,0015	0,59	5,90
6	SDS/agua/kerosene/ 6%v/v 1-Butanol	0,0065	2,51	25,12
7	SDS/agua/kerosene/ 8%v/v 1-Butanol	0,0081	3,16	31,58

En esta tabla 4.27 se puede observar, que la formulación que presenta mayor poder en la capacidad de remoción del crudo presente en el suelo tratado, fue la microemulsión del sistema que contiene 5,2%v/v de 1-pentanol con una salinidad de 4,90%p/v, donde se logró que el surfactante de naturaleza hidrofóbica pasara a formar una solución micelar en fase intermedia, en este caso, se logró observar (figura 4.49) una alta solubilización del crudo del suelo.



Figura 4.49. Solubilización del sistema SDS/agua/NaCl/kerosene/ 5,2% v/v de 1-pentanol.

Cabe destacar, que la solubilización de los sistemas SOW está relacionada con el inverso de la tensión interfacial, es decir, que a menor tensión interfacial se aumenta la solubilización, y viceversa. Es por ello que en un barrido de salinidad, se puede notar que en la formulación óptima se encuentran los valores más bajos de tensión y se logra obtener una mayor solubilización (Acosta, 2009).

Los resultados obtenidos mediante técnicas visuales y gravimétricas, fueron corroborados por análisis de espectroscopía de absorción infrarrojo, los cuales se realizaron a las muestras de suelo contaminado y suelo tratado con la microemulsión óptima. Por ser ésta, la fórmula con mejor desempeño.

En la figura 4.50, se muestra el espectro de absorción de infrarrojo del suelo contaminado con crudo.

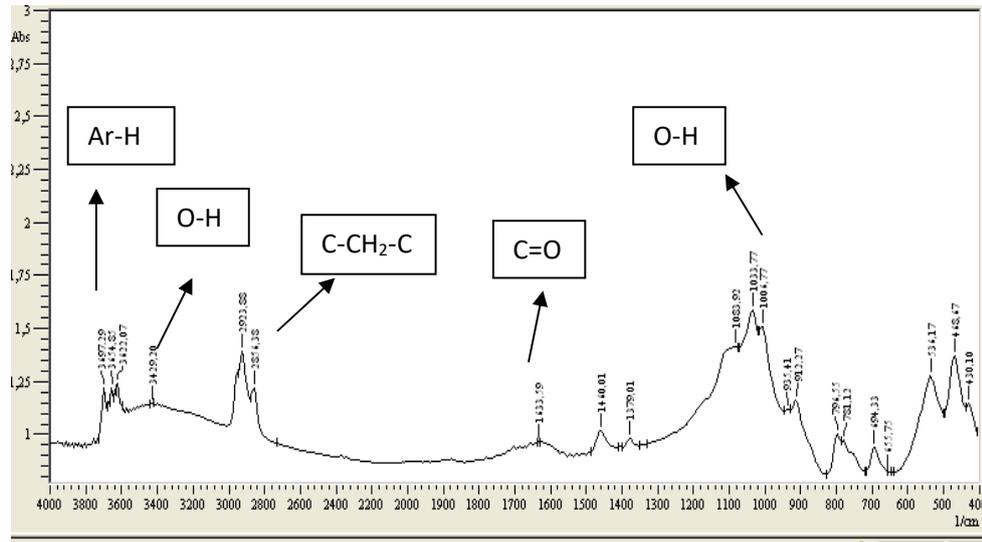


Figura 4.50. Espectro de absorción de infrarrojo del suelo contaminado con crudo liviano de Yaracal. Fuente: (Propia, 2012)

En las figuras siguientes, se puede observar el espectro de absorción infrarrojo del extracto obtenido después del tratamiento del suelo contaminado, con la formulación de mayor desempeño para el SDS (sistema óptimo).

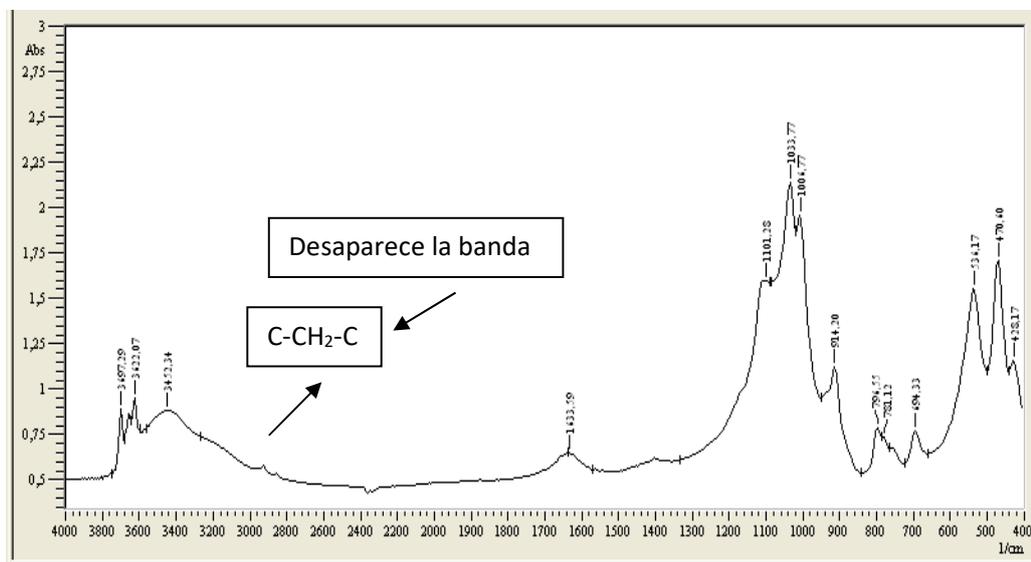


Figura 4.51. Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-pentanol al 5,2%v/v. Fuente: (Propia, 2012)

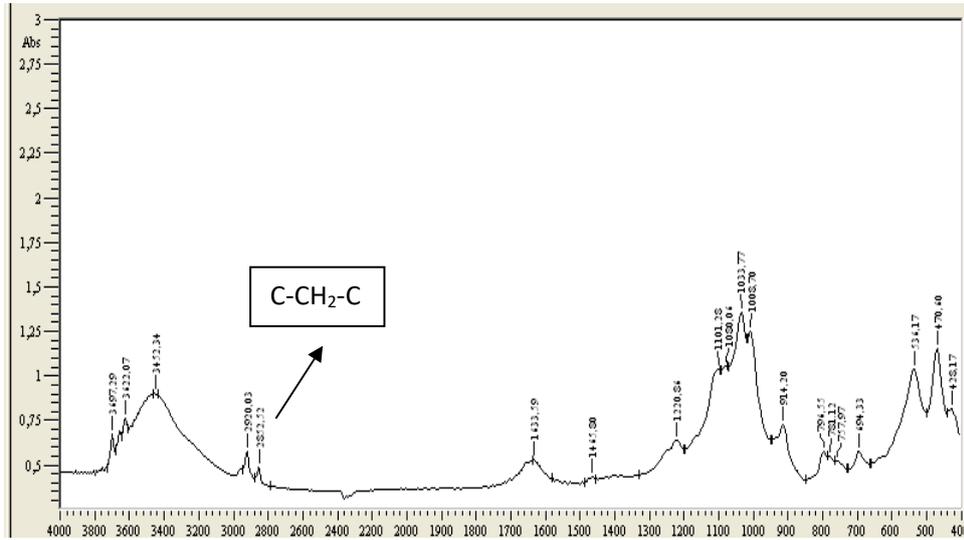


Figura 4.52. Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-pentanol al 6%v/v. Fuente: (Propia, 2012)

