

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EFECTO DE VARIABLES DE FORMULACIÓN Y
FLUJOMECÁNICAS EN ESPUMAS DE HIDROCARBUROS”**

PRESENTADO POR:

**Pedro Luís Alcalá Noriega
Cristina Mercedes Rojas León**

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
Requisito Parcial para Optar al Título de**

INGENIERO DE PETRÓLEO

INGENIERO QUÍMICO

BARCELONA, JULIO DE 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EFECTO DE VARIABLES DE FORMULACIÓN Y
FLUJOMECÁNICAS EN ESPUMAS DE HIDROCARBUROS”**

ASESORADO POR:

**Prof. Shirley Marfisi (Dra.)
Asesora académica**

BARCELONA, JULIO DE 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EFECTO DE VARIABLES DE FORMULACIÓN Y
FLUJOMECÁNICAS EN ESPUMAS DE HIDROCARBUROS”**

**Ing. Quím. Shirley Marfisi (Dra.)
Asesor Académico**

**Ing. Quím. Raida Patiño
Jurado Principal**

**Ing. Quím. Oly Guerra
Jurado Principal**

BARCELONA, JULIO DE 2009

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien le participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

...A nuestra hija que nos da día a día la motivación de nuestras vidas.

PEDRO ALCALA
CRISTINA ROJAS

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer a todas las personas que hacen vida en el laboratorio de sistemas dispersos y ambiente, de la Universidad de Oriente. Muy especialmente a: Prof. Shirley, Prof. Alexis, Prof. Raida, Carlos, Tony, Gladys, Guillermo y Cesar.

PEDRO ALCALÁ
CRISTINA ROJAS

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluaron los efectos de variables de formulación y flujomecánicas en espumas de hidrocarburos. Se utilizó un equipo de medición de espumas diseñado bajo la norma ASTM D 892, con el que se realizaron una serie de pruebas preliminares para establecer parámetros operacionales; definiendo un flujo de gas N₂ de 70 ml/s, temperatura de 30°C, volumen inicial de 200 ml y mezcla hidrocarbonada 80% aceite- 20% kerosén. Para la formulación de espumas de hidrocarburos se variaron las concentraciones y tipos de surfactantes, probando con Span 20, Span 80 y Tween 20; registrándose un incremento de la espumabilidad y la estabilidad de la muestra, siendo el sistema con surfactante Span 20 al 1% m/v el de máxima espumabilidad. Bajos porcentajes de agua agregados a la mezcla hidrocarbonada evidenciaron un aumento en la espumabilidad y estabilidad de la espuma, mientras que una disminución en los valores del EACN redujeron las características de la espuma. Analizando los efectos flujomecánicos, se evaluó el efecto del flujo sobre la espuma, obteniendo una espumabilidad máxima a los 100 ml/s. La adición de sólidos, tales como Bentonita, CaCO₃ y Asfaltos precipitados, incrementaron la espumabilidad y estabilidad de la espuma. Se analizó el efecto de los alcoholes en las espumas no acuosas, evidenciándose el efecto antiespumante de cada uno de estos. En todos los estudios se encontraron regímenes de formación de espuma tipo Bikerman, y en el colapso dominó la presencia del régimen tipo exponencial negativo.

ÍNDICE

RESOLUCIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VII
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	22
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	22
1.2. OBJETIVOS	24
1.2.1. Objetivo general	24
1.2.2. Objetivos específicos	24
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	25
2.1. ANTECEDENTES	25
2.2. ANFÍFILOS, SURFACTANTES Y TENSOACTIVOS	27
2.2.1 Clasificación de los Surfactantes	29
2.2.2 Propiedades fundamentales de los surfactantes	33
2.3. ESPUMAS	35
2.3.1 Formación de una espuma	36
2.3.2 Espumabilidad y Estabilidad de una Espuma	38
2.3.3 Factores que influyen en la formación de las espumas	39
2.3.4 Mecanismos y Causas del Colapso de las Espumas	41
2.3.5 Medición de Espumabilidad y Estabilidad de Espumas	46
2.3.5.1 Método Estático de Ross-Miles	47

2.3.5.2 Método Dinámico de Bikerman.....	48
2.3.5.3 Método Mixto	50
2.3.6 Selección de los Surfactantes para la Formulación de una Espuma.....	51
2.3.6.1 Compromiso entre los grupos Hidrófilo y Lipófilo del Surfactante.....	52
2.3.6.2 Longitud Óptima de las Sales de Ácidos Grasos Naturales.....	53
2.3.6.3 Ramificación del Grupo Lipófilo del Surfactante	54
2.3.6.4 Tipo y Dimensión del Contra- ión.....	55
2.3.7 Regímenes de Formación y Colapso de Espumas	56
2.3.7.1 Regímenes de Formación de Espuma.....	56
2.3.7.2 Regímenes de Colapso de las Espumas.....	59
CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO	61
3.1 REALIZACION DE PRUEBAS EXPLORATORIAS PARA LA CALIBRACION DEL EQUIPO DE ESPUMAS.....	61
3.1.1 Pruebas preeliminares.....	62
3.1.2 Definicion de parámetros operativos	64
3.2 FORMULACIONES DE ESPUMAS DE HIDROCARBUROS, VARIANDO LA CONCENTRACIÓN Y TIPO DE SURFACTANTE, RELACIÓN AGUA-ACEITE, EL EACN (NÚMERO DE ALCANOS EQUIVALENTE DEL ACEITE), EL FLUJO DE GAS Y LA VISCOCIDAD DEL ACEITE (POR ADICIÓN DE SÓLIDOS).....	72
3.2.1 Variación de la concentración y tipo de surfactante	73
3.2.2 Relacion Agua-Aceite.....	79
3.2.3 Variación del EACN.....	82
3.2.4 Variación del flujo de gas (N ₂)	85
3.2.5 Variación de la viscosidad del aceite (por adición de sólidos)	

.....	87
3.3 INTERPRETACIÓN DEL ROL DE LOS ALCOHOLES EN LA ESTABILIDAD DE UNA ESPUMA NO ACUOSA, CAMBIANDO EL TIPO DE ACOHOL.....	98
3.4 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES REGÍMENES DE FORMACIÓN Y COLAPSO.....	101
3.5 EQUIPOS, MATERIALES Y SUSTANCIAS.....	102
3.6 MUESTRA DE CÁLCULO.....	105
3.6.1 Cálculo de la altura de la espuma (He)	105
3.6.2 Cálculo de EACN promedio.....	105
CAPITULO IV. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	107
4.1.1 Realización de Pruebas Exploratorias para la Calibración del Equipo de Espumas.....	107
4.1.1.1 Pruebas preliminares	108
4.1.2 Formulaciones de Espumas de Hidrocarburos, Variando la Concentración y Tipo de Surfactante, Relación Agua-Aceite, el EACN (Número de Alcano Equivalente del Aceite), el Flujo de Gas y la Viscosidad del Aceite (por adición de sólidos).....	113
4.1.2.1 Variación de la concentración y tipo de surfactante.....	113
4.1.2.2 Relación Agua-Aceite	121
4.1.2.3 Variación del EACN	122
4.1.2.4 Variación del flujo de gas N ₂	124
4.1.2.5 Variación de la viscosidad del aceite (por adición de sólidos).....	126
4.1.3 Interpretación del rol de los alcoholes en la estabilidad de una espuma no acuosa, cambiando el tipo de alcohol.	132

4.1.4 Comparar los diferentes regímenes de formación y colapso de las espumas no acuosas formuladas.....	135
4.2 CONCLUSIONES	138
4.3 RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	141
ANEXOS.....	145
Anexo A. Conversión de EACN y tablas adicionales.....	145
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS	146

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 REPRESENTACIÓN GENÉRICA DE UNA MOLÉCULA DE ASFALTENO.....	28
FIGURA 2.1 ALGUNOS TIPOS DE SURFACTANTES. [8].....	33
FIGURA 2.2 ADSORCIÓN DE UNA MOLÉCULA DE SURFACTANTE EN UNA INTERFASE.....	33
FIGURA 2.3 FENÓMENOS RELACIONADOS A LA ADSORCIÓN DE UN SURFACTANTE. [14].....	34
FIGURA 2.4 DIFERENTES ESTRUCTURAS POR LA ASOCIACIÓN DE SURFACTANTES. [13]	35
FIGURA 2.5 ESTIRAMIENTO DE UNA PELÍCULA POR EFECTO GIBBS. [16]	37
FIGURA 2.6 EFECTO MARANGONI. [16].....	38
FIGURA 2.7 SEGREGACIÓN DE BURBUJAS Y DRENAJE DE LÍQUIDO EN ESPUMA HÚMEDA. [4].....	42
FIGURA 2.8 SUCCIÓN CAPILAR DEL LÍQUIDO DEL CENTRO DE LA PELÍCULA.....	43
HASTA LOS BORDES DE PLATEAU.[4].....	43
FIGURA 2.9 DIFUSIÓN DE GAS ENTRE BURBUJAS. [16]	44
FIGURA 2.10 EVOLUCIÓN DE UNA ESPUMA POR DIFUSIÓN GASEOSA INTRA-BURBUJA. [4].....	44
FIGURA 2.11 REPULSIÓN PRODUCIDA POR LA INTERACCIÓN ENTRE LAS CAPAS DE SURFACTANTE ADSORBIDO EN UNA PARTE Y DE LA OTRA DE LA PELÍCULA DELGADA. [4]	46
FIGURA 2.12 POTENCIAL DE FLUJO Y ELECTROVISCOSIDAD. [4]	46
FIGURA 2.13 MÉTODO ESTÁTICO DE ROSS-MILES. [5].....	47
FIGURA 2.14 MÉTODO DINÁMICO DE BIKERMAN. [1].....	49

FIGURA 2.15. CURVA DE ESTABILIDAD DE ESPUMAS. [1].....	50
FIGURA 2.16. MÉTODO MIXTO. [16].....	51
FIGURA 2.17 ESPUMABILIDAD CON ALCOHOLES ETOXILADOS (A LA CMC) EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE LA CADENA LIPÓFILA Y GRADO DE ETOXILACIÓN (EON DEL SURFACTANTE). [4].....	53
FIGURA 2.18 ESPUMABILIDAD (A LA CMC) DE UN ALQUIL BENCENO SULFONATO EN FUNCIÓN DEL ISÓMERO. [4].....	55
FIGURA 2.20 CRECIMIENTO TIPO CAMPANA. [18]	57
FIGURA 2.21 CRECIMIENTO PULSANTE. [18].....	57
FIGURA 2.22 CRECIMIENTO SIGMOIDE. [3].....	58
FIGURA 2.23 CRECIMIENTO CON FORMACIÓN DE TRENES DE ESPUMA. [21]	59
FIGURA 2.24 DECAIMIENTO EXPONENCIAL NEGATIVO. [18]	59
FIGURA 2.25 DECAIMIENTO ESCALONADO. [23]	60
FIGURA 2.26 DECAIMIENTO CUASI-RECTILÍNEO. [23].....	60
FIGURA 3.1 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL EQUIPO PILOTO PARA FORMACIÓN DE ESPUMA.	61
FIGURA 3.3 PIEDRAS DIFUSORAS UTILIZADAS EN EL QUIPO DE ESPUMEO: (A) PIEDRA CILÍNDRICA DE USO COMERCIAL, (B) PIEDRA ESFÉRICA CERTIFICADA.....	63
FIGURA 3. 4 REGÍMENES DE FORMACIÓN DE ESPUMA, (A) TIPO BIKERMAN, (B) TIPO CAMPANA, (C) TIPO PULSANTE, (D) TIPO SIGMOIDE.....	101
FIGURA 3. 5 REGÍMENES DE COLAPSO, (A) TIPO EXPONENCIAL NEGATIVO, (B) TIPO ESCALONADA, (C) TIPO CUASI RECTILINEO....	102
FIGURA 4. 1 EQUIPO ASTM-D 892 MODIFICADO, UTILIZADO PARA MEDIR ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMAS NO ACUOSAS.	107
FIGURA 4.2 ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA	

HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 1,0%, CON: (1) PIEDRA CILÍNDRICA Y (2) PIEDRA ESFÉRICA (80% ACEITE-20% KEROSÉN TEMPERATURA 30 °C CON UN FLUJO DE GAS DE 70 ML/S A 20 PSIA).	109
FIGURA 4.3 ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA VARIANDO RELACIÓN ACEITE-KEROSENE, CON SPAN 20 AL 0,5% (30 °C CON UN FLUJO DE GAS DE 70 ML/S A 20 PSIA).	110
FIGURA 4.4 ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA VARIANDO FLUJO DE GAS N ₂ , CON SPAN 20 AL 0,5% (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C, 20 PSIA).	111
FIGURA 4.5 ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA VARIANDO VOLUMEN INICIAL DE MEZCLA, CON SPAN 20 AL 0,5% (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30°C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S Y 20 PSIA).	112
FIGURA 4.6 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE SPAN 20(80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	114
FIGURA 4.7 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE SPAN 20(80% ACEITE-20% KEROSENE, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	115
FIGURA 4.8 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE SPAN 80 (80% ACEITE-20% KEROSÉN,30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	116
FIGURA 4.9 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE SPAN 80 (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	117

FIGURA 4.10 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE TWEEN 20 (80% ACEITE-20% KEROSEÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	118
FIGURA 4.11 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE TWEEN 20 (80% ACEITE-20% KEROSEÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	118
FIGURA 4.12 ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA, CON ADICIÓN DE DISTINTOS SURFACTANTES AL 0,25% (80% ACEITE-20% KEROSEÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	120
FIGURA 4.13 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN EL CORTE AGUA Y SPAN 20 AL 0,5% M/V (80% ACEITE-20% KEROSENE, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	121
FIGURA 4.14 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN EN EL CORTE AGUA Y SPAN 20 AL 0,5% M/V (80% ACEITE-20% KEROSENE, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	122
FIGURA 4.15 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN DE EACN Y SPAN 20 AL 0,5% M/V (30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	123
FIGURA 4.16 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN DE EACN, Y SPAN 20 AL 0,5% M/V (30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	124
FIGURA 4.17 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN DEL FLUJO DE N₂, Y SPAN 20 AL 0,5% M/V (80% ACEITE-20% KEROSEÉN, 30 °C, 20 PSIA).	125
FIGURA 4.18 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON VARIACIÓN DEL FLUJO DE N₂, Y SPAN 20 AL	