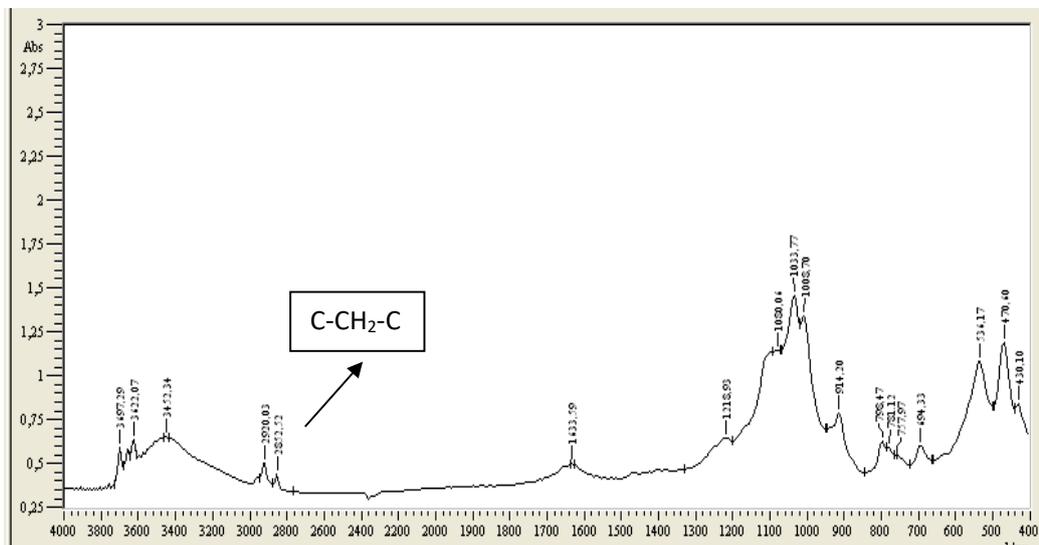


Figura 4.53. Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-pentanol al 7%v/v. Fuente: (Propia, 2012)

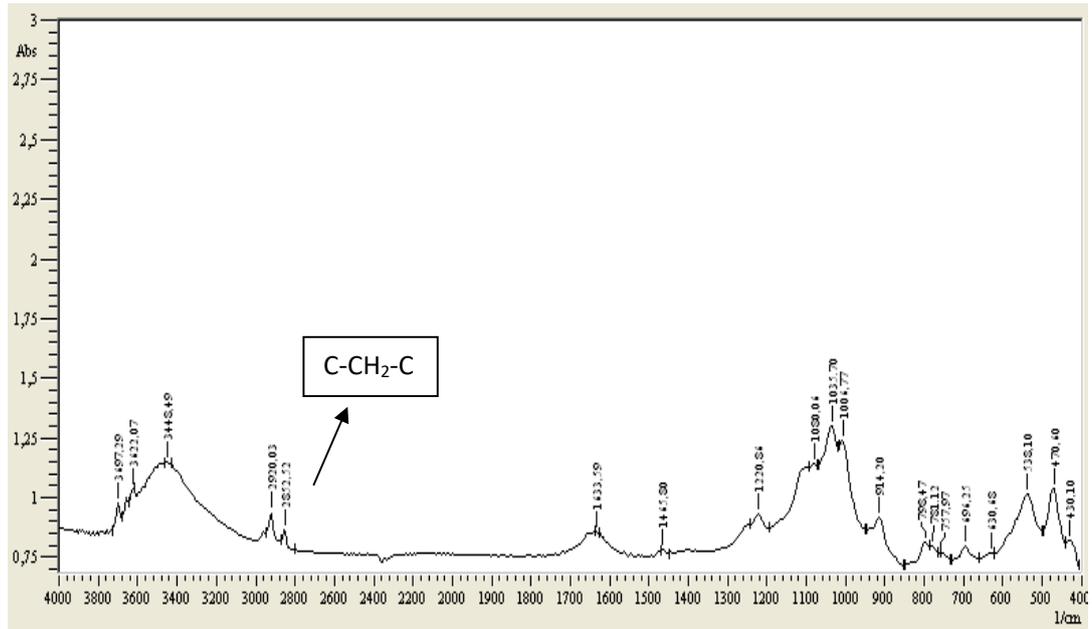


Figura 4.54. Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 4%v/v. Fuente: (Propia, 2012)

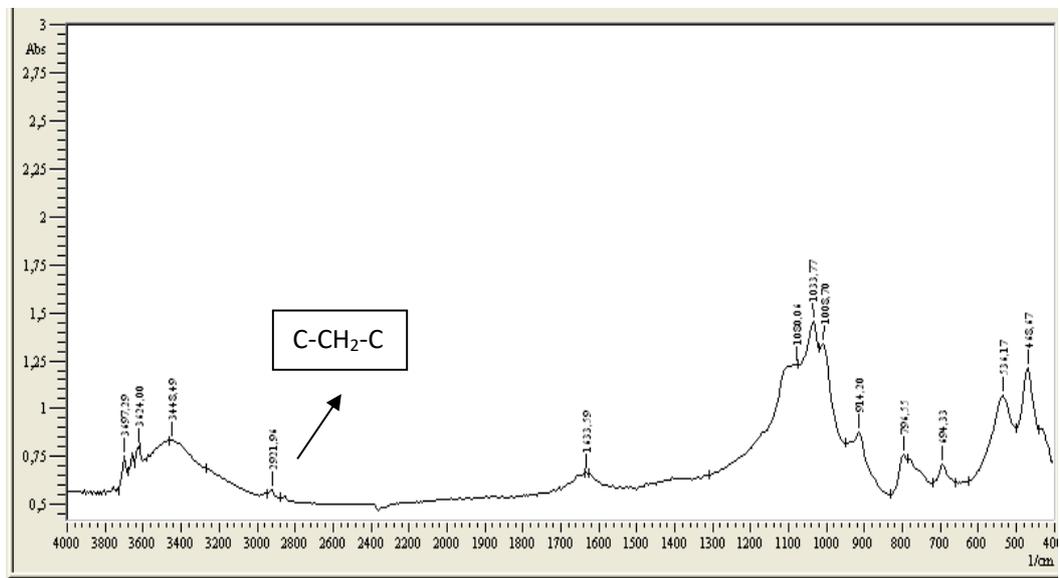


Figura 4.55. Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 5,2%v/v. Fuente: (Propia, 2012)

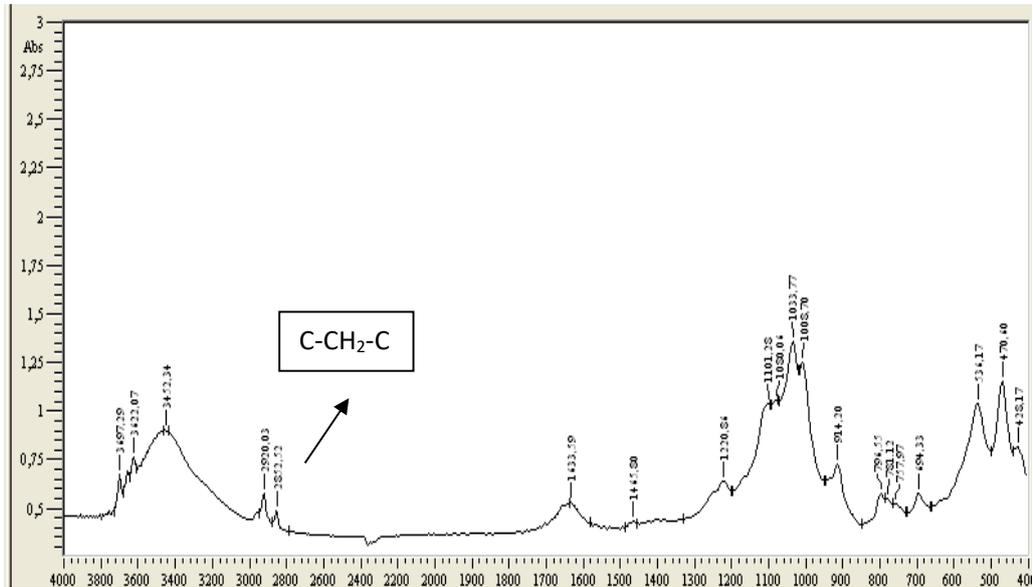


Figura 4.56. Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 6%v/v. Fuente: (Propia, 2012)

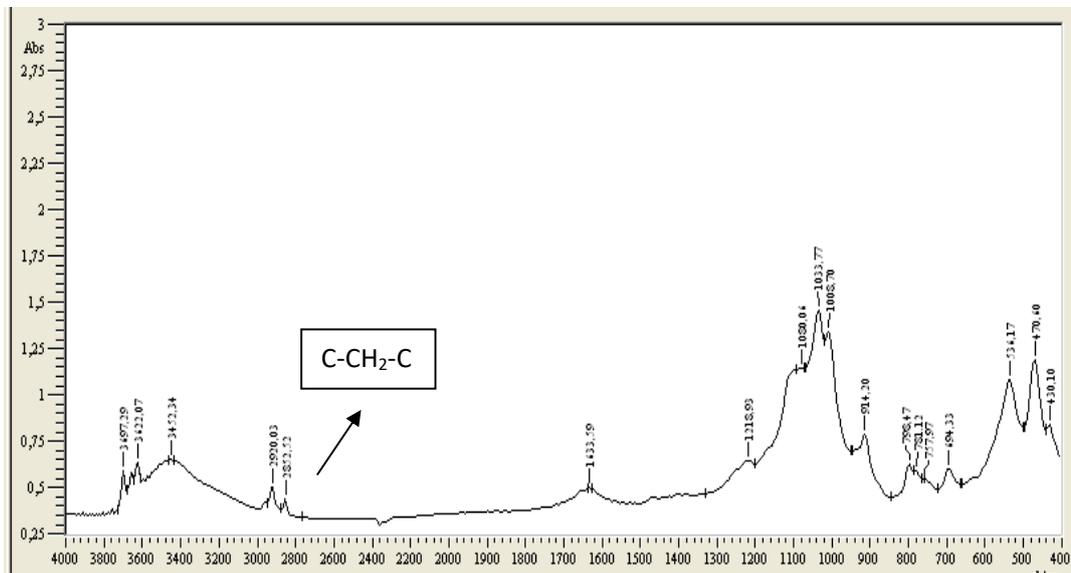


Figura 4.57. Espectro de absorción de infrarrojo realizada al extracto del tratamiento del suelo con microemulsión óptima para el 1-butanol al 8%v/v. Fuente: (Propia, 2012)



En contraste con el espectro del crudo liviano de Yaracal, donde se evidencia el poder detergente de la microemulsión, se puede observar la ausencia de las bandas que caracterizan la presencia del crudo en el suelo remediado. Por otro lado, en las bandas se indican los grupos funcionales correspondientes para algunas señales. Cabe mencionar, que este crudo ha sido ampliamente caracterizado por los grupos de investigación del laboratorio de petróleo, hidrocarburos y sus derivados (PHD) de la FACYT, para algunas publicaciones, determinando la composición del mismo (Barrios y col., 2009).

Para el crudo de Yaracal, se reportó una gravedad de 25° API, y un contenido de 37 % p/p de saturados, 48 % p/p de aromáticos y 13,4 % p/p de resinas. Según las características de este crudo y tomando en cuenta lo reportado por Cayias y colaboradores en 1976, y más recientemente por Acosta y colaboradores en 2009, se puede estimar que el EACN del crudo liviano de Yaracal es aproximadamente de 8.

4.5 Planteamiento de la(s) alternativa(s) de tratamiento a los suelos contaminados con el fin de obtener diferentes opciones para el mejoramiento de éstos.

El desarrollo en las técnicas de restauración ambiental ha sido un logro para la calidad de vida en nuestra sociedad que, de ejecutarse debidamente, los resultados son de mucho beneficio. Precisamente, es el desarrollo en las técnicas de restauración de sitios contaminados lo que ha propiciado que dependiendo del diseño de ejecución de estos métodos; ya sean procesos físicos, químicos, biológicos o interrelacionados, cuenten con características únicas.

Ya sea que transforme de alguna manera los tóxicos dispersos en el ambiente en sustancias más nobles para la salud, destruyéndolos de forma definitiva o simplemente disminuyendo su mecanismo de acción contaminante, la concentración a la cual es liberada a la atmósfera, depositada en cuerpos de agua o en la misma corteza terrestre, o modificando su composición química haciéndola una sustancia menos nociva para el medio ambiente.



Así también se deberá cuidar que los riesgos que pueda tener para la salud sean mínimos mientras el proceso de restauración se lleve a cabo. Una vez terminado el proceso de restauración, las concentraciones y los efectos del contaminante sobre el ambiente y la salud deberán ser iguales o menores a los planeados previamente en cada uno de los procesos de restauración ambiental.

Para poder aplicar alguna técnica o tecnología de restauración de sitios contaminados, es de suma importancia contar con toda la información existente del sitio con el propósito de llevar a cabo una buena caracterización tanto del suelo como del o los contaminantes en cuestión; para que la técnica a utilizar pueda ser elegida de acuerdo a un análisis de costos, si se cuenta o no con materiales y equipos necesarios para su correcta ejecución, entre otros.

Es importante señalar que al identificar el sitio contaminado a tratar, debe asegurarse de ser restaurado en el mismo lugar donde los tóxicos fueron encontrados, es decir, deberá procederse a realizar un tratamiento de tipo *in situ*, para no propagar o dispersar los contaminantes de un sitio en particular hacia otros medios debido a las diversas maniobras de traslado de material contaminado. La finalidad de estos consejos es lograr conseguir una disminución o eliminación total del o los contaminantes en cuestión en tiempos relativamente cortos, además de generar un costo aceptable para la realización de estas técnicas.

Por otro lado, se tiene que en las secciones 3.2.5.1 y 3.2.5.2 se revisaron e identificaron las técnicas necesarias para la remoción de crudo que mejor se adaptaban a los requerimientos de la presente investigación. A continuación se plantean dichas alternativas:

- **Alternativa A:** remoción del crudo en las muestras de suelo estudiadas a través de emulsiones.
- **Alternativa B:** remoción del crudo en las muestras de suelo estudiadas a través de soluciones micelares.



Alternativa C: remoción del crudo en las muestras de suelo estudiadas a través de microemulsiones.