0,5% M/V (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C, 20 PSIA).....	126
FIGURA 4.19 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y ADICIÓN DE BENTONITA (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).....	128
FIGURA 4.20 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y ADICIÓN DE BENTONITA (80% ACEITE-20% KEROSENE, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	128
FIGURA 4.21 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y ADICIÓN DE CaCO_3 (80% ACEITE-20% KEROSENE, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).....	129
FIGURA 4.22 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y ADICIÓN DE CaCO_3 (80% ACEITE-20% KEROSENE, 30 °C, DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).....	130
FIGURA 4.23 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y ADICIÓN DE ASFALTENOS (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).....	131
FIGURA 4.24 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y ADICIÓN DE ASFALTENOS (80% ACEITE-20% KEROSENE, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).....	132
FIGURA 4.25 ESPUMABILIDAD EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y DISTINTOS TIPOS DE ALCOHOL AL 0,1 % V/V (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA). 133	
FIGURA 4.26 ESTABILIDAD DE ESPUMA EN MEZCLA HIDROCARBONADA CON SPAN 20 AL 0,5% Y DISTINTOS TIPOS DE ALCOHOL AL 0,1 % V/V (80% ACEITE-20% KEROSÉN, 30 °C, FLUJO DE GAS DE 70 ML/S, 20 PSIA).	134

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3. 1 DATOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, A DISTINTAS RELACIONES ACEITE-KEROSÉN. 65	
TABLA 3. 1 DATOS DE LAS PRUEBAS PREKIMINARES DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, A DISTINTAS RELACIONES ACEITE-KEROSÉN. (CONTINUACIÓN).....	66
TABLA 3.2 DATOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDRACARBONADA, CON DIFERENTES VOLÚMENES DE MUESTRA. 67	
TABLA 3.2 DATOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON DIFERENTES VOLÚMENES DE MUESTRA (CONTINUACIÓN).....	68
TABLA 3.3 DATOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON DISTINTOS FLUJOS DE GAS N ₂	70
TABLA 3.3 DATOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON DISTINTOS FLUJOS DE GAS N ₂ (CONTINUACIÓN).....	71
TABLA 3.3 DATOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON DISTINTOS FLUJOS DE GAS N ₂ (CONTINUACIÓN).....	72
TABLA 3.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS	

SURFACTANTES UTILIZADOS.....	75
TABLA 3.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS SURFACTANTES EMPLEADOS (CONTINUACIÓN).....	75
TABLA 3. 5 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON ADICIÓN DE SPAN 20.....	75
TABLA 3. 5 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON ADICIÓN DE SPAN 20 (CONTINUACIÓN).....	76
TABLA 3. 6 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON ADICIÓN DE SPAN 80.....	77
TABLA 3. 6 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON ADICION DE SPAN 80 (CONTINUACIÓN).....	77
TABLA 3. 7 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON ADICIÓN DE TWEEN 20.....	78
TABLA 3. 7 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON ADICIÓN DE TWEEN 20 (CONTINUACIÓN).....	79
TABLA 3. 8 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 %, A DISTINTAS CONCENTRACIONES DE AGUA EN EL SISTEMA.....	80
TABLA 3. 8 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 %, A DISTINTAS CONCENTRACIONES DE AGUA EN EL SISTEMA (CONTINUACIÓN).....	81
TABLA 3. 9 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD	

DE ESPUMA PARA SISTEMAS ACEITE – KEROSENE, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y VARIACIÓN DE EACN.	82
TABLA 3. 9 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA SISTEMAS ACEITE – KEROSENE, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y VARIACIÓN DE EACN (CONTINUACIÓN).	84
TABLA 3. 10 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, A DISTINTOS CAUDALES DE INYECCIÓN DE GAS N ₂	85
TABLA 3. 10 DATOS DE PRUEBA DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LA MEZCLA HIDROCARBONADA, A DISTINTOS CAUDALES DE INYECCIÓN DE N ₂ (CONTINUACIÓN).	86
TABLA 3.11 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SÓLIDOS HIDROFÍLICOS EN ESTUDIO.	88
TABLA 3.12 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE BENTONITA EN DISTINTAS CANTIDADES.	89
TABLA 3.12 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE BENTONITA EN DISTINTAS CANTIDADES (CONTINUACIÓN).....	89
TABLA 3.12 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE BENTONITA EN DISTINTAS CANTIDADES (CONTINUACIÓN).....	90
TABLA 3.12 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE BENTONITA EN DISTINTAS CANTIDADES (CONTINUACIÓN).....	92
TABLA 3.13 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y	

ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE CaCO_3 EN DISTINTAS CANTIDADES.	92
TABLA 3.13 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE CaCO_3 EN DISTINTAS CANTIDADES (CONTINUACIÓN).	93
TABLA 3.13 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICION DE CaCO_3 EN DISTINTAS CANTIDADES (CONTINUACIÓN).	94
TABLA 3.14 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE ASFALTENOS EN DISTINTAS CANTIDADES (CONTINUACIÓN).	96
TABLA 3.14 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA LA MEZCLA HIDROCARBONADA, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y ADICIÓN DE ASFALTENOS EN DISTINTAS CANTIDADES (CONTINUACIÓN).	97
TABLA 3. 15 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA SISTEMA ACEITE – KEROSENE, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y DISTINTOS TIPOS DE ALCOHOL AL 0,1 %.	98
TABLA 3. 15 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA SISTEMA ACEITE – KEROSENE, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y DISTINTOS TIPOS DE ALCOHOL AL 0,1 % (CONTINUACIÓN).....	99
TABLA 3. 15 DATOS DE PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMA PARA SISTEMA ACEITE – KEROSENE, CON SPAN 20 AL 0,5 % Y DISTINTOS TIPOS DE ALCOHOL AL 0,1 %	

(CONTINUACIÓN).....	100
TABLA A.1 CONVERSIÓN DE EACN DE DISTINTAS MEZCLAS HIDROCARBONADAS.	145

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema.

En el mundo petrolero existen distintas operaciones, en las cuales se puede apreciar la aparición de dispersiones de gas en el petróleo, denominadas espumas.

Las espumas que se forman tanto en separadores trifásicos como en cada uno de los equipos de tratamiento del petróleo son indeseables, ya que pueden traer consecuencias negativas para su funcionamiento. Sin embargo, la formación y persistencia de estas espumas no acuosas puede representar un fenómeno favorable, por ejemplo, en la producción de petróleo pesado por el método “*foamy gas drive*”, aplicado en los reservorios de Canadá, para la recuperación adicional por arrastre de líquido en las interfaces de esta dispersión gaseosa.

Existen investigaciones extensas sobre el comportamiento de las espumas y las distintas variables involucradas en su formación, maduración y colapso, que permiten establecer parámetros de formulación. Pero, la mayoría de estas investigaciones están dirigidas al caso de espumas donde la fase externa es acuosa y por lo tanto, los mecanismos de estabilidad (principalmente el efecto Gibbs- Marangoni) que justifican la persistencia en el tiempo, tienen su base en la diferencia de polaridad de las fases que intervienen.

En el caso de las espumas de hidrocarburos, las fases presentan una polaridad muy baja, con mecanismos totalmente distintos y hasta ahora

desconocidos. Los problemas en la formación de estas espumas, son resueltos de manera empírica, o en otros casos con la simple adición de un surfactante no iónico de bajo HLB para incrementar la espumabilidad.

Estudios exploratorios, definen la viscosidad como el principal factor de estabilidad de las espumas aceitosas, [1,2,3] pero estos estudios se refieren a sistemas muy particulares donde no se registra efecto de variables de formulación fisicoquímica.

Como consecuencia del desconocimiento de las variables que intervienen en los procesos y en la vida de las espumas no acuosas, se hace necesario realizar una investigación para estudiar variables como: fracción de agua en el petróleo, tipo de surfactante (según estructura y cadena lipofílica), concentración del surfactante, flujo de gas, viscosidad y alcoholes como cosurfactantes.

La realización de este proyecto permitió establecer parámetros para la formulación de espumas no acuosas, incluyendo para un mismo sistema un amplio rango de variables. Se utilizó un sistema sintético parafínico que permitió separar la acción de cada una de las variables, y a la vez la comprobación de tales efectos. Como espumante se usaron surfactantes no iónicos del tipo Sorbitan Ester (Span-20, Span-80 y Tween-20).

La investigación se realizará en las instalaciones del laboratorio "Sistemas Dispersos y Ambiente" (SDA-UDO), del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar el efecto de las variables de formulación (alcoholes, relación agua-aceite, EACN, surfactantes) y flujomecánicas (flujo de gas, viscosidad del aceite) en la formación y colapso de espumas de hidrocarburos.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Realizar pruebas exploratorias para la calibración del equipo de espumas.
2. Efectuar formulaciones de espumas de hidrocarburos, variando la concentración y tipo de surfactante, relación agua-aceite, el EACN (Número de Alcano Equivalente del Aceite y/o crudo), el flujo de gas y la viscosidad del aceite (por adición de sólidos).
3. Interpretar el rol de los alcoholes en la estabilidad de una espuma no acuosa, cambiando el tipo de alcohol.
4. Comparar los diferentes regímenes de formación y colapso de las espumas no acuosas formuladas.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La aplicación de las espumas se ha extendido a campos de gran importancia como el alimenticio o el petrolero, por lo que el estudio de sus propiedades y distintas variables de formulación son de gran interés. Las espumas más comunes y las más estudiadas son las espumas acuosas. Salager y col. [4] explicaron que las etapas en la vida de una espuma son: formación, maduración y colapso. En su trabajo presentan las reglas para seleccionar los surfactantes y los aditivos espumantes o antiespumantes, así como las condiciones para la formación de espumas. De igual manera, describen los fenómenos cinéticos de adsorción de los surfactantes en la interface agua-aire.

Denkov y col. [5] estudiaron el efecto de las gotas de aceite y de partículas de diferentes naturalezas sobre la estabilidad de una espuma acuosa y concluyeron que la ruptura de la película se debe a un proceso que ocurre en tres etapas, una de las cuales es la inserción de las gotas de aceite (o de las partículas) en forma de puente, y su eventual estiramiento en la superficie. También observaron que este fenómeno está influenciado por partículas adheridas a la superficie de dichas gotas, lo cual depende del tamaño y distribución de tamaño de las gotas de aceite o de las partículas.

Sheng [6] realizó estudios experimentales de crudos espumosos generando espuma mediante la liberación de gas disuelto, en una celda a elevada presión, demostrando que la estabilidad de las espumas aumenta con los siguientes parámetros: viscosidad del crudo, contenido de gas

disuelto, altura de la columna de crudo y con la velocidad de despresurización del gas. Además, observó que la calidad de las espumas no acuosas formadas es menor que la calidad de las espumas acuosas.

Anderéz [1] determinó que la espumabilidad y la estabilidad de espumas no acuosas de parafinas se ven influenciadas por la presencia de surfactantes de diferentes estructuras moleculares. Encontró que el surfactante que produce una mejor espumabilidad y mayor estabilidad de espumas de parafinas es el Span-20 (Monolaurato de Sorbitol de HLB 8,6). Por otra parte, estudió la influencia del incremento de sólidos suspendidos y del porcentaje de agua en la mezcla de hidrocarburos, encontrando que ambos aumentan considerablemente la espumabilidad de los sistemas no acuosos estudiados.

Belandria [2] estudió el efecto de diferentes partículas en la espumabilidad y estabilidad de sistemas no acuosos, con la intención de comprender el mecanismo de producción de crudos extra-pesados por espumeo. Para ello, empleó aceites minerales y sólidos comúnmente usados en elaboración de fluidos de perforación como: carbonato de calcio, barita, bentonita, entre otros. Observó que tanto el fenómeno de espumabilidad como el de estabilidad de las espumas formadas de aceites minerales son sensibles a la presencia de estas partículas.

Arandia [7] complementó el estudio de Belandria, estudiando el efecto de la presencia de asfaltenos sobre las espumas no acuosas de mezclas de hidrocarburos, obteniendo que los asfaltenos favorecen la estabilización de estas espumas.

Más recientemente, Alcalá [3] realizó estudios en la formulación de agentes antiespumantes para espumas no acuosas. Trabajó con un sistema formado por un crudo mediano el Furrial, CO₂ y pequeñas cantidades de agua. Encontró que el Molaurato de Sorbitan, pueden ser usado tanto como espumante, como antiespumante según la concentración utilizada. De igual manera, encontró que pequeñas porciones o aumentos en la fracción de agua son capaces de aumentar considerablemente la espumabilidad de un sistema crudo-CO₂-agua. Finalmente, modificando la temperatura y la cantidad de sólidos del sistema, concluyó que la viscosidad juega un papel fundamental en la estabilidad de las espumas no acuosas.

En el estado de arte de espumas no acuosas, existe poca investigación al respecto, especialmente aquella espuma formada con petróleo, es por eso el interés y originalidad de este trabajo.

2.2. Anfífilos, surfactantes y tensoactivos

La palabra anfífilo fue construida hace más de 30 años por Paul Winsor a partir de dos raíces griegas. Por una parte, el prefijo “*amphi*” que significa doble o alrededor, y la raíz “*philos*” que denota amistad o afinidad. Una sustancia anfífila posee una doble afinidad, que se define desde el punto de vista fisicoquímico como una dualidad polar-apolar. [8]

La molécula típica de un anfífilo se divide en dos partes: un grupo polar que contiene heteroátomos como O, S, N ó P, los cuales se encuentran en grupos funcionales como alcohol, tiol, éter, éster, ácido, sulfato, sulfonato, fosfato, amina, amida, etc., y un grupo apolar o poco polar compuesto, en general, por un hidrocarburo parafínico, cicloparafínico o aromático.

La parte polar (H del anfífilo) tiene afinidad por los solventes polares, y se denomina hidrofílica o hidrófila, mientras que la parte apolar (L) posee afinidad para solventes orgánicos, y le corresponde el calificativo de lipofílico o hidrófobo [8,9]. La figura 2.1 muestra la estructura genérica de una molécula anfífila.



Figura 2.1 Representación genérica de una molécula de asfalteno.