En primer lugar se tiene que las emulsiones son sistemas que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersa en la otra, y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante. La presencia del surfactante es lo que permite controlar los diferentes fenómenos involucrados en la etapa de drenaje/floculación, cuya escala de tiempo puede variar de una fracción de segundo a varios años y hasta más en sistemas perfectamente metaestables.

Así mismo, se tiene que una emulsión es termodinámicamente inestable ya que, tarde o temprano se separará en dos fases. La noción de estabilidad es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un período de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a algunos años.

En la mayoría de las emulsiones una de las fases es acuosa y la otra un aceite polar. Las emulsiones con el aceite como fase dispersa se conocen como emulsiones de aceite en agua (O/W) y las emulsiones con agua como fase dispersa se conocen como emulsiones de agua en aceite (W/O).

En segundo lugar se tienen que las microemulsiones son una mezcla monofásica de surfactante, agua y aceite, generalmente con alcohol, que exhibe estabilidad permanente y comportamiento de fluido. Son mezclas transparentes, homogéneas, isótropas, termodinámicamente estables y presentan tensiones interfaciales ultrabajas con agua y aceite. Gracias a estas características pueden usarse a baja concentración de surfactante para formar un sistema trifásico (microemulsión-agua-aceite) en la recuperación o remoción de crudo. En las microemulsiones la concentración del surfactante es varias veces superior a la CMC y las proporciones de agua y aceite son iguales. Conviene resaltar que estas microemulsiones no son emulsiones por dos



razones: primero no contienen gotas de una de las fases dispersadas en la otra y, por otra parte, están asociadas a una curvatura cero o casi nula de la capa de surfactante.

Finalmente, se tiene que en las soluciones micelares se produce una asociación espontánea para formar agregados llamados micelas, las cuales son el resultado de la naturaleza dual de las moléculas de surfactante; la parte hidrofóbica tiende a escapar de la masa de agua y la parte hidrofílica interacciona fuertemente con ella y aparecen cuando la concentración del surfactante excede un cierto valor, llamado concentración micelar crítica (CMC). Dicha concentración se consigue más fácilmente si el surfactante es predominantemente hidrofílico.

Debido a esto se observan cambios bruscos en las propiedades fisicoquímicas, ya que, al aumentar la concentración de surfactante en agua, la tensión superficial disminuye debido a que las moléculas se adsorben en la superficie del agua. Al agregar mayor cantidad de surfactante se alcanza un punto donde las moléculas están totalmente empaquetadas en la superficie, de forma totalmente vertical, con la parte hidrofílica orientada hacia el agua y la parte lipofílica hacia el aceite.

Las aplicaciones de las soluciones micelares son amplias y diversas. Quizá una de las más extendidas sea la detergencia, la remoción de materia orgánica como grasa y sólidos como polvo de fibras textiles.

A continuación se exponen las características más relevantes de las técnicas de remoción seleccionadas:

Tabla 4.28

Resumen de las características de los sistemas de tratamiento a los suelos contaminados

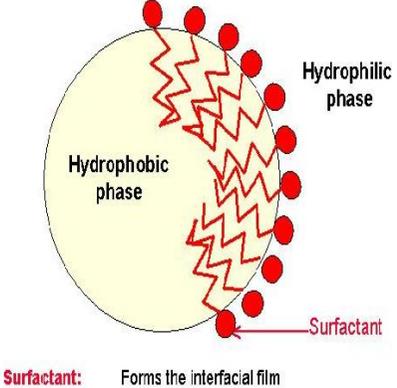
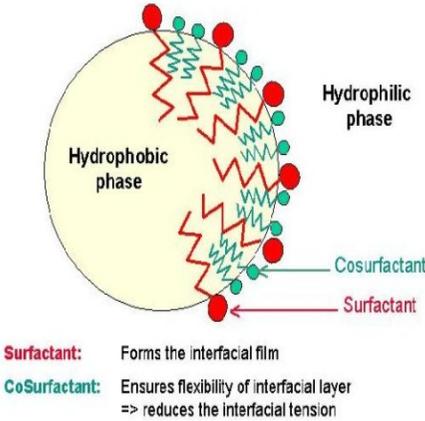
Emulsiones (Macroemulsiones)	Microemulsiones	Soluciones Micelares
		
<p>Están formadas por gotas aproximadamente esféricas de una fase dispersa en la otra.</p>	<p>Evolucionan constantemente entre las diversas estructuras que van desde la gota, como en las micelas hinchadas hasta arreglo lamelar multicapas.</p>	<p>El soluto está en la misma fase que el solvente.</p>
<p>Diámetro de la gota: 1 a 20 μm.</p>	<p>Diámetro de la gota: 10 a 200 nm.</p>	<p>Diámetro de la gota: 2 a 5 nm.</p>
<p>La mayoría de las emulsiones son opacas (blanco) porque el grueso de sus gotas es mayor que la longitud de onda de la luz y la mayoría de los aceites tienen mayores índices de refracción que el agua.</p>	<p>Son transparentes o translúcidos porque el diámetro de la gota es menor de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la luz, que dispersan poco la luz.</p>	<p>Opacas y/o transparentes.</p>



Tabla 4.28 (Continuación)

Resumen de las características de los sistemas de tratamiento a los suelos contaminados

Las gotas de la emulsión ordinaria, por pequeña que sean existen como entidades individuales hasta se produce la coalescencia o maduración de Ostwald.	En la microemulsión una gotita puede desaparecer dentro de una fracción de un segundo, mientras que otra gota se forma espontáneamente en otras partes del sistema.	Termodinámicamente estables.
Son cinéticamente estable y termodinámicamente inestables.	Termodinámicamente estable que y puede tener esencialmente duración infinita suponiendo que no hay cambio en la composición, temperatura y presión, y no tienden a separarse.	Poder solubilizante por encima de la CMC.
Son lióforo.	Ellos están en el límite entre los coloides y lióforo -lipófilo.	
En general exigen una intensa agitación para su formación, excepto las nanoemulsiones que se hacen por emulsión espontánea.	Alto poder solubilizante.	
	Generalmente son obtenidos por mezcla suave de los ingredientes.	

Fuente: (Patel, 2011)



4.6 Selección técnica de la(s) alternativa(s) más apropiada(s) que mejor se adapte al proceso de remoción.

Para la selección de la técnica más adecuada, se compararon cada una de las propuestas haciendo uso de una matriz de ponderación de puntos. En la cual se estableció cuál alternativa resultaba más influyente en la remoción. Para ello se fijaron los criterios según el nivel de importancia, con la ayuda de expertos en el área de formulación.

- ❖ Solubilización.
 - ❖ Estabilidad.
 - ❖ Detergencia.
 - ❖ Tensión interfacial.
 - ❖ Concentración del surfactante.
-
- ❖ **Solubilización:** la baja solubilidad de muchos hidrocarburos limita el proceso de biodegradación. Sin embargo, la solubilidad puede lograrse por la presencia de micelas, por lo tanto, la solubilización es un fenómeno claramente micelar, una vez sobrepasada la CMC comienza la solubilización, ocurriendo en muy poca extensión a concentraciones donde los surfactantes se encuentran como agregados premicelares o monómeros.

Estas pueden solubilizar moléculas orgánicas de varias formas. Las sustancias de tipo hidrocarburos, y en general las sustancias netamente apolares, están solubilizadas en el interior o corazón de las micelas, el cual está constituido por las partes lipofílicas de las moléculas de surfactante.

En cuanto a las moléculas orgánicas con cierto carácter polar (ácidos, alcoholes) se solubilizan en la superficie de la micela mediante un proceso conocido como comicelización. El poder solubilizante de las micelas es probablemente la propiedad de mayor importancia desde el punto de vista analítico. La solubilización de un analito en



una micela determinada es un proceso de equilibrio dinámico y depende tanto de la naturaleza del soluto como del medio micelar empleado.

A partir de la concentración micelar crítica, la solubilización aumenta considerablemente, ya que el hidrocarburo penetra dentro del interior de las micelas. En general, se puede decir que cadenas largas y lineales del surfactante, particularmente de los iónicos, exhibe una alta solubilización pero tiende a producir cristales líquidos y geles, mientras que cadenas de tamaño intermedio y ramificadas no produce una alta solubilización pero tampoco produce estructuras gelificadas.

De lo anteriormente expuesto, se puede mencionar que la solubilización es un factor importante para la presente investigación, porque se necesitó remover crudo en las muestras de suelos contaminados; pero éste presentaba una baja solubilidad, lo cual limitaba el proceso de biodegradación. Sin embargo, la solubilización se logró por la presencia de micelas.

❖ **Estabilidad:** en un sistema es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un período de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a algunos años. En sistemas termodinámicamente inestables tarde o temprano ocurrirá una separación en dos fases, sin embargo, pueden lograrse sistemas perfectamente metaestables con la adición de un surfactante; ya que, el comportamiento de éste en la interfase agua/aceite es un factor dominante en la estabilización, aunque otras variables pueden influenciar los fenómenos dinámicos.

En este sentido se tiene que, los sistemas SOW formulados en los objetivos anteriores presentaron estabilidad mediante la adición de un tensoactivo y un co-tensoactivo.



❖ **Detergencia:** se refiere al proceso de limpieza de una superficie sólida o de una estructura fibrosa mediante un baño líquido, en el cual la acción limpiadora del solvente está considerablemente aumentada por procesos fisicoquímicos atribuibles al surfactante y demás componentes del detergente.

Los sucios líquidos, especialmente los aceitosos pueden estar retenidos por fuerzas capilares, mientras que los sucios sólidos pueden estar retenidos por simples razones geométricas. La remoción de sucio orgánico en estado líquido de un sustrato, involucra varios mecanismos que actúan en forma separada o concurrente: cambio de mojabilidad, solubilización, emulsión.

En la remoción del crudo presente en la muestra de suelo contaminado en Yaracal Estado Falcón, se consideró como factor importante la detergencia por la acción limpiadora que presenta el surfactante empleado.

❖ **Tensión interfacial:** es la fuerza de atracción hacia dentro ejercida sobre las moléculas de la superficie de un líquido. Esta tensión tiene como consecuencia la contracción de la superficie. Cuando se ponen en contacto dos líquidos inmiscibles el sistema considerado estará formado por las dos fases líquidas y la interfase de contacto entre ellas. Las moléculas de la interfase entre dos líquidos estarán sometidas a fuerzas de magnitudes diferentes a las que están sometidas las moléculas del seno de cada uno de los líquidos.

Además se tendrán también interacciones de tipo Van der Waals con las moléculas del otro líquido en la interfase, lo que conducirá a que la tensión a la interfase (tensión interfacial) tenga un valor intermedio entre las tensiones superficiales de los dos líquidos condensados.



En este orden de ideas, se tiene que en los sistemas SOW formulados, se alcanzó la formulación óptima y en dicha condición se obtuvo el valor más bajo de tensión interfacial y la máxima solubilización para cada sistema respectivamente.

❖ **Concentración del surfactante:** modifica el comportamiento en la interfase agua/aceite siendo éste un factor dominante en la estabilización de emulsiones. La presencia de surfactante es lo que permite controlar los diferentes fenómenos involucrados en la etapa de drenaje/floculación. Cuando se tiene una concentración de surfactante considerablemente superior a la CMC, resulta en la presencia de muchas micelas que se contactan en un fenómeno llamado percolación

Una vez establecidos los criterios de evaluación se procedió a establecer los porcentajes para cada uno. Éstos se muestran en la tabla 4.29, fueron asignados considerando el efecto que el criterio seleccionado tiene en el sistema formulado.

Tabla 4.29

Porcentaje y puntaje de cada criterio empleado para el uso de la matriz de selección

CRITERIO	PORCENTAJE	PUNTAJE
Solubilización	25	1-5
Tensión interfacial	25	1-5
Detergencia	20	1-5
Estabilidad	15	1-5
Concentración del surfactante	15	1-5



A continuación, en la tabla 4.30 se procede mediante una matriz de selección determinar cual de éstas alternativas es la más factible para lograr el objetivo principal, considerando los factores antes mencionados:

Tabla 4.30

Ponderación parcial de cada criterio empleado para el uso de la matriz de selección

Criterios	Ponderación (%)	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
		Emulsiones	Soluciones micelares	Microemulsiones
Valoración (1-5)				
Solubilización	25	1	3	5
Tensión interfacial	25	1	3	5
Detergencia	20	3	3	5
Estabilidad	15	1	5	5
Concentración del surfactante	15	5	1	1
TOTAL	100	200	300	440

Después de analizar las tres alternativas en la matriz de selección, resultó que la mejor alternativa es la alternativa 3, la cual contempla el uso de microemulsiones. Dicha opción obtuvo un puntaje de 440, por tal motivo, se seleccionó como la alternativa aplicada en la remoción del crudo liviano en Yaracal, Estado Falcón.

En el presente trabajo se logró detectar las microemulsiones en varios de los sistemas estudiados. El estudio de sistemas surfactante-agua-aceite implica la detección de un sistema correspondiente a lo que se conoce como formulación óptima. Este término, proveniente de la industria petrolera, indica un sistema cuya tensión interfacial es ultra baja y presenta una fase bicontinua (microemulsión) en equilibrio con las fases aceite y acuosa.



De igual manera, se alcanzó una concentración de surfactante considerablemente superior a la CMC, lo que resultó en la presencia de muchas micelas que se contactan en un fenómeno llamado percolación. Por otra parte, las proporciones de agua y aceite fueron del mismo orden de magnitud. Todo eso implicó: primero, un sistema estable desde el punto de vista termodinámico, ya que se forma espontáneamente, con un descenso de energía libre (Salager, 2008).

Segundo, el sistema se comportó como una fase única y presenta interfase definida al estar en equilibrio con agua y aceite. Tercero, la microemulsión puede pasar del tipo microgota de agua al tipo microgota de aceite de manera continua, sin la transición macroscópica que se presenta en la inversión de una macroemulsión.

Por lo tanto, se visualizan las microemulsiones como sistemas complejos de gran área interfacial entre microestructuras de agua y de aceite. Es justamente el gran área interfacial que hace que el surfactante pueda disponer de un medio adecuado para satisfacer su afinidad dual, y por lo tanto producir un sistema con energía libre inferior a aquella de las fases separadas.

Se logró en los sistemas SOW formulados, obtener condiciones del sistema llamadas “óptimas”, secciones 3.2.1 y 3.2.2, donde la tendencia hidrofílica e hidrofóbica del surfactante se igualan, y los cristales líquidos formados tienen una estructura lamelar multicapas; además se obtiene el máximo valor de solubilización.

Finalmente, se tiene que en las microemulsiones se alcanza un sistema termodinámicamente estable, la existencia de tensiones interfaciales ultrabajas y un poder solubilizante elevado en la remoción de crudo en los suelos contaminados.