Debido a su doble afinidad, una molécula anfífila “no se siente cómoda” ni en solvente polar, ni en solvente orgánico. Es por esto, que para satisfacer ambas afinidades, las moléculas de anfífilo tienden a migrar a la interfase, de tal forma, que su grupo polar se encuentre dentro del agua (o en solvente polar) y el grupo apolar orientado hacia el solvente orgánico o bien fuera del solvente polar. Dichas condiciones ocurren solamente en la frontera de las dos fases, es decir en la superficie o interfase. Por lo general, se llama superficie a la frontera entre una fase condensada (un líquido o un sólido) y una fase no condensada (un gas), y una interfase a la frontera entre dos fases condensadas (dos líquidos o un líquido y un sólido).

Los ingleses utilizan la palabra “*surfactant*” (de la contracción de las palabras inglesas *surface-active substances*) para denotar una sustancia anfífila que posee actividad interfacial o superficial. Es importante resaltar, que no todos los anfífilos poseen tal actividad, para que esto suceda es

necesario que la molécula posea propiedades relativamente equilibradas, es decir, que no sea ni demasiado hidrófila ni demasiado hidrófoba.

La palabra “*surfactant*” no tiene traducción al español, lengua en la cual se usa el término “tensoactivo” que se refiere a una actividad o acción sobre la tensión superficial o interfacial. Este término es equivalente a surfactante sólo si se supone que la actividad superficial o interfacial se traduce necesariamente por un descenso de la tensión, lo cual es verdad en la mayor parte de los casos que tienen interés práctico.

En general, el término tensoactivo se refiere a una propiedad de la sustancia. Los anfífilos tienen otras propiedades y se les califica según sus aplicaciones como: jabones, detergentes, dispersantes, emulsionantes, espumantes, desemulsionantes, humectantes bactericidas, inhibidores de corrosión, antiestático, etc., o como una estructura de tipo membrana, microemulsión, cristal líquido, liposomas o gel. [8,9]

2.2.1 Clasificación de los Surfactantes

Los surfactantes pueden clasificarse en función de sus propiedades particulares, según su aplicación en: jabón, detergente, espumante, dispersante, etc. Sin embargo, esta clasificación no es satisfactoria, ya que se observa que muchos surfactantes poseen varias de estas propiedades a la vez. Se prefiere clasificarlos de acuerdo a la estructura de su molécula, o más exactamente, según la forma de disociación en el agua en:

- a) **Surfactantes aniónicos:** son aquellos que en solución acuosa, se disocian en un anión anfífilo y un catión metálico o amonio. Corresponden a más del 60% de la producción de surfactantes:

jabones, detergentes en polvo y líquido, espumantes, sulfonatos de petróleo, etc. [10]. En la figura 2.2 se muestra la fórmula de un surfactante aniónico muy utilizado en champúes y productos para lavar, como es el dodecil sulfato de sodio.

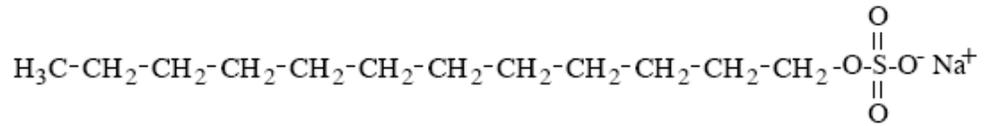
- b) **Surfactantes catiónicos:** son aquellos que se disocian en un catión anfífilo y un anión generalmente de tipo halogenado. Estos surfactantes se usan solamente en aplicaciones especiales donde la carga positiva del anfífilo produce ventajas como enjuagues o emulsiones asfálticas. En general, no son buenos detergentes y tampoco buenos espumantes, con excepción de los óxidos de amina en su forma cuaternizada a pH ácido. No se usan en formulaciones con surfactantes aniónicos, ya que no son compatibles con éstos (forman compuestos insolubles). Sin embargo, tienen dos propiedades importantes y casi únicas: primero se absorben sobre sustratos cargados negativamente, y segundo tienen propiedades bactericidas, en esta categoría están las aminas y amonios de cadena lineal, alquil amonios en heterociclos saturados e insaturados, entre otros. [11]
- c) **Surfactantes no iónicos:** estos surfactantes no producen iones en solución acuosa, ya que su parte hidrofílica está formada por grupos polares no ionizados como: alcohol, tiol, éter o éster, y por lo tanto, son compatibles con los demás tipos de surfactantes y pueden integrarse en formulaciones complejas. Por otra parte, son menos sensibles que los surfactantes iónicos a la presencia de electrolitos, especialmente cationes divalentes. Ejemplos de estos surfactantes son: alcoholes lineales etoxilados, alquil fenoles etoxilados, ésteres de ácidos grasos, derivados de aminas y amidas. Entre sus aplicaciones: buenos detergentes, humectantes y emulsionantes, espumantes. Por todas

estas propiedades, se encuentran hoy en día en todos los tipos de formulaciones detergentes líquido o en polvo, y en otras aplicaciones. [12,13]

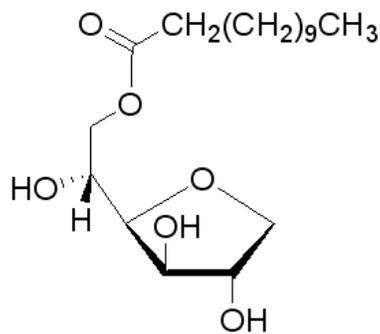
- d) **Surfactantes anfóteros:** tienen dos grupos funcionales: uno aniónico y otro catiónico. Según el pH, una de las dos disociaciones domina (aniónico a pH básico y catiónico a pH ácido). Cerca del punto isoeléctrico presentan una mínima actividad superficial y de acuerdo al pH, pueden presentar adsorción sobre superficies con cargas positivas o negativas. Son compatibles con los demás tipos de surfactantes y se usan en formulaciones no tóxicas ni irritantes. [12]

- e) **Surfactantes siliconados:** son surfactantes que contienen grupos de organo silicona, los cuales aumentan el carácter hidrófobo de éste. Como consecuencia se puede fabricar una “cola” lipofílica siliconada más corta que su equivalente hidrocarbonado. Se consiguen prácticamente todos los equivalentes siliconados reemplazando varios átomos de carbono por uno de silicio, como se muestra en la figura 2.2. Entre las aplicaciones de estos surfactantes es su uso como agentes antifatulentos (rebajan la tensión superficial y son totalmente inertes desde el punto de vista biológico), lubricantes, antiespumantes, entre otros. [8]

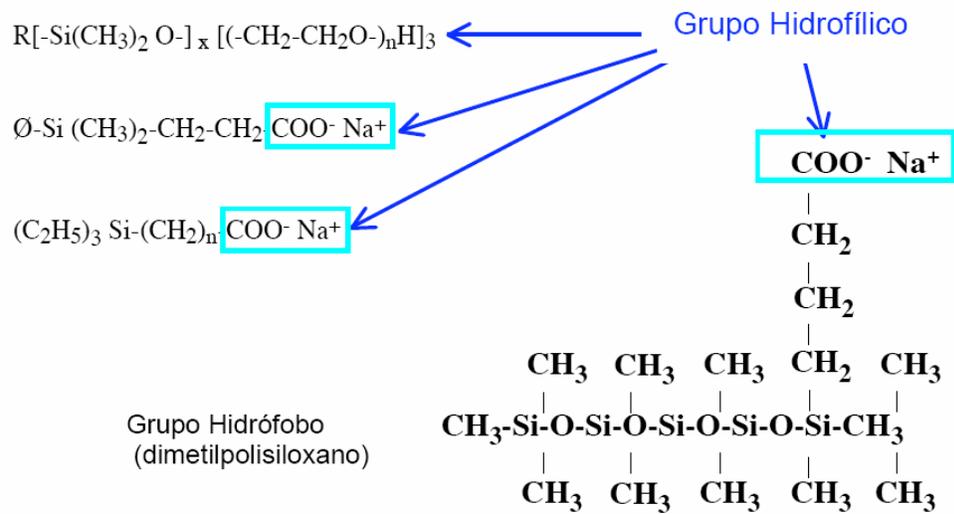
- f) **Otros surfactantes:** en esta categoría están los surfactantes poliméricos como el carboximetil-celulosa (conocido como CMC), los polímeros de asociación como los fosfolípidos (los cuales forman las paredes celulares de animales y vegetales), los fluorados como los carboxilatos y sulfonatos perfluorados (con usos especiales en espumas contra incendios).



Surfactante aniónico: Dodecil sulfato de sodio (DSS)



Surfactante no iónico: Monolaurato de Sorbitan (Span 20)



Surfactantes siliconados

Figura 2.1 Algunos tipos de surfactantes. [8]

2.2.2 Propiedades fundamentales de los surfactantes

Además de su carácter anfífilo, los surfactantes poseen dos propiedades fundamentales, de las cuales provienen sus demás propiedades y usos, las cuales son su capacidad de adsorberse a una interfase y su tendencia a asociarse para formar estructuras organizadas. [14] A continuación se describen estas propiedades:

- a) **Adsorción:** la adsorción de un surfactante en una superficie gas-líquido o en una interfase líquido-líquido, produce una reducción de la tensión superficial o interfacial. La tensión es responsable de la curvatura de las interfases, de la formación de gotas, de un gran número de inestabilidades capilares y de estabilización de interfases. El descenso de la tensión favorece la deformación y la ruptura de una interfase, la formación de sistemas dispersos como las emulsiones o las espumas, la movilización del petróleo residual, la limpieza industrial, entre otros. En la figura 2.3 se muestra la adsorción de la molécula en la superficie o interfase.

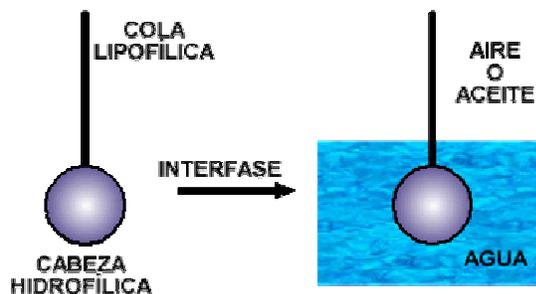


Figura 2.2 Adsorción de una molécula de surfactante en una interfase.

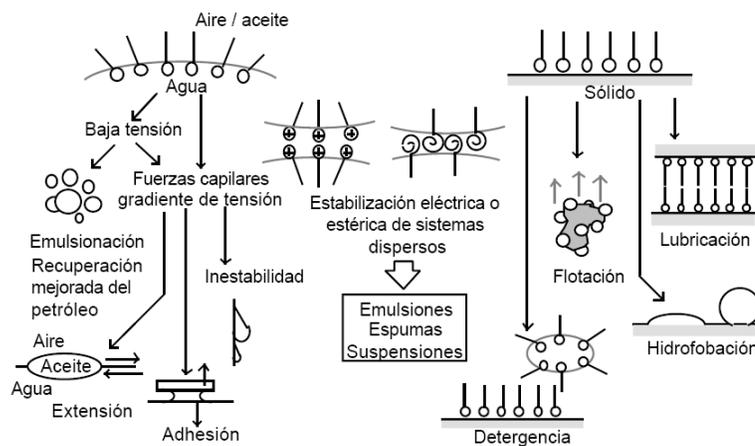


Figura 2.3 Fenómenos relacionados a la adsorción de un surfactante.

[14]

- b) **Asociación:** las primeras moléculas de surfactante presentes en una solución tienen una fuerte tendencia a migrar hacia una interfase y adsorberse en ella debido al efecto hidrófobo, es decir, la sustracción de la cola apolar (hidrocarbonada) del medio acuoso. La formación de una monocapa más o menos densa de surfactante en una interfase es la primera manifestación de la tendencia a asociarse. Cuando la concentración de surfactante aumenta en la fase acuosa, se produce rápidamente la saturación del área interfacial, y como consecuencia, el número de moléculas disueltas tiende a aumentar. A partir de cierta concentración, llamada *Concentración Micelar Crítica* (CMC), el surfactante produce estructuras poliméricas de asociación llamadas micelas, como se muestra en la figura 2.5. Las micelas son a menudo esféricas, y contienen varias decenas de moléculas (100 a 500), orientadas de tal forma que la parte apolar del surfactante se sustraiga del ambiente acuoso. [13]

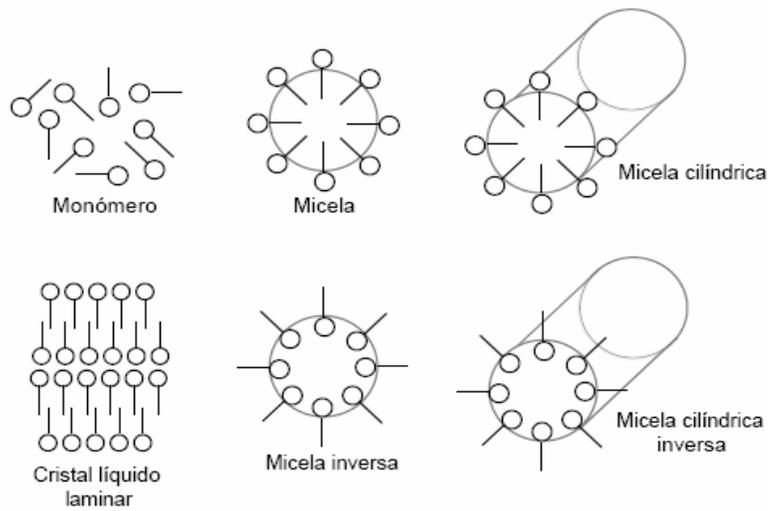


Figura 2.4 Diferentes estructuras por la asociación de surfactantes. [13]

2.3. Espumas

Una espuma es una dispersión de un gas en una cantidad relativamente pequeña de líquido. [15] La fase gaseosa (fase dispersa) se esparce a lo largo de toda la fase líquida (fase continua) de manera que las burbujas de gas quedan separadas por finas películas de líquido, las cuales determinan la estabilidad global de la espuma. Estas dispersión contiene agentes estabilizantes, por lo general surfactantes, llamados agentes espumantes.