CONCLUSIONES

1. A través de los barridos de formulación se observaron las contribuciones de todas las especies presentes en el sistema.
2. Los alcoholes actúan como co-surfactantes o cosolventes, reduciendo o eliminando las estructuras de geles o cristales líquidos que tienden a formar los surfactantes puros. El efecto de esta variable depende de su estructura y la concentración.
3. Los sistemas SOW formulados presentaron un comportamiento de fase que permitió encontrar la salinidad óptima en caso ($HLD=0$) excepto para el 1-Hexanol.
4. Los sistemas formulados por sus características físicas y químicas, presentaron una buena capacidad de solubilización.
5. Los sistemas formulados para el 2-Butanol y 1-Propanol presentaron salinidades óptimas elevadas de $(20,00 \pm 0,02) \%p/v$ y $(21,45 \pm 0,02) \%p/v$ respectivamente.
6. Los sistemas formulados para el 1-Pentanol y 1-Butanol presentaron salinidades óptimas bajas de $(4,90 \pm 0,02) \%p/v$ y $(9,90 \pm 0,02) \%p/v$ respectivamente.
7. El 1-Pentanol a la concentración de 2 %v/v y 8 %v/v no forma sistemas trifásicos.
8. El 2-Butanol sólo forma sistemas bifásicos a bajas concentraciones.
9. De los sistemas estudiados a diferentes concentraciones de alcohol, el 1-Pentanol y el 1-Butanol demostraron salinidades óptimas en un rango de [4-8] %v/v.
10. Para los sistemas SOW donde se emplea disoluciones de crudo, se observó una tendencia creciente del EACN directamente proporcional a la salinidad óptima.
11. En los sistemas con crudo el 1-Pentanol fue el alcohol que, mostró mejor desempeño para lograr sistemas trifásicos.
12. La alternativa seleccionada que mejor se adaptó al proceso de remoción de crudo fue la de microemulsión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, E. Do Mai, P. Harwell, J (2009). *Linker-modified microemulsions for a variety of oils and surfactants*. Journal of surfactants and detergents. Volumen 6. Pág: 353-363.

Barrios, L Polychroniadis, C (2009). *Evaluación del proceso de biorremediación de un suelo en la degradación de hidrocarburos saturados y aromáticos empleando bioestimulación*. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Departamento de Química. Venezuela.

Bouton, F. Durand, M. Nardello-Rataj, V. Serry, M. Aubry, J (2008). *Classification of terpene oils using the fish diagrams and the Equivalent Alkane Carbon (EACN) scale*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Pág.: 142-147.

Bourrel, M. Salager, J. Schechter, R (1980). *Correlation for phase behaviour of nonionic surfactants*. J.Colloid Int.Sci, 72(2), 451.

Cayias, J. Schechter, R. Wade, W (1976). *Modeling crude oils for interfacial tension*. Soc. Pet. Eng. J, 16, 351-357.

Chirino, S José (2011). *Estudio del número de alcano equivalente (EACN) para diferentes hidrocarburos a través de barridos de formulación de diversos sistemas surfactante-agua-aceite*. Universidad de Carabobo. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología. Departamento de Química. Venezuela.

Fernández, C. Silva, M. Pereira, J. Mallia, A. Llobregat, M. Altomare, V (2006). *Biodegradabilidad de las fracciones de resinas y asfaltenos por pseudomonas en suelo impactado con crudo mediano*. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Departamento de Química. Venezuela.

García, A y Ceballos, S (2010). *Evaluación de sistemas surfactante-agua-aceite en la formación espontanea de emulsiones*. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Química. Venezuela.

Huart, T y Shulman J (1943). *Nature* 152:102.

Himmelblau, D (1997). *Principios básicos y cálculos en ingeniería química*. Sexta edición. Editorial Prentice Hall. México.

Instituto Universitario Politécnico "Santiago Mariño" (2006). *Manual de Trabajo Especial de Grado*. (4ed). División de Planificación y Desarrollo de Investigación y Postgrado.

Mittal, K (1977). *Micellization, solubilization and microemulsions*. Volumen 2. Plenum Press, New York.

Ontiveros, F. Cárdenas, A. Bullon, J (2011). *Ultrafiltración de soluciones micelares*. Cuaderno FIRP S463-A. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP). Venezuela.

Paruta, E (2008). *Emulsiones geles. Influencia de la formulación y fracción de fase dispersada sobre sus propiedades reológicas y estabilidad*. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química.

Patel Mrunali R. (2007). *El diseño y desarrollo de nuevos sistemas de administración de fármacos con la intención de mejorar la eficacia de los fármacos existentes es un proceso continuo en la investigación farmacéutica*.

Pérez, Víctor M (2009). *Estudio de la formulación de sistemas surfactante-aceite-agua como alternativa en la remediación de suelos contaminados con crudo liviano de Yaracal estado Falcón*. Universidad de Carabobo. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología. Departamento de Química. Venezuela.

Pérez, C. y Torres L. (2005). *Lineamientos metodológicos para la redacción y elaboración del plan de trabajo*. Valencia: Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Carabobo.

Pérez, M (1994). *Influencia de la viscosidad del agua y del aceite sobre el comportamiento de fase y el lugar geométrico de inversión*. Informe Técnico FIRP N° 9406.

Pereira, J (2000). *Estudio estructural de asfaltenos provenientes de crudos venezolanos*. Disertación Trabajo Especial de Maestría. Universidad Central de Venezuela.

Perry, R. Green, D. Maloney, J (1992). *Manual del Ingeniero Químico*. Editorial McGraw Hill. Sexta edición. Tomo I. Tercera edición en español.

Quintana, José. Katime, I. Villacampa, M (2003) *Micelas*. Revista Iberoamericana de Polímeros. Bilbao. España.

Riojas, H. Torres, L. Moncada, I. Balderas, J. Gortáres, P (2010). *Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos*. Departamento de Recursos Naturales. Instituto Tecnológico de Sonora, 5. México.

Salager, J. Forgiarini, A. Marquez, L. Tolosa, L. Vejar, F (2008). *Microemulsiones para la recuperación mejorada de crudo y la limpieza de pozos*. Cuaderno Universidad

de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP). Venezuela.

Salager, Jean y Antón R (2005). *Métodos de medición de la tensión superficial o interfacial*. Cuaderno FIRP S205-B. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Salager, Jean y Fernández, A (2004). *Surfactantes: generalidades y materias primas*. Cuaderno FIRP 301. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP). Venezuela.

Salager, Jean L (2000). *Formulation concepts for the emulsion maker in pharmaceutical emulsions and suspensions*. Nielloud, F, Marti-Mestres, G. Eds; Marcel Dekker: New York, Chapter 2, 19-72.

Salager, Jean L (1993). *Surfactantes en solución acuosa*. Cuaderno FIRP 201. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP). Venezuela.

Salager, Jean (1998). *Formulación HLB, PIT, R de Winsor*. Cuaderno FIRP S210A versión 2. Modulo de enseñanza en fenómenos interfaciales. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP). Venezuela.

Salager, Jean y Antón, R (1990). *Surfactantes*. Cuaderno FIRP 300. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP). Venezuela.

Salager, Jean y Anton, R (1991). *Comportamiento de fase de los sistemas surfactante-agua-aceite: Diagramas y barridos*. Cuaderno FIRP N° 220. Universidad de

los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP). Venezuela.

Salager, J. Morgan, J. Schechter, R. Wade, W (1979). *Optimal formulation of surfactant/water/oil systems for minimum interfacial tension or phase behavior*. Soc. Pet. Eng. J. 19, 107-115.

Salager, Jean y Anton R (2001). *Formulación de microemulsiones por el método de HLD*. (Traducción). Techniques of Ingenuity, Artículo J2-157, 1-20.

Shinoda, K (1967). *Solvent properties of surfactant solutions*. M.Dekker, New York.

Sumit, K Kiran. Moran, K. Acosta, E (2008). *Evaluating the hydrophilic-lipophilic nature of asphaltenic oils and naphthenic amphiphiles using microemulsion models*. University of Toronto. Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry. Canada.

Scriven, L. E (1977). *Micellization, solubilization and microemulsion*. K. Mitta, Ed, Plenum Press, 877.

Velázquez, C. Josmary, A (2008). *Caracterización y estudio del comportamiento de fase de surfactantes estirados con cabeza polar de sulfato de sodio*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Venezuela.

Winsor, P (1968). *Binary and multicomponent solutions of amphiphilic compounds. Solubilizations and the formation, structure and theoretical significance of liquid crystalline solutions*. Chemical Review, 68, 1-40.

Tabla B.1

Análisis textural del suelo virgen y suelo contaminado

Identificación del suelo	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura
Suelo virgen	41,2	26,0	32,0	Arcillosa
Suelo contaminado	23,2	14,8	62,0	Franco Arcillo Arenosa

Fuente: Laboratorio General de Suelos del Instituto de Edafología de la UCV, 2006.

Tabla B.2

Análisis de fertilidad del suelo virgen y suelo contaminado inicial

Identificación del suelo	Concentración (ppm)					Concentración (%)		
	P	K	Ca	Na	Mg	C.O	M.O	N
Suelo virgen	7,0	64,0	2163,0	50,0	344,0	4,880	7,41	0,368
Suelo contaminado	7,0	10,0	253,0	24,0	272,0	6,120	10,54	0,099

Fuente: Laboratorio General de Suelos del Instituto de Edafología de la UCV, 2006.

A. MODELOS MATEMÁTICOS Y CÁLCULOS TÍPICOS

En esta sección se presentan los diferentes modelos matemáticos y cálculos implicados en la remoción de crudo y formulaciones de los sistemas SOW.

1. Cálculo de la masa de surfactante o sal necesaria para preparar un volumen fijo de solución

- **Cálculo de la masa de surfactante para preparar una solución madre al 10%p/v**

Como el SDS suministrado no fue de una pureza del 99 %p/p, sino de 85 %p/p se procedió a realizar lo siguiente:

$$\frac{10g \text{ SDS puros}}{100 \text{ mL solución}} \times \frac{100g \text{ impuros}}{85 \text{ g SDS puros}} \cong 11,80 \text{ g impuros a pesar} \quad (\text{A.1})$$

(Himmelblau, 1997)

- **Cálculo de la masa de cloruro de sodio para preparar una solución madre al 10%p/v**

$$\%p/p = \frac{g_{\text{solute}}}{g_{\text{solución}}} \times 100 \quad (\text{A.2})$$

(Himmelblau, 1997)

Donde:

$\%p/p$: porcentaje en peso de la solución madre (g/g)

g_{solute} : gramos de soluto (g)

$g_{\text{solución}}$: gramos de solución (g)

Posteriormente, despejando los gramos del soluto y luego sustituyendo en la ecuación (1.6) se tiene que:

$$g_{\text{solute}} = \frac{10g/g \times 100g}{100} = 10g \text{ de soluto a disolver}$$

2. Cálculo del porcentaje removido de crudo por cada sistema SOW formulado

- Para el sistema que contiene SDS/agua/NaCl/kerosene/ 5,2% v/v de 1-pentanol (Tubo 1) se tiene que:

$$\% \text{Removido} = \frac{\left(\text{Peso}_{\text{sueloinicial}} - \text{Peso}_{\text{suelofinal}} \right)}{\text{Peso}_{\text{sueloinicial}}} \times 100 \quad (\text{A.3})$$

(Himmelblau, 1997)

Donde:

$\% \text{Removido}$: porcentaje de crudo removido (%).

$\text{Peso}_{\text{sueloinicial}}$: masa inicial del suelo con crudo sin sistema SOW (g).

$\text{Peso}_{\text{suelofinal}}$: masa final del suelo con crudo con sistema SOW (g)

Se tiene que los pesos iniciales son los siguientes:

$$\text{Peso}_{\text{sueloinicial}} = (0,2565 \pm 0,00001)g$$

$$\text{Peso}_{\text{suelofinal}} = (0,2334 \pm 0,00001)g$$

Posteriormente al sustituir en la ecuación 1.7, nos queda que:

$$\% \text{Removido} = \frac{(0,2565 - 0,2334)}{0,2565} * 100 = 9,0058\%$$

3. Cálculo de los volúmenes de cloruro de sodio y de surfactante para añadir en cada uno de los tubos de ensayo calibrados y realizar los barridos de formulación

- Por ejemplo para una salinidad de 4%p/p de NaCl a partir de una solución madre de 10%p/p de NaCl y una concentración de alcohol de 5,2%v/v, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_C \times C_C = V_D \times C_D \quad (\text{A.4})$$

(Himmelblau, 1997)

Donde:

V_C : volumen de la solución concentrada (mL).

C_C : concentración de la solución concentrada (%p/p).

V_D : volumen de la solución diluida (mL)

C_D : concentración de la solución diluida (%p/p).

Al despejar y sustituir en la ecuación 1.8 nos queda que:

$$V_{NaCl} = \frac{5mL \times 4\% p / p}{10\% p / p} = 2mL$$

Luego se tiene que los volúmenes a añadir para el tubo que contiene una salinidad de 4%p/p son los siguientes:

- $V_{NaCl} = 2mL$
- $V_{agua} = 2mL$
- $V_{aceite} = 5mL$
- $V_{SDS} = 1mL$
- $V_{alcohol} = 0,52mL$

4. Cálculo del número de alcano equivalente para el sistemas SOW con SDS 1 %p/v y 5,2 %v/v 1-Pentanol con crudo al 0,5 %v/v

Tomando los valores de la Tabla C.2 del Apéndice C y sustituyendo en la ecuación 1.3 del Capítulo II, se tiene que:

$$EACN = \frac{\ln\left(\frac{S_{ref}^*}{S^*}\right)}{k} + 7 \rightarrow EACN = \frac{\ln\left(\frac{4,5}{5,2}\right)}{0,10} + 7 \quad (A.5)$$

$$EACN = 6,8554$$

Tabla C.1

Características físicas y químicas principales de los aceites, alcoholes y sales utilizados para la realización de los barridos de formulación

n-alcano, alcohol y sal	Masa molecular	Pto. de fusión (°C)	Pto. de ebullición (°C)	Densidad relativa	Pureza (%)
Dodecil sulfato de sodio (SDS)	288,38				85
Agua destilada	18	0	100	1	
Cloruro de sodio (NaCl)	58,44	800,4	413	2,163	>99,5
Kerosene	-----	-----	-----	0,792	-----
Heptano	100,20	-90,6	98,4	0,6837	>99,6
1-Hexanol	102,18	-51,6	157,2	0,820 ^{20/20}	96
2-Butanol	74,12	-114,7	99,5	0,808 ^{20/4}	
1-Butanol	74,12	-79,9	117	0,810 ^{20/4}	
1-Propanol	60,10	-127	97,8	0,804 ^{20/4}	
1-Pentanol	88,15	-79	137,3	0,8144	>99