Las espumas no acuosas presentan gran cantidad de líquido (espumas líquidas), formadas por aceites o hidrocarburos que le confieren viscosidad. Generalmente, las burbujas presentan forma esférica. [15]

2.3.1 Formación de una espuma

Las espumas pueden formarse mediante tres principios:

- a) **Trabajo mecánico:** es la energía en forma de agitación o burbujeo de gas para incrementar el área interfacial entre el gas y el líquido, y al mismo tiempo, para que las moléculas del agente espumante ocupen el área formada (empuje de Arquímedes).
- b) **Presencia de agente espumante:** es un compuesto surfactante que se ubica en la interfase gas-líquido, provocando una disminución en la tensión superficial del líquido a espumar.
- c) **Velocidad de formación de las burbujas > velocidad de colapso:** de esta manera la espuma aumente su volumen a medida que transcurre el tiempo.

Se tienen varias situaciones para la aparición de una espuma. Primero, podría deberse a la desorción de un gas que estuvo anteriormente disuelto en un líquido, o por el uso de difusores de gas dentro del líquido con agitación, o finalmente por oclusión de un líquido entre otro.

En todos los casos, se forman burbujas en el líquido y éstas suben hasta la superficie a una velocidad que depende de su tamaño, de la viscosidad del líquido y de la diferencia de densidades entre el líquido y el gas. La espuma se forma al acumularse las burbujas sin romperse, por lo cual es preciso que la velocidad de formación de las burbujas sea mayor a la velocidad de colapso de las mismas. [16]

Para completar el proceso de formación de una espuma es necesaria la presencia de un surfactante que reduzca la tensión superficial en la película de líquido, haciéndola más elástica. Este fenómeno se puede explicar de manera sencilla por dos efectos:

- a) **Efecto Gibbs:** cuando se estira la película líquida que recubre la burbuja de gas, decrece la concentración de surfactante presente, haciendo que la tensión superficial aumente; esto ocasiona un diferencial de presión entre la película delgada y la interfase. Este gradiente de presión logra que el líquido se dirija hacia la película que se adelgaza, haciendo que se vuelva a engrosar y evitando su ruptura, como se muestra en la figura 2.6.

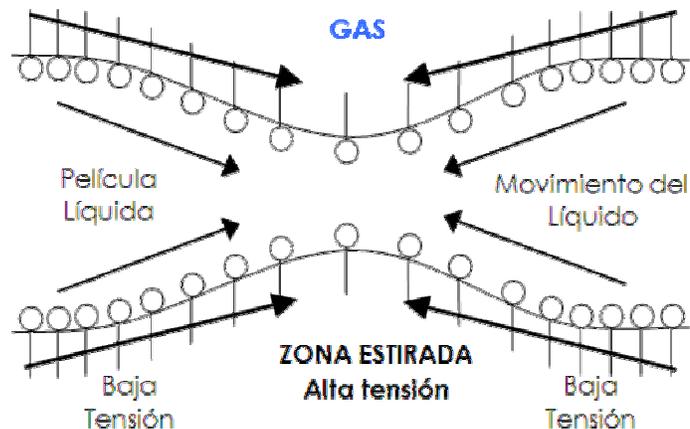


Figura 2.5 Estiramiento de una película por efecto Gibbs. [16]

- b) **Efecto Marangoni:** cuando se tiende a estirar la película líquida, disminuye la concentración de surfactante en la superficie, entonces ocurre un desequilibrio que ocasiona una migración de moléculas surfactantes (desde las micelas) hacia la superficie de la burbuja de

gas, [16] como se muestra en la figura 2.7. El efecto Marangoni sólo tiene importancia relevante en soluciones diluidas y en un cierto margen de concentraciones. Si la solución es muy diluida, su tensión superficial es muy similar a la del solvente puro, entonces la diferencia entre la tensión superficial del solvente puro y la tensión de equilibrio de la solución es pequeña. Esto permite que la espuma pueda resistir las interacciones térmicas y mecánicas a las que se someta. [1]

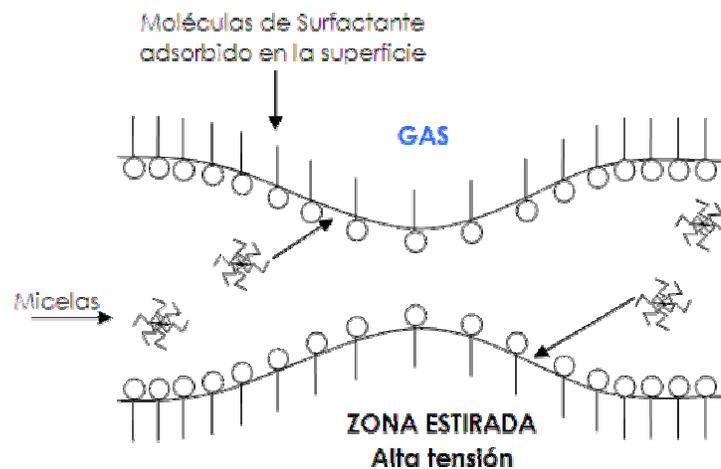


Figura 2.6 Efecto Marangoni. [16]

2.3.2 Espumabilidad y Estabilidad de una Espuma

La espumabilidad es la medida del máximo volumen de espuma producido al aplicar una cantidad de trabajo sobre la solución de surfactante. El volumen de espuma producido depende de la tensión superficial de la solución. Al parecer, mientras menor es la tensión superficial de la solución mayor es el volumen de espuma obtenido en sistemas que emplean el mismo mecanismo de agitación. [19]

La estabilidad de una espuma se define por el tiempo que ésta tarda desde el inicio del colapso hasta que la espuma colapsa totalmente. Se refiere al envejecimiento de la espuma, durante el cual ocurren una serie de mecanismos de decaimiento de la espuma ya formada, los que incluyen la difusión gaseosa, drenaje gravitacional del líquido y succión capilar de las películas en los bordes de Plateau.

La estabilidad depende de los fenómenos de decaimiento de la espuma y colapso de burbujas, y es por lo tanto, una medida del tiempo en el cual la espuma persiste o de la velocidad con que disminuye su altura. [1]

2.3.3 Factores que influyen en la formación de las espumas

- a) **Presión de vapor y tensión superficial:** los líquidos puros con baja tensión superficial están limitados por su punto de ebullición debido a que tienen una elevada presión de vapor. Esto implica que las delgadas películas que confinan las burbujas de gas se evaporen con mayor facilidad, dando como resultado una espuma poco estable. Por otra parte, cuando los líquidos tienen baja presión de vapor, sus tensiones superficiales son muy elevadas, lo que impide la formación de espumas. [17]

- b) **Eficiencia del Agente Espumante:** la eficiencia de un surfactante como agente espumante se relaciona con la concentración del mismo en la solución a espumar. El volumen de la espuma aumenta con la concentración de surfactante cuando se trabaja por debajo de su *Concentración Micelar Crítica* (CMC). En la zona cercana y por encima de la CMC se obtiene el mayor volumen de espuma, pero cuando la

concentración es muy superior a la CMC la adsorción del surfactante desde el líquido hacia la zona estirada no modifica la concentración molecular del surfactante debido a que las micelas se fragmentan para restablecer el equilibrio; en consecuencia, la adsorción procede y reduce rápidamente el gradiente de tensión, desfavoreciendo la estabilización de la espuma [16]. La CMC de un surfactante puede interpretarse como una medida de su eficiencia como agente espumante, ya que, cuanto menor sea la CMC mayor eficiencia suele tener el surfactante como agente espumante. [16]

- c) **Efectividad del Agente Espumante:** la efectividad de un tensoactivo como agente espumante aparentemente depende de su capacidad para reducir la tensión superficial de la solución y de la magnitud de las fuerzas de cohesión intermolecular. El volumen de espuma producido al aplicar un flujo de gas sobre una solución que contiene surfactante depende de la tensión superficial de la solución, ya que a menor tensión superficial mayor es el volumen de espuma producido con el mismo tamaño promedio de burbuja e igual flujo de gas aplicado a las mismas condiciones de espumeo. [16,19] Puede esperarse que los surfactantes que difunden rápidamente a la interfase produzcan grandes volúmenes de espuma al inicio, pero también es muy importante su estabilidad en el tiempo, lo que requiere una película interburbuja elástica que resista las deformaciones, esto se produce cuando hay suficiente cohesión intermolecular entre las moléculas de surfactante adsorbidas a la superficie.

Shorter [17] relaciona la espumabilidad de un líquido con la existencia de una película superficial formada por un surfactante, esta relación fue estudiada teóricamente a través de consideraciones termodinámicas,

comprobándose que al añadir soluto que disminuye la tensión superficial del solvente, éste existe en mayor concentración en la capa superficial que en la solución.

Analizando la estructura de la capa límite entre fases (película de Gibbs) se consideran dos casos extremos: cuando la concentración de surfactante es infinitamente pequeña, la película de Gibbs está formada principalmente por solvente, y cuando la concentración de surfactante es infinitamente grande, la película está compuesta principalmente por surfactante.

En estos casos, donde la capa límite es prácticamente homogénea, no ocurre formación de espuma. Por el contrario, cuando la película es heterogénea (dos o más tipos de moléculas) se facilita la formación de espuma. La espumabilidad en soluciones muy concentradas o diluidas es muy pequeña, ya que en las primeras predomina el surfactante, y en las segundas predomina el solvente, concluyendo entonces que se presenta espumabilidad cuando la capa límite es heterogénea. [17]

2.3.4 Mecanismos y Causas del Colapso de las Espumas

- a) **Evaporación:** la evaporación está asociada a la pérdida de líquido debido al paso de éste al estado gaseoso, lo que hace que la espuma se seque cada vez más, y al disminuir la cantidad relativa de líquido con respecto a la de gas, las películas tienen un espesor cada vez menor. Este mecanismo de decaimiento de las espumas puede ser fácilmente controlado si se cierra el recipiente en el cual se encuentra la espuma. Existen algunos factores que actúan directamente sobre este mecanismo afectando la velocidad de evaporación, como es el caso de

la temperatura, la presión y la humedad relativa del ambiente, entre otros.

- b) **Drenaje de líquido:** este tipo de mecanismo de colapso de las burbujas se debe a la acción de la gravedad y a la tensión superficial, y está basado en el hecho de que el espesor de las películas interburbujas decrece hasta que las burbujas alcanzan un espesor crítico y se rompen espontáneamente. Este fenómeno está directamente relacionado con la viscosidad del líquido, propiedad que determina la rapidez del drenaje del líquido. Después que ocurre el fenómeno de drenaje de la película por acción de las fuerzas gravitacionales, comienza a ocurrir el llamado drenaje por diferencia de presión o por succión capilar, evidenciando los bordes de Plateau. [18]

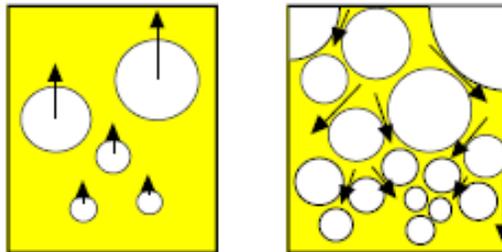


Figura 2.7 Segregación de burbujas y drenaje de líquido en espuma húmeda. [4]

- c) **Succión capilar:** La proporción de líquido presente en la espuma disminuye rápidamente debido al drenaje del líquido hacia abajo, antes que nada por simple acción de la gravedad sobre el líquido que se encuentra en las burbujas, luego por fenómenos más complejos cuando las burbujas pierden su forma esférica para devenir poliédricas. En éste momento el contenido de líquido no excede al 10% y continua

disminuyendo ya que la diferencia de curvatura entre los bordes de Plateau (figura 2.9) y la parte plana de las películas según la ley de Laplace, producen un gradiente de presión. Esta es la fuerza motriz que desplaza el líquido del centro de las películas hacia los bordes de Plateau, gracias a un mecanismo llamado succión capilar. Este líquido es drenado por la gravedad hacia la parte inferior de la espuma en los bordes de Plateau. La espuma puede entonces comenzar a degradarse por ruptura de las películas relativamente delgadas (algunos micrómetros o de menor espesor), en particular si las condiciones favorables al efecto Gibbs Marangoni no son satisfechas, o si no existen mecanismos de estabilización de perturbaciones de la película intraburbuja. De todas maneras, la ruptura de las películas no se producen necesariamente durante esta segunda etapa y la espuma puede persistir y continuar su evolución lentamente. [4]

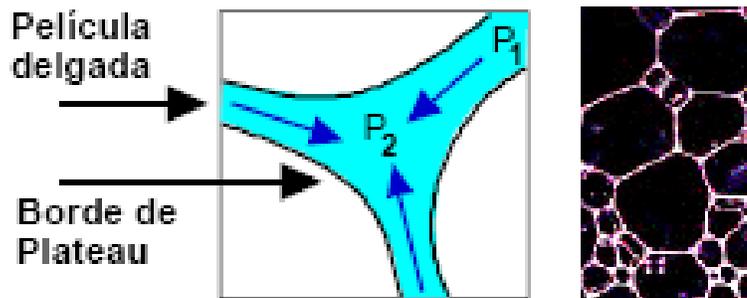


Figura 2.8 Succión capilar del líquido del centro de la película hasta los bordes de Plateau.[4]

- d) **Difusión de gas entre burbujas:** este fenómeno tiene importancia entre burbujas vecinas, sobre todo de diferentes tamaños, y se debe a que las burbujas de acuerdo a su tamaño tienen presiones diferentes, siendo las mas pequeñas las de mayor presión; [16] por lo que el cual

se difunde desde las burbujas más pequeñas hacia las más grandes, como se muestra en las figuras 2.10 y 2.11. Esto explica que al principio del proceso de espumeo existan espumas pequeñas y medianas, las cuales aumentarán de tamaño a medida que envejece la espuma.

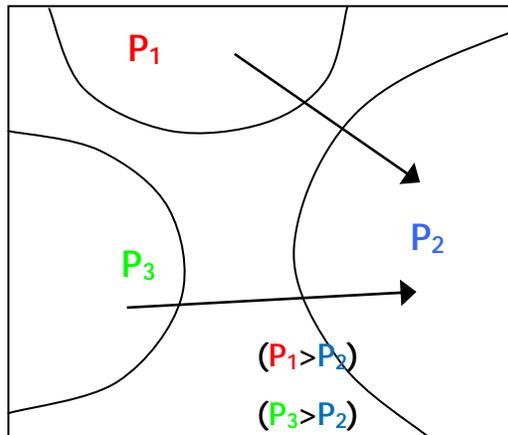


Figura 2.9 Difusión de gas entre burbujas. [16]

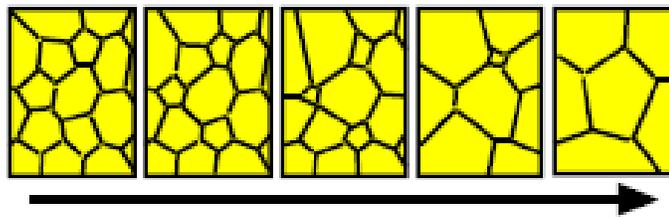


Figura 2.10 Evolución de una espuma por difusión gaseosa intra-burbuja. [4]

- e) **Rompimiento de películas:** Al romperse la película de líquido que separa dos burbujas de gas se produce la coalescencia de las mismas, por lo tanto, la ruptura de estas películas es un aspecto fundamental en lo referente a la estabilidad de espumas. Además de los mecanismos

anteriores, un factor que influye considerablemente es la elasticidad de la película, es decir, su habilidad de resistir adelgazamientos locales excesivos como los que ocurren en los primeros instantes de formación de la espuma.

- f) **Interacciones coloidales:** la presencia de electrolito, en particular polivalente, tiende a reducir la longitud de Debye (doble capa eléctrica) y por tanto, a reducir la distancia a la cual la repulsión electrostática es suficiente para evitar el acercamiento de las superficies. En consecuencia, la presencia de un electrolito tiende eventualmente a acelerar el drenaje de la película intraburbuja. Existen otros tipos de repulsiones, en particular la repulsión estérica entre las cadenas poliéter de los surfactantes no iónicos o entre las partes hidrófilas de polímeros adsorbidos. Los dos tipos de repulsiones pueden producirse simultáneamente con polielectrolitos, los cuales también juegan un papel viscosante en el líquido. En la figura 2.12 se muestra la interacción entre capas de surfactantes en la interfase de dos burbujas.
- g) **Fenómenos electrocinéticos:** La presencia de una doble capa eléctrica produce uno de los efectos electrocinéticos, en el que el desplazamiento del líquido arrastra los contraiones que se encuentran en la capa difusa sin afectar los iones adsorbidos del surfactante (de signo contrario), como se muestra en la figura 2.13. Esto provoca una deslocalización de carga que induce un potencial, llamado potencial de flujo, el cual ejerce una fuerza sobre los iones desplazados para regresarlos a su posición y en consecuencia en las moléculas de líquido asociadas a estos iones. Como corolario, el líquido no se desplaza así de fácil como lo prevén las leyes hidrodinámicas y todo pasa como si estuviese más viscoso, de allí la denominación

electroviscosidad. [4]

- Repulsiones (fenómenos estáticos): El primer tipo de fenómeno estático corresponde a diversos tipos de repulsión entre las superficies (figura 2.12). Aquella que actúa a mayor distancia es la repulsión eléctrica debida al movimiento de las capas disponibles de las dobles capas eléctricas producidas por la adsorción de surfactantes iónicos.

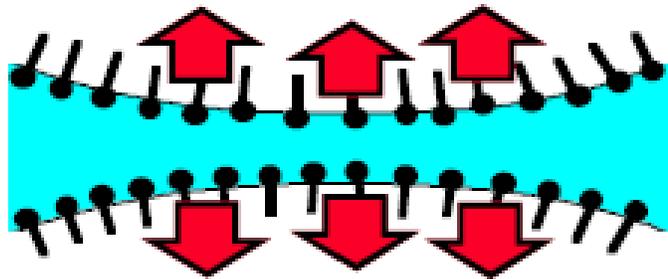


Figura 2.11 Repulsión producida por la interacción entre las capas de surfactante adsorbido en una parte y de la otra de la película delgada. [4]

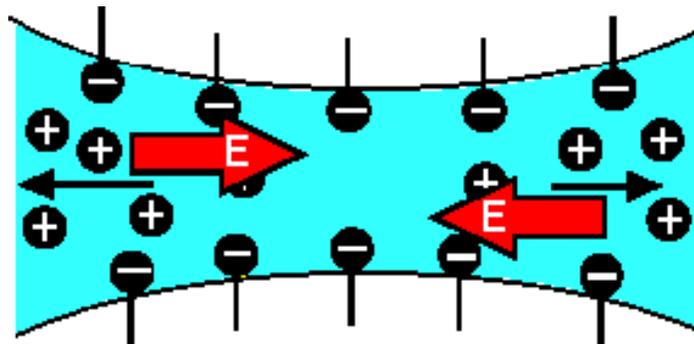


Figura 2.12 Potencial de flujo y electroviscosidad. [4]

2.3.5 Medición de Espumabilidad y Estabilidad de Espumas

Existen diversas investigaciones que permiten establecer

procedimientos para medir las propiedades características más importantes de una espuma, como la estabilidad y espumabilidad.

2.3.5.1 Método Estático de Ross-Miles

En este método se deja caer el líquido espumante en un cilindro graduado que contiene una cierta cantidad del mismo líquido (figura 2.14). Se mide la altura de la espuma formada y se observa su variación con respecto al tiempo. La altura de la espuma formada en el cilindro es una medida de la espumabilidad, y el tiempo que tarda la espuma en colapsar es una medida de estabilidad.

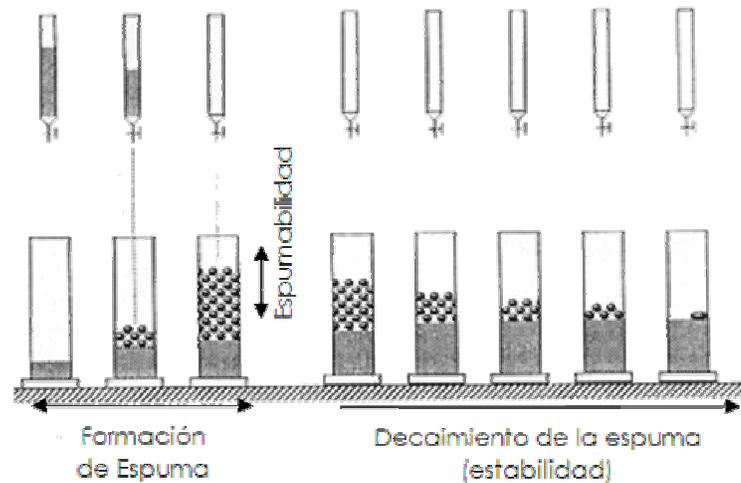


Figura 2.13 Método Estático de Ross-Miles. [5]

La espuma formada por este método es muy húmeda, por lo que inicialmente se produce abundante drenaje de líquido, y en consecuencia, es necesario que transcurra un tiempo antes de que comience el colapso de la espuma.

Al transcurrir el tiempo, el líquido se desplaza hacia abajo por drenaje gravitacional, la parte superior de la espuma pierde líquido, por lo que adquiere una consistencia más seca. Posteriormente, la espuma localizada en la parte superior de la columna comienza a colapsar y el proceso de decaimiento se produce de manera continua a partir de ese momento. La duración de este proceso indica la persistencia de la espuma [1].

2.3.5.2 Método Dinámico de Bikerman

Este método consiste en alcanzar un equilibrio dinámico entre la formación y el decaimiento de una espuma ubicada en una columna cilíndrica (figura 2.15). En la parte inferior de la columna se coloca un vidrio fritado, para generar las burbujas. En la columna se coloca un cierto volumen de la solución a espumar y se introduce un flujo de gas, de manera que las burbujas formadas quedan atrapadas en el líquido dando lugar a la formación de espuma. La espuma flota sobre el líquido y se acumula, formándose una columna de espuma alimentada por burbujas de gas desde el fondo del equipo. En la parte superior del mismo, se produce el decaimiento de la espuma en forma más o menos rápida. [1]

El sistema alcanza el equilibrio dinámico de Bikerman cuando la velocidad de generación de espuma iguala a su velocidad de decaimiento, por lo que al alcanzar el equilibrio la altura de la columna de espuma permanece constante. Esta condición depende tanto de la espumabilidad (generación de espuma) como de la estabilidad (decaimiento) de la espuma.

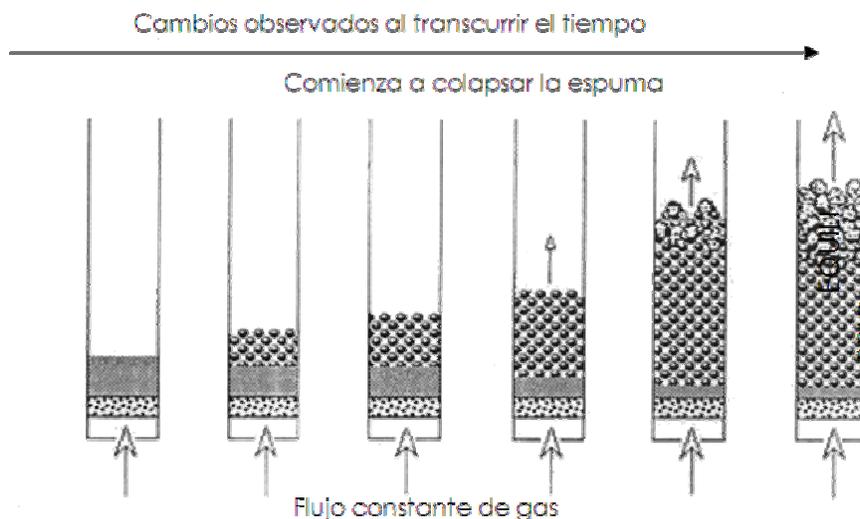


Figura 2.14 Método Dinámico de Bikerman. [1]

La proporción de volumen de espuma generado por un flujo de gas constante se denomina índice de espumabilidad [3] y se determina por:

$$\text{Índice de Espumabilidad} = \frac{\text{Volumen de Espuma}}{\text{Flujo de gas}} \quad \text{Ec. 2.1}$$

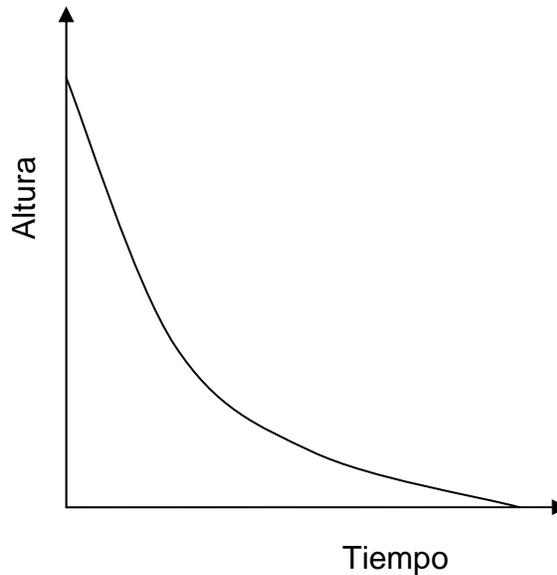
El índice de espumabilidad está expresado en unidades de tiempo y mide la tendencia de un líquido a formar espuma.

Una forma de medir la estabilidad de las espumas es graficando una curva de colapso de la espuma, como se muestra en la figura 2.16; en la cual puede representarse el decaimiento de la espuma en el tiempo, y determinar el tiempo de vida media de la espuma ($t_{0.5}$), mediante la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo de vida media} = \int \frac{H(t)}{H(0)} dt \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde $H(0)$ es la altura inicial de la espuma (en un tiempo $t = 0$), $H(t)$ es la altura de la espuma en un tiempo t .

Figura 2.15. Curva de Estabilidad de espumas. [1]



2.3.5.3 Método Mixto

En el método dinámico se obtiene una espuma cuyas características varían desde una espuma recién formada en el fondo de la columna, hasta una espuma cerca del colapso en la parte superior de la columna. El estado de equilibrio alcanzado por medio de este método es aparentemente el punto óptimo de partida para medir la estabilidad de una espuma.

En el método mixto, propuesto por investigadores del Laboratorio FIRP en 1994, [20] se emplea el método dinámico de Bikerman hasta alcanzar el equilibrio, luego se cierra la alimentación de gas y se mide la variación de la altura de la espuma con el tiempo, empleando el método de Ross-Miles,

como muestra la figura 2.17.

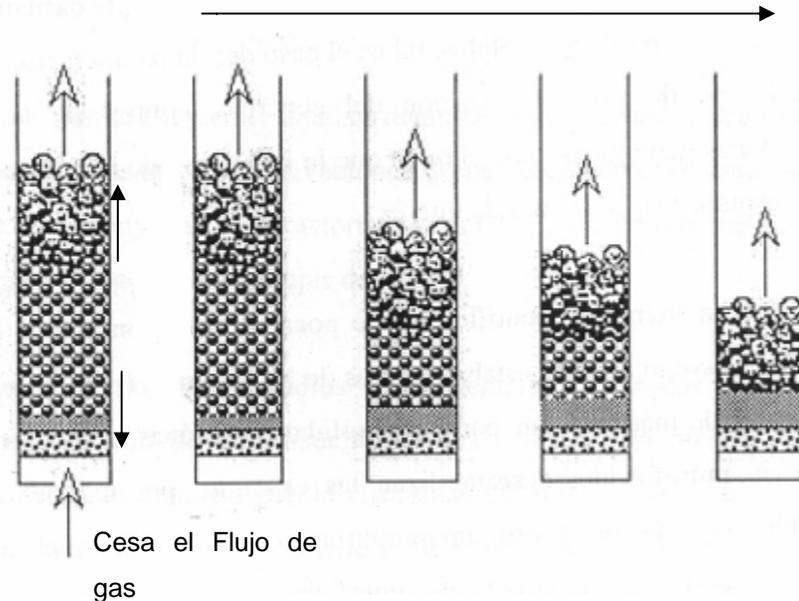


Figura 2.16. Método Mixto. [16]

2.3.6 Selección de los Surfactantes para la Formulación de una Espuma

Se puede obtener una muy buena espuma con surfactantes aniónicos, tal como el dodecil sulfonato de sodio o las sales de ácidos grasos. En general, los aniónicos hidrosolubles con cadena alquil lineales son mejores espumantes que los surfactantes no iónicos. Esto se le atribuye al hecho que son solubles en el agua y migran rápidamente a la superficie para formar una capa relativamente coherente (por combinación de las interacciones repulsivas entre las cabezas polares y la cohesión lipofílica entre las cadenas). Se podría pensar que la presencia de carga y la repulsión entre los grupos polares que se siguen, tienden a alejar las moléculas adsorbidas y

por tanto a reducir la adsorción, con respecto al caso de un surfactante no iónico.