Fuente: Perry, 1992

Tabla C.2

Valores de parámetro característico b y a para surfactantes no iónicos e iónicos y diversos alcoholes

Tableau 1 – Valeurs du paramètre b , caractéristique du sel ajouté (surfactifs non ioniques)			
Sel	NaCl	CaCl ₂	KCl
b	0,13	0,10	0,09

Tableau 2 – Valeurs du paramètre a , caractéristique de l'alcool ajouté (1)		
Alcool	a pour les surfactifs	
	ioniques	non ioniques
1- ou 2-Propanol	0	- 0,2
1-Butanol	+ 0,3 à 0,6	+ 0,35
2-Butanol	+ 0,05	- 0,05
Isopentanol	+ 1,0	+ 0,6
1-Pentanol	+ 1,1	+ 0,7
1-Hexanol	+ 4	+ 1,1

(1) Paramètres valables pour des pourcentages faibles d'alcool (< 3%). En raison du phénomène de fractionnement (cf. § 4.3), a varie en fonction de la concentration du surfactif et du rapport E/H.

Fuente: Salager, 2001

Tabla C.3

Valores experimentales de los parámetros, α , σ , k , t de algunos surfactantes típicos

Tableau 3 - Valeurs expérimentales des paramètres σ , α , k , t de quelques surfactifs typiques (1)				
Surfactif	σ ou α	k	σ/k ou $[\alpha - \text{EON}]/k$	t (°C) ⁻¹
iso-C ₉ benzènesulfonate de sodium	- 1,6	0,16	- 10	- 0,01
iso-C ₁₂ benzènesulfonate de sodium	- 0,6	0,16	- 3,5	- 0,01
iso-C ₁₂ o-xylènesulfonate de sodium	+ 0,5	0,16	+ 3,5	- 0,01
iso-C ₁₂ p-benzoate de sodium	+ 0,6	0,16	+ 4	- 0,01
C ₁₂ carboxylate de sodium	- 2,4	0,10	- 24	- 0,01
C ₁₂ sulfate de sodium	- 3,0	0,10	- 30	- 0,01
C ₁₂ ammonium, chlorure (à pH 3)	- 0,8	0,17	- 5	- 0,02
C ₁₂ triméthylammonium, chlorure	- 3,6	0,19	- 19	- 0,02
C ₁₆ triméthylammonium, chlorure	- 1,7	0,19	- 9	- 0,02
iso-C ₉ phénol éthoxylé	+ 6,2 (2)	0,15	+ 7,7 (3)	0,06
iso-C ₉ phénol éthoxylé	+ 6,5 (2)	0,15	+ 10 (3)	0,06
iso-C ₁₂ phénol éthoxylé	+ 7,3 (2)	0,15	+ 15 (3)	0,06
iso-C ₁₈ phénol éthoxylé	+ 9,5 (2)	0,15	+ 30 (3)	0,06
C ₁₀ alcool éthoxylé	+ 5,3	0,15	+ 2 (3)	-
C ₁₂ alcool éthoxylé	+ 5,9	0,15	+ 6 (3)	-
iso-C ₁₃ alcool éthoxylé	+ 4,3	0,15	- 5 (3)	0,06
C ₁₄ alcool éthoxylé	+ 6,6	0,15	+ 11 (3)	-

(1) C_n symbolise une chaîne alkyle linéaire à n carbones et iso-C_n une chaîne ramifiée.
 (2) Valeurs de α obtenues avec 1 % de surfactif et un rapport E/H égal à 4.
 (3) Valeurs de $[\alpha - \text{EON}]/k$ obtenues pour EON = 5.

Fuente: Salager, 2001

Tabla C.4

Valores de EACN de algunos aceites típicos

Tableau 7 – Valeur des EACN de quelques huiles typiques	
Huile	EACN
Huile de paraffine	+ 20 à + 25
Huile de soja	+ 18
Triglycéride en C ₈ -C ₁₀	+ 15
Diglycéride en C ₁₀ -C ₁₂	+ 9
Alcane linéaire à <i>n</i> carbones	+ <i>n</i>
Kérosène	+ 9 à + 11
Limonène	+ 9
Pinène	+ 7,5
Oléate d'éthyle	+ 6,5
Cyclohexane	+ 3,5
Tétrachloroéthylène	+ 3
<i>p</i> -Xylène	+ 2
Toluène	+ 1
Benzène	0
Tétrachlorométhane	0
1,1,1-Trichloroéthane	- 2,5
Trichloroéthylène	- 4
1,2-Dichlorobenzène	- 5
1,2-Dichloroéthane	- 12
Dichlorométhane	- 14
Chloroforme	- 14
1,1,2,2-Tétrachloroéthane	- 22

Fuente: Salager, 2001

Tabla C.5
HLB de algunos surfactantes típicos

Nombre	Surfactante	HLB
Span 85	Trioleato de sorbitol (NI)	1,8
Span 65	Triestearato de sorbitol (NI)	2,1
Span 80	Monooleato de sorbitol (NI)	4,3
Span 60	Monoestearato de sorbitol (NI)	4,7
Span 40	Monopalmitato de sorbitol (NI)	6,7
Span 20	Monolaurato de sorbitol (NI)	8,6
Tween 81	Igual al Span 80 con poli-EO (NI)	10,0
Tween 65	Igual al Span 65 con poli-EO (NI)	10,5
Tween 21	Igual al Span 20 con poli-EO (NI)	13,3
Tween 60	Igual al Span 60 con poli-EO (NI)	14,9
Tween 80	Igual al Span 80 con poli-EO (NI)	15,0
Tween 40	Igual al Span 40 con poli-EO (NI)	15,6
Tween 20	Igual al Span 20 con poli-EO (NI)	16,7
Triton X-15	Octil-fenol-1,5 EO (NI)	3,6
Triton X-35	Octil-fenol-3,5 EO (NI)	7,8
Triton X-45	Octil-fenol-4,5 EO (NI)	10,4
Triton X-114	Octil-fenol-7,5 EO (NI)	12,4
Sipex SB	Dodecil sulfato de sodio (AI)	40,0
Sipon L-22	Dodecil sulfato de amonio (AI)	31,0
Sipon LT6	Dodecil sulfato de trietanolamina (AI)	34,0
Neodol 25-7	Alcohol primario (C12-15) poli-EO (NI)	12,0

Fuente: Salager, 1998

Tabla C.6

Relación de volumen de los componentes empleados para preparar los sistemas SOW con SDS al 1% p/v

Salinidad (C±0,05)%p/v	Volumen de SDS al 10%p/v (V±0,02) mL	Agua (V±0,02) mL	NaCl al 10%p/v (V±0,02)mL	Kerosene (V±0,02) mL	Volumen de 1-alcohol (V±0,02)mL	Volumen total (V±0,02)mL
1,00	1,00	3,50	0,50	5,00	0,52	10,52
1,50		3,25	0,75			
2,00		3,00	1,00			
2,50		2,75	1,25			
3,00		2,50	1,50			
3,50		2,25	1,75			
4,00		2,00	2,00			
4,50		1,75	2,25			
5,00		1,50	2,50			
5,50		1,25	2,75			
6,00		1,00	3,00			
8,00		0,00	4,00			

Fuente: Pérez, 2009