De hecho, no es el caso en general, en el que la larga cadena poliéter de los surfactantes no iónicos forme a menudo una pelota y ocupe más espacio en la interfase que un grupo carboxilado o sulfato. Por otra parte, los surfactantes iónicos producen una doble carga eléctrica que es susceptible a producir una repulsión electrostática y efectos electrocinéticos. Las interacciones entre las cadenas lipófilas lineales del lado del gas parecen también ser favorables al aumento de la viscosidad superficial. [4]

2.3.6.1 Compromiso entre los grupos Hidrófilo y Lipófilo del Surfactante

En lo que concierne al efecto de la estructura de los grupos hidrófilos y lipófilos, se constata que entre más grandes son estos grupos más importantes son las interacciones entre las moléculas adsorbidas sobre sitios vecinos, lo que mejora la cohesión, y es por tanto un factor favorable. Al contrario, entre más grandes son estos grupos, más espacios ocuparán en la interfase, y por tanto menor es la adsorción. Por lo que en la formulación se busca un balance favorable entre la facilidad de adsorción y cohesión según el tamaño de los grupos hidrófilo y lipófilo.

En el caso de surfactantes no iónicos, por ejemplo los alcoholes etoxilados, sí el número de grupos óxido de etileno (EON) es muy bajo el surfactante no es suficientemente soluble en el agua, por lo contrario, si éste es demasiado grande el grupo hidrófilo es muy voluminoso y ocupa más espacio en la superficie y la adsorción de éste es penalizada.

Hay por tanto, un compromiso a conseguir en cada caso. Por ejemplo

la figura 2.18 indica que con el n-dodecanol etoxilado (cadena lipófila C12), se afecta la espumabilidad máxima con 7 grupos óxido de etileno. En cambio, con el n-octadecanol (C18) hacen falta 14 grupos de óxido de etileno para producir la mejor espumabilidad. [4]

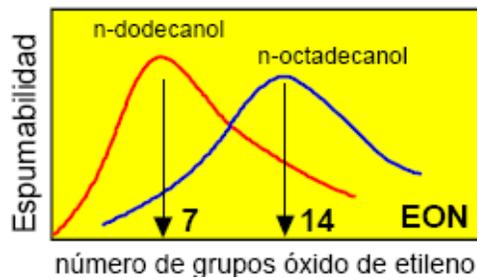


Figura 2.17 Espumabilidad con alcoholes etoxilados (a la CMC) en función de la longitud de la cadena lipófila y grado de etoxilación (EON del surfactante). [4]

En los dos casos anteriores, los surfactantes más espumosos son netamente hidrófilos, bien sea que ellos no posean exactamente la misma hidrofiliicidad si se miden éstos por el número HLB.

2.3.6.2 Longitud Óptima de las Sales de Ácidos Grasos Naturales

Si se toma como ejemplo el caso de los jabones alcalinos (sales de ácidos grasos lineales), los cuales poseen el mismo grupo hidrófilo, se constata que el estearato (grupo lipófilo C₁₈ saturado) es demasiado soluble en el agua y por tanto, no está disponible en cantidad suficiente cuando la superficie aire-agua se forma. En cambio, el grupo laureato (C₁₂ lineal) permite producir una excelente espuma.

Se puede mejorar la solubilidad transformando del grupo lipófilo esteárico (C_{18} saturado) al grupo oleato (C_{18} insaturado). El doble enlace introduce un aumento del espacio requerido por la cadena lipófila en la interfase, lo que reduce la adsorción. El mejor compromiso práctico (y económico) parece ser una cadena de tipo grasa que comprenda típicamente 40% de C_{16} saturado, 20% de C_{18} saturado y 40% de C_{18} monoinsaturado. [4]

2.3.6.3 Ramificación del Grupo Lipófilo del Surfactante

En los surfactantes alquilbenceno sulfonatos, la posición del grupo hidrófilo (benceno-sulfonato) y el largo de la cadena alquil lineal afecta considerablemente sus propiedades. Entre más cerca se encuentra el grupo hidrófilo del centro de la cadena alquil, más soluble es el tensoactivo en el agua y más elevada es su CMC (figura 2.19). Se constata también que entre más cerca del centro de la cadena alquil del grupo hidrófilo, más baja es la tensión superficial y más hidrófobo es el tensoactivo, lo que parece paradójico con respecto a la propiedad anterior.

La disminución de tensión y el aumento de la interacción entre cadenas lipófilas favorecen la espumabilidad, en cambio el aumento de la CMC y la disminución de la cohesión producen el efecto contrario. La experiencia muestra que son las fuerzas cohesivas las que dominan y que el mejor agente espumante es el alquil benceno sulfonato más ramificado (que posee dos cadenas idénticas). [16]

Otra manera de alterar la conexión es desplazando los átomos de carbono del grupo alquil en dos cadenas habidas de puntos de ataduras diferentes sobre el benceno. Si se compara el n-decil p-etil benceno sulfonato, se constata que ésta vez y contrariamente al caso precedente, es

el surfactante menos ramificado (n-dodecil benceno sulfonato) el que es mejor espumante. Parece que la razón por la cual el n-decil p-etil benceno sulfonato ocupa un área superficial netamente más grande que su isómero monoalquil, se debe a que el grupo benceno provoca una orientación diferente respecto a la interfase. Esto muestra que a menudo es difícil predecir con seguridad tales competiciones. [16]

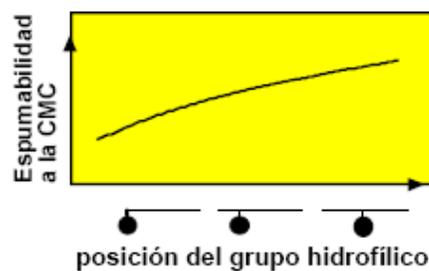


Figura 2.18 Espumabilidad (a la CMC) de un alquil benceno sulfonato en función del isómero. [4]

2.3.6.4 Tipo y Dimensión del Contra- ión

El tipo de contra-ión de los surfactantes iónicos tiene también su importancia. Por ejemplo, se sabe que desde hace mucho tiempo los jabones de potasio producen más espuma que los jabones de sodio y con más razón, los de amonio. Parece ser que esto está ligado a la solubilidad en el agua, la cual aumenta con la alcalinidad del catión. Se comprueba también que la espumabilidad está ligada a la dimensión del contra-ión. Por ejemplo, el dodecil sulfato de amonio es un mejor espumante que el dodecil sulfato de tetrabutil amonio, ya que el catión asociado a éste último ocupa más espacio en la interfase y resulta por tanto, en una baja adsorción y cohesión.[4]

2.3.7 Regímenes de Formación y Colapso de Espumas

2.3.7.1 Regímenes de Formación de Espuma

- a) **Crecimiento Tipo Bikerman:** la altura de la espuma aumenta linealmente con el tiempo, hasta alcanzar el equilibrio dinámico en el cual la espuma permanece constante, [22] como se observa en la figura 2.20.

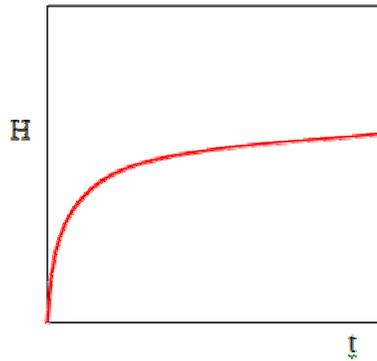


Figura 2.19 Crecimiento tipo Bikerman. [18]

- b) **Crecimiento tipo Campana:** en éste régimen se alcanza un estado casi estacionario, luego de haberse obtenido un máximo de espumabilidad, tal como se reporta en la figura en la figura 2.21.

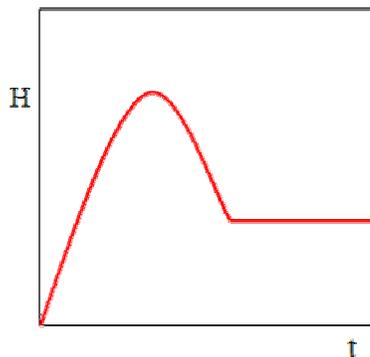


Figura 2.20 Crecimiento tipo Campana. [18]

- c) **Crecimiento Pulsante:** se produce un aumento lineal de la altura de la espuma con el tiempo hasta alcanzar cierta altura, donde colapsa violentamente una cierta cantidad de espuma, luego la espuma crece nuevamente y vuelve a colapsar. Este comportamiento se repite periódicamente, como se muestra en la figura 2.22. [21]

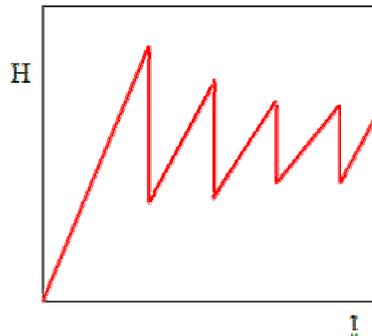


Figura 2.21 Crecimiento pulsante. [18]

- d) **Crecimiento tipo Sigmoide:** este régimen se caracteriza por un ascenso inicial lento, presentándose 3 etapas, señaladas en la figura 2.23. Una etapa con velocidad de formación menor a la velocidad de inyección de gas (fase A), otra con velocidad de ascenso similares a la

de tipo Bikerman (fase B); y una fase final donde se alcanza el equilibrio dinámico (fase C).

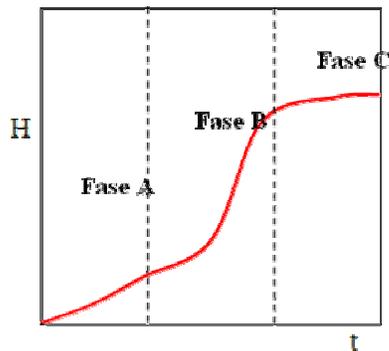


Figura 2.22 Crecimiento Sigmoide. [3]

- e) **Crecimiento con Formación de Trenes de Espuma:** en este régimen se observa, en un principio, que la espuma crece a una velocidad aproximadamente igual a la de inyección de gas. Cuando la espuma alcanza cierta altura, se forma una cavidad por debajo del tope de la columna de espuma, que se extiende hasta la superficie de la solución espumante y cuyo diámetro es igual al de la columna de vidrio; luego la espuma continúa su crecimiento por debajo de la cavidad, y éstas cavidades siguen apareciendo; simulando vagones de tren, como se muestra en la figura 2.24. La cantidad de espuma que se produce entre una cavidad y otra va disminuyendo hasta que en cierto instante cesa la formación de espuma.

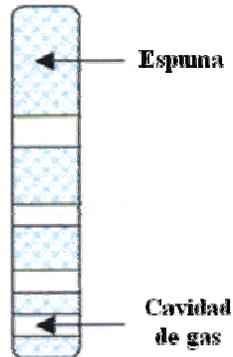


Figura 2.23 Crecimiento con formación de trenes de espuma. [21]

2.3.7.2 Regímenes de Colapso de las Espumas

- a) **Decaimiento Exponencial negativo:** La disminución de la altura de la espuma con el tiempo presenta una forma aproximadamente exponencial, que al graficarse en escala semilogarítmica se comporta como una línea recta, como se muestra en la figura 2.25. [18]

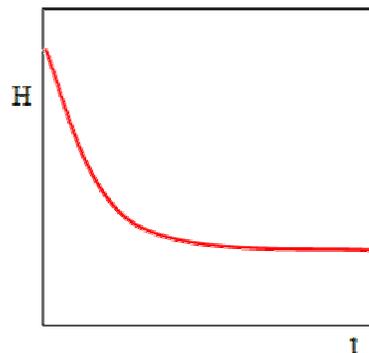


Figura 2.24 Decaimiento exponencial negativo. [18]

- b) **Decaimiento Escalonado:** al graficar la variación de la altura con el tiempo se observan escalones que corresponden a una desestabilización repentina de la espuma, figura 2.26.

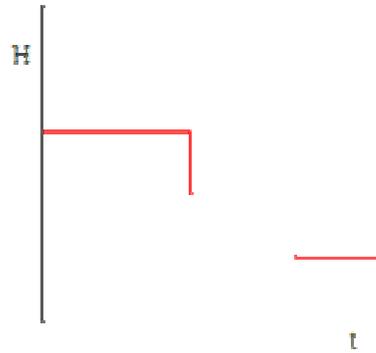


Figura 2.25 Decaimiento escalonado. [23]

- c) **Decaimiento Cuasi-rectilíneo:** La altura de la espuma decrece casi linealmente con el tiempo, como se reporta en la figura 2.27.

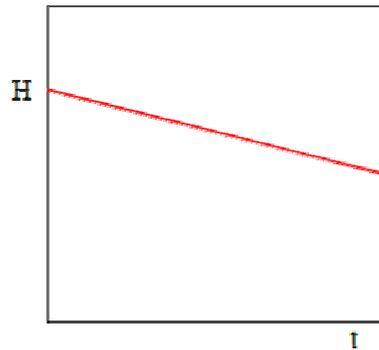


Figura 2.26 Decaimiento Cuasi-rectilíneo. [23]

CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Realización de pruebas exploratorias para la calibración del equipo de espumas

Para la realización de las pruebas experimentales, se hizo uso de un equipo de medición de espumabilidad, diseñado bajo la norma ASTM D 892 modificada. El recipiente de prueba utilizado tiene una capacidad de 1 L de volumen, con una doble superficie que sirve de chaqueta para calentamiento, y un régimen de flujo turbulento del agua de calentamiento. El método ASTM-D 892 modificado se basa en el método dinámico de Bikerman, para simular el fenómeno de espumeo de un aceite lubricante.

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra una representación esquemática del equipo piloto, instalación y accesorios; además de las dimensiones de la columna de espumeo.

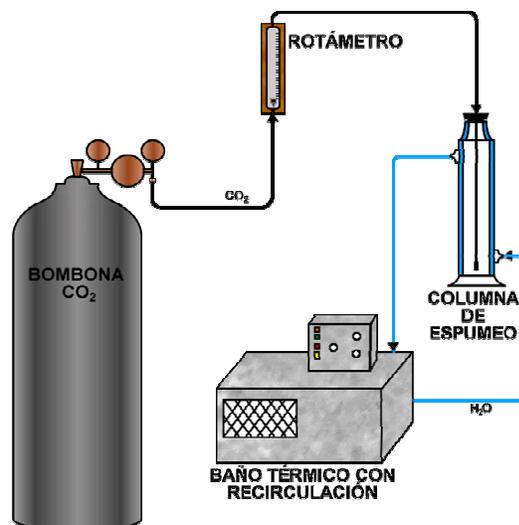


Figura 3.1 Representación esquemática del equipo piloto para formación de espuma.

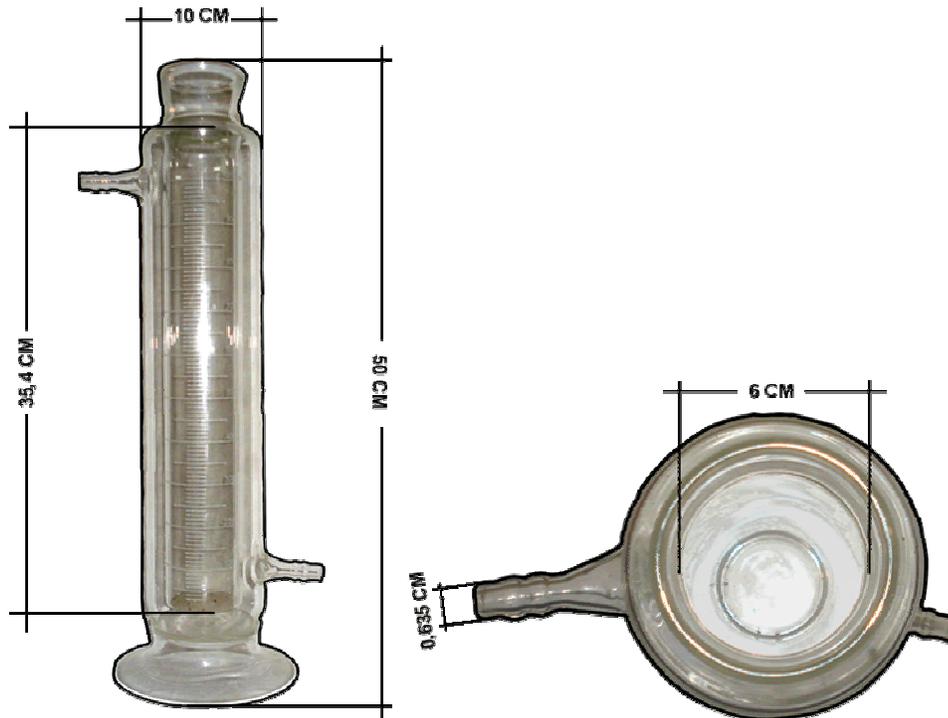


Figura 3.2 Dimensiones de la columna de espumeo.

3.1.1 Pruebas preliminares

Inicialmente se realizó una cantidad considerable de pruebas de calibración y funcionalidad del equipo, utilizando como sistema de dispersión del gas dentro de la muestra, una piedra difusora comercial (comúnmente utilizada en sistemas de oxigenación de peseras domésticas), de forma cilíndrica.

Para las primeras pruebas se utilizó una mezcla de aceites mineral y kerosén, con la adición de distintas concentraciones de surfactante Span-20, Span-80 y Tween-20. Además se repitieron las pruebas con distintos flujos de N_2 , adición de alcoholes como co-surfactantes, de sólidos, y el

cambio en la relación aceite-kerosen. En la mayoría de estas pruebas, la formación de espuma era muy escasa e inclusive inexistente, observándose que los períodos de estabilidad eran tan cortos que no permitían el registro de datos representativos que pudieran ser usados en un posterior estudio.

Finalmente se optó por cambiar la piedra difusora, por una una piedra esférica de porosidad de 0,324, certificada y diseñada para cumplir con la norma ASTM D 892. Con la cual se logró la espumabilidad y estabilidad en un tiempo suficiente, para el estudio de tendencias y regímenes de formación y colapso de la espuma.

En la figura 3.3 se muestran los dos tipos de piedras difusoras utilizadas.

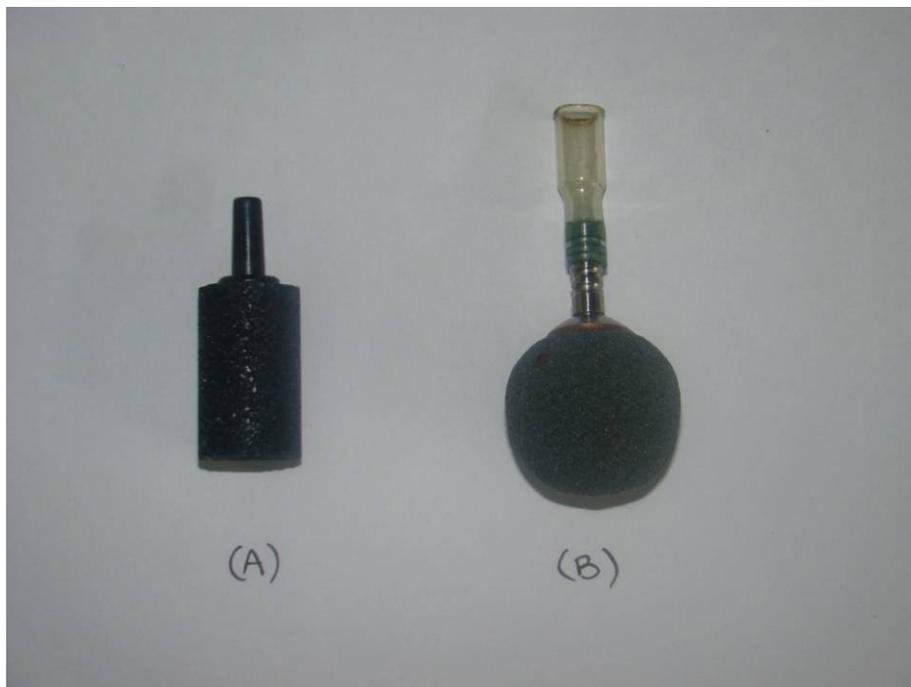


Figura 3.3 Piedras difusoras utilizadas en el quipo de espumeo: (a) Piedra cilíndrica de uso comercial, (b) Piedra esférica certificada.

3.1.2 Definición de parámetros operativos

Con el equipo en funcionamiento, y accesorios bien definidos, se procedió a realizar una serie de pruebas que permitieran establecer parámetros operacionales, que sirvieron de referencia en los distintos experimentos de espumabilidad y estabilidad de espuma con el equipo ASTM D 892 modificado. Se definieron variables como: relación aceite-kerosene de la muestra a espumar, volumen inicial de la muestra y flujo de Gas.

a) Relación Aceite-Kerosén

Con la finalidad de definir el porcentaje de aceite y kerosén más adecuado, se efectuaron pruebas con distintas mezclas de aceite-kerosén: 20:80, 40:60, 60:40 y 80:20 % v/v. A estos sistemas se les agregó 0,5 % de surfactante Span 20 (HLB 8,6) para aumentar la espumabilidad. Los datos obtenidos se registran en la tabla 3.1.

b) Volumen inicial de muestra

Se realizaron pruebas para estimar el volumen de la mezcla hidrocarbonada más conveniente, para no superar la capacidad de la columna de espumeo (1000 ml) y estudiar con holgura las espumas formadas. Se hicieron ensayos usando 100, 200 y 300 ml de un sistema 80 % aceite – 20 % Kerosén y el surfactante Span 20 al 0,5 %, a una temperatura de 30 °C, con un caudal de gas de 70 ml/s a una presión de 20 psia. Los valores de altura con respecto al tiempo, obtenidos para cada una de estas pruebas se encuentran reportados en la tabla 3.2.

Tabla 3. 1 Datos de las pruebas preliminares de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, a distintas relaciones aceite-kerosén.

Tiempo (s)	Relacion Aceite – Kerosene			
	80:20	60:40	40:60	20:80
	Altura de espuma (cm)			
0	0	0	0	0
10	0,7	0,4	0,6	0,4
20	1,1	0,5	0,8	0,6
30	1,2	0,5	1	0,8
40	1,5	0,6	1,1	0,9
50	1,8	0,7	1,1	1
60	1,9	0,7	1,2	1
70	2	0,8	1,2	1
80	2,1	0,9	1,2	1
90	2,3	0,9	1,2	1
100	2,4	0,9	1,2	1
110	2,5	0,9	1,3	1
120	2,6	0,9	1,3	1,1
130	2,7	0,9	1,3	1,1
140	2,8	0,9	1,3	1,1
150	2,8	0,9	1,3	1,1
160	2,8	0,5	1,4	1,1
170	2,8	0,3	1,4	1,1
180	2,8	0,2	1,4	1,1
190	2,8	0,1	1,4	1,1
200	2,8	0,1	1,4	0,8
210	2,8	0,1	1,4	0,3
220	2,9	0,1	1,4	0,2
230	2,9	0,1	1,4	0,1
240	2,9	0,1	1,4	0,1
250	2,9	0,1	1,1	0,1
260	2,9	0	0,7	0,1
270	3	-	0,2	0,1
280	3	-	0	0
290	3	-	-	-
300	3	-	-	-

310	3	-	-	-
320	3	-	-	-
330	3	-	-	-
340	3	-	-	-
350	3	-	-	-
360	2,5	-	-	-
370	1,8	-	-	-
380	1,4	-	-	-

Tabla 3. 1 Datos de las pruebas preliminares de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, a distintas relaciones aceite-kerosén. (continuación).

Tiempo (s)	Relacion Aceite – Kerosene			
	80:20	60:40	40:60	20:80
	Altura de espuma (cm)			
390	1,1	-	-	-
400	0,8	-	-	-
410	0,6	-	-	-
420	0,5	-	-	-
430	0,4	-	-	-
440	0,2	-	-	-
450	0,2	-	-	-
460	0,2	-	-	-
470	0,1	-	-	-
480	0,1	-	-	-
490	0,1	-	-	-
500	0,1	-	-	-
510	0,1	-	-	-
520	0,1	-	-	-
530	0,1	-	-	-
540	0,1	-	-	-
550	0,1	-	-	-
560	0,1	-	-	-
570	0,1	-	-	-
580	0,1	-	-	-
590	0,1	-	-	-
600	0	-	-	-

Tabla 3.2 Datos de las pruebas preliminares de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidracarbonada, con diferentes volúmenes de muestra.

	Volumen (ml) de Muestra		
	100	200	300
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
0	0	0	0
10	0,5	0,7	1,1
20	0,8	1,1	1,4
30	1,2	1,2	1,8
40	1,3	1,5	2,1
50	1,5	1,8	2,3
60	1,5	1,9	2,6
70	1,7	2	2,7
80	1,8	2,1	3
90	1,8	2,3	3,3
100	1,9	2,4	3,3
110	2	2,5	3,3
120	1,9	2,6	3,4
130	1,9	2,7	3,4
140	1,9	2,8	3,6
150	1,9	2,8	3,8
160	1,9	2,8	4
170	1,9	2,8	4
180	1,9	2,8	4,2
190	1,3	2,8	4,4
200	1	2,8	4,4
210	0,8	2,8	4,4
220	0,6	2,9	4,4
230	0,6	2,9	4,4
240	0,4	2,9	4,4
250	0,3	2,9	4,4
260	0,2	2,9	4,4
270	0,2	3	4,4

280	0,2	3	3,5
290	0,1	3	2,9
300	0,1	3	2,5
310	0,1	3	2,3
320	0,1	3	1,9

Tabla 3.2 Datos de las pruebas preliminares de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con diferentes volúmenes de muestra (continuación).

	Volumen (mL) de Muestra		
	50	100	200
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
330	0,1	3	1,5
340	0,1	3	1,2
350	0,1	3	1
360	0,1	2,5	0,8
370	0,1	1,8	0,6
380	0,1	1,4	0,4
390	0,1	1,1	0,4
400	0,1	0,8	0,3
410	0,1	0,6	0,3
420	0	0,5	0,2
430	-	0,4	0,2
440	-	0,2	0,2
450	-	0,2	0,2
460	-	0,2	0,2
470	-	0,1	0,1
480	-	0,1	0,1

490	-	0,1	0,1
500	-	0,1	0,1
510	-	0,1	0,1
520	-	0,1	0,1
530	-	0,1	0,1
540	-	0,1	0,1
550	-	0,1	0,1
560	-	0,1	0,1
570	-	0,1	0,1
580	-	0,1	0,1
590	-	0	0,1
600	-	-	0,1
610	-	-	0,1
620	-	-	0

c) Flujo de gas N₂

Para el estudio de cada una de las variables que intervinieron en la formación y colapso de las espumas, se hizo necesario establecer un parámetro fijo del flujo de gas que se inyectó a la muestra. Para definir este valor se realizaron pruebas con un sistema 80 % aceite – 20 % kerosén, a una temperatura de 30°C y a una presión de 20 psia, y con distintos valores de flujo de 40, 70 y 100 ml/s. Con la realización de estas pruebas se obtuvieron datos de altura que permitieron la selección del valor de flujo de gas N₂ más idóneo para el desempeño de las pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma. Las alturas conseguidas en función del tiempo para cada una de las pruebas se encuentran reportadas en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Datos de las pruebas preliminares de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con distintos flujos de gas N₂.

	Flujo de gas N ₂ (ml/s)		
	40	70	100
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
0	0	0	0
10	0,4	0,7	0,9
20	0,6	1,1	1,4
30	0,7	1,2	1,8
40	0,8	1,5	2,3
50	0,9	1,8	2,5
60	1	1,9	2,7
70	1,1	2	3
80	1,2	2,1	3,4
90	1,2	2,3	3,7
100	1,2	2,4	4,1
110	1,3	2,5	4,3
120	1,3	2,6	4,4
130	1,4	2,7	4,5
140	1,4	2,8	4,7
150	1,4	2,8	5
160	1,4	2,8	5,1
170	1,4	2,8	5,2
180	1,4	2,8	5,2
190	1,4	2,8	5,4
200	1,4	2,8	5,4
210	1,2	2,8	5,5
220	0,9	2,9	5,6

Tabla 3.3 Datos de las pruebas preliminares de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con distintos flujos de gas N₂ (continuación).

	Flujo de gas N ₂ (ml/s)		
	40	70	100
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
230	0,7	2,9	5,8
240	0,6	2,9	5,9
250	0,4	2,9	6
260	0,4	2,9	4,9
270	0,3	3	4,4
280	0,3	3	3,9
290	0,2	3	3,5
300	0,2	3	2,8
310	0,2	3	2,4
320	0,2	3	1,8
330	0,2	3	1,4
340	0,1	3	1
350	0,1	3	0,8
360	0,1	2,5	0,7
370	0,1	1,8	0,5
380	0,1	1,4	0,4
390	0,1	1,1	0,4
400	0,1	0,8	0,4
410	0,1	0,6	0,4
420	0,1	0,5	0,4
430	0,1	0,4	0,3
440	0	0,2	0,2
450	-	0,2	0,2
460	-	0,2	0,2
470	-	0,1	0,2
480	-	0,1	0,2
490	-	0,1	0,2
500	-	0,1	0,2

510	-	0,1	0,2
520	-	0,1	0,2
530	-	0,1	0,1
540	-	0,1	0,1
550	-	0,1	0,1

Tabla 3.3 Datos de las pruebas preliminares de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con distintos flujos de gas N₂ (continuación).

	Flujo de gas N ₂ (mL/s)		
	40	70	100
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
560	-	0,1	0,1
570	-	0,1	0,1
580	-	0,1	0,1
590	-	0,1	0,1
600	-	0	0,1
610	-	-	0,1
620	-	-	0,1
630	-	-	0,1
640	-	-	0

3.2 Formulaciones de espumas de hidrocarburos, variando la concentración y tipo de surfactante, relación agua-aceite, el eacn (número de alcanos equivalente del aceite), el flujo de gas y la viscosidad del aceite (por adición de sólidos)

Para esta etapa se llevaron a cabo distintas pruebas de espumabilidad, modificando variables de formulación como: concentración y tipo de surfactante, relación agua-aceite, el EACN, el flujo de gas y viscosidad del aceite (por adición de sólidos).

Para las pruebas variando el tipo de surfactante, se realizaron experiencias con los surfactantes Span-20, Span-80 y Tween-20 de manera independiente y con variación de concentraciones. De igual manera, para las pruebas de fracción de agua se evaluó la espumabilidad de los sistemas con relación agua-aceite de distintas magnitudes. Las pruebas de espumabilidad se repitieron variando la mezcla de hidrocarburos, para así relacionar el efecto del EACN. Por otra parte se modificó el flujo de gas en las pruebas de medición de espuma, y por último se adicionó sólidos lipofílicos, con el fin de estudiar el efecto de la viscosidad en las espumas de los hidrocarburos.

3.2.1 Variación de la concentración y tipo de surfactante

Para la formulación, se utilizaron como químicos base tres tipos de surfactantes: el Sorbitan Monolaureato conocido comercialmente como Span 20; el Sorbitan Monooleato, (Span 80); y el Polietileno Monolaureato (Tween 20). En la tabla 3.4 se reportan las propiedades físicas y químicas de estos tensoactivos.

Para determinar el efecto de estos componentes activos sobre la espumabilidad de una muestra hidrocarbonada, se mezcló previamente una cantidad dada de surfactante en una mezcla Heptano-Tolueno, en las siguientes relaciones: 50:50 para el Span 20 y para el Tween 20; y 20:80 para el Span 80, para evitar problemas de solubilidad debido a la baja hidroflicidad de este surfactante. Una vez homogenizada esta mezcla, se agregó, junto con 200 ml de muestra hidrocarbana 80% Aceite -20% Kerosén, a la columna de espumeo.

Se burbujeó el gas durante 10 minutos para obtener una mezcla más homogénea del surfactante en la solución, y además garantizar una cantidad

de gas en solución aproximadamente equitativa para cada una de las mezclas. Posteriormente, se procedió a medir la altura durante y después de la formación y colapso de la espuma, en función del tiempo. La temperatura del sistema fue de 30 °C y el flujo de gas (N₂) tuvo una presión de 20 psia y un caudal de 70 ml/s.

Se hizo el registro del tiempo con un cronómetro (comenzando cuando la primera burbuja de gas llegó a la superficie), y se tomó la altura alcanzada por la espuma cada 10 segundos, hasta que esta se estabilizó. Los valores se reportan en las tablas 3.5, 3.6 y 3.7, y representan la espumabilidad (contabilizando tanto el líquido restante como aquel que espumó).

Seguidamente, se cerró el paso de gas y se tomaron las medidas de altura en el proceso de colapso de la espuma, hasta que se obtuvo aproximadamente el mismo volumen inicial de la mezcla hidrocarbonada; representando este tiempo de colapso, la estabilidad de la espuma. Las pruebas fueron repetidas a distintas dosis y con los diferentes surfactantes, para así determinar su efecto, en las propiedades de la espuma de la muestra no acuosa.

Con el Span 20 se probaron concentraciones de 0,25; 0,50; 0,75 y 1 %. Para el caso del Span 80 y el Tween 20 las concentraciones estudiadas fueron menores, porque a concentraciones superiores a 0,5 no se obtuvo una espuma suficiente para el estudio.

Tabla 3.4 Características físico-químicas de los surfactantes utilizados.

Nombre	Fórmula	M	ρ (g/ml) ²⁵ _{°C}	η (cp)	HLB
Span 20 (Sorbitan monolaureato)	C ₁₈ H ₃₄ O ₆	346,46	1,032	4.250	8,6
Span 80 (Sorbitan Monooleato)	C ₂₄ H ₄₄ O ₆	428,60	0,986		4,3

Tabla 3.4 Características físico-químicas de los surfactantes empleados (continuación).

Nombre	Fórmula	M	ρ (g/ml) ²⁵ _{°C}	η (cp)	HLB
Tween 20 (Monolaurato Polioxietileno Sorbitan)	C ₅₈ H ₁₁₄ O ₂₆	1227,54	1,095		16,7

Tabla 3. 5 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con adición de Span 20.

Tiempo (s)	Concentración Span 20 (% p/v)			
	0,25	0,5	0,75	1
	Altura de espuma (cm)			
0	0	0	0	0
10	0,2	0,7	0,9	0,5
20	0,4	1,1	1,1	0,8
30	0,6	1,2	1,2	1
40	0,7	1,5	1,4	1,1
50	0,8	1,8	1,5	1,2
60	0,8	1,9	1,6	1,3
70	0,8	2	1,7	1,4
80	0,8	2,1	1,9	1,4
90	0,8	2,3	1,9	1,5
100	0,8	2,4	1,9	1,5
110	0,7	2,5	1,9	1,5
120	0,5	2,6	2	1,6
130	0,4	2,7	2	1,6

140	0,3	2,8	2,1	1,6
150	0,3	2,8	2,2	1,7
160	0,3	2,8	2,2	1,7
170	0,3	2,8	2,2	1,8
180	0,2	2,8	2,3	1,8
190	0,2	2,8	2,3	1,9
200	0,1	2,8	2,3	1,9
210	0,1	2,8	2,3	1,9
220	0,1	2,9	2,3	1,9
230	0,1	2,9	2,3	1,9
240	0,1	2,9	2,3	1,9
250	0	2,9	2,3	1,9
260	-	2,9	2,3	1,9
270	-	3	2,3	1,9
280	-	3	1,9	1,2
290	-	3	1,7	0,8
300	-	3	1,5	0,5
310	-	3	1,4	0,3

Tabla 3. 5 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con adición de Span 20 (continuación).

Tiempo (s)	Concentración Span 20 (% p/v)			
	0,25	0,5	0,75	1
	Altura de espuma (cm)			
320	-	3	1,3	0,2
330	-	3	1,1	0,2
340	-	3	0,9	0,2
350	-	3	0,7	0,2
360	-	2,5	0,7	0,1
370	-	1,8	0,7	0,1
380	-	1,4	0,6	0,1
390	-	1,1	0,6	0,1
400	-	0,8	0,5	0,1
410	-	0,6	0,4	0,1
420	-	0,5	0,2	0,1
430	-	0,4	0,1	0,1
440	-	0,2	0,1	0
450	-	0,2	0,1	-
460	-	0,2	0,1	-

470	-	0,1	0,1	-
480	-	0,1	0,1	-
490	-	0,1	0,1	-
500	-	0,1	0,1	-
510	-	0,1	0,1	-
520	-	0,1	0,1	-
530	-	0,1	0	-
540	-	0,1	-	-
550	-	0,1	-	-
560	-	0,1	-	-
570	-	0,1	-	-
580	-	0,1	-	-
590	-	0,1	-	-
600	-	0	-	-

Tabla 3. 6 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con adición de Span 80.

Tiempo (s)	Concentración Span 80 (% p/v)			
	0,05	0,1	0,25	0,5
	Altura de espuma (cm)			
0	0	0	0	0
10	0	0,1	0,1	0,1
20	0	0,2	0,1	0,1
30	0	0,3	0,1	0,1
40	0	0,3	0,2	0,1

Tabla 3. 6 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con adición de Span 80 (continuación).

Tiempo (s)	Concentración Span 80 (% p/v)			
	0,05	0,1	0,25	0,5
	Altura de espuma (cm)			
50	0	0,3	0,2	0,1
60	0	0,3	0,1	0,1
70	0	0,3	0,1	0,1
80	0	0,3	0,1	0,1

90	0	0,3	0,1	0
100	-	0,3	0	-
110	-	0,2	-	-
120	-	0,2	-	-
130	-	0,1	-	-
140	-	0,1	-	-
150	-	0,1	-	-
160	-	0,1	-	-
170	-	0,1	-	-
180	-	0,1	-	-
190	-	0,1	-	-
200	-	0,1	-	-
210	-	0,1	-	-
220	-	0,1	-	-
230	-	0	-	-

Tabla 3. 7 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con adición de Tween 20.

Tiempo (s)	Concentración Tween 20 (% p/v)		
	0,1	0,25	0,5
	Altura de espuma (cm)		
0	0	0	0
10	0,2	0,2	0,2
20	0,3	0,3	0,3
30	0,3	0,4	0,3
40	0,3	0,5	0,3
50	0,3	0,5	0,3
60	0,3	0,5	0,3
70	0,3	0,5	0,4
80	0,3	0,5	0,4
90	0,3	0,6	0,4
100	0,2	0,6	0,4
110	0,1	0,5	0,4

Tabla 3. 7 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con adición de Tween 20 (continuación).

Tiempo (s)	Concentración Tween 20 (% p/v)		
	0,1	0,25	0,5
	Altura de espuma (cm)		
120	0,1	0,5	0,4
130	0,1	0,5	0,4
140	0,1	0,5	0,4
150	0,1	0,5	0,3
160	0,1	0,5	0,2
170	0,1	0,5	0,2
180	0,1	0,5	0,1
190	0,1	0,3	0,1
200	0,1	0,2	0,1
210	0	0,2	0,1
220	-	0,2	0,1
230	-	0,2	0,1
240	-	0,2	0,1
250	-	0,2	0,1
260	-	0,1	0,1
270	-	0,1	0
280	-	0,1	-
290	-	0,1	-
300	-	0,1	-
310	-	0,1	-
320	-	0,1	-
330	-	0	-

3.2.2 Relación Agua-Aceite

Para conocer el efecto del porcentaje de agua y sedimentos en la espumabilidad y estabilidad del sistema hidrocarbonado, se procedió a agregar cantidades conocidas de agua al sistema; formando mezclas de aceite y la agua.

Para la medición de la espumabilidad y estabilidad de espuma se utilizaron los procedimientos descritos por el método ASTM 892 D modificado, y las concentraciones de agua en el sistema fueron: 0,5 %, 1% y 5%. Los datos de altura de espuma en función del tiempo para cada una de las experiencias se encuentran reportados en la tabla 3.8

Tabla 3. 8 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 %, a distintas concentraciones de agua en el sistema.

Tiempo (s)	Concentración Agua (% v/v)			
	0	0,5	1	5
0	0	0	0	0
10	0,7	0,6	1	0,4
20	1,1	0,9	1,2	0,6
30	1,2	1,1	1,6	0,8
40	1,5	1,6	2	1
50	1,8	1,7	2,1	1,1
60	1,9	1,9	2,5	1,1
70	2	2,1	2,6	1,3
80	2,1	2,2	2,8	1,3
90	2,3	2,5	3	1,3
100	2,4	2,5	3	1,3
110	2,5	2,6	3	1,5
120	2,6	2,7	3	1,5
130	2,7	2,7	3	1,5
140	2,8	2,8	3	1,5
150	2,8	2,9	3,1	1,1
160	2,8	2,8	3,1	1
170	2,8	2,8	3,1	0,7
180	2,8	2,9	3,1	0,4
190	2,8	2,9	3,1	0,2
200	2,8	2,9	3,1	0,2
210	2,8	3	3,1	0,2
220	2,9	3	3,1	0,2
230	2,9	3	2,6	0,1
240	2,9	3	2,3	0,1

250	2,9	3,1	2,1	0,1
260	2,9	3,1	1,8	0,1
270	3	3,1	1,6	0,1
280	3	3,1	1,4	0,1
290	3	3,1	1,3	0,1
300	3	3,1	1,1	0,1
310	3	3,1	0,9	0,1
320	3	2,7	0,8	0
330	3	2,5	0,5	-
340	3	2,2	0,4	-
350	3	1,9	0,3	-
360	2,5	1,7	0,3	-
370	1,8	1,3	0,3	-
380	1,4	1	0,3	-

Tabla 3. 8 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 %, a distintas concentraciones de agua en el sistema (continuación).

Tiempo (s)	Concentración Agua (% v/v)			
	0	0,5	1	5
390	1,1	0,9	0,2	-
400	0,8	0,7	0,2	-
410	0,6	0,5	0,2	-
420	0,5	0,3	0,2	-
430	0,4	0,2	0,2	-
440	0,2	0,2	0,2	-
450	0,2	0,2	0,2	-
460	0,2	0,2	0,1	-
470	0,1	0,2	0,1	-
480	0,1	0,1	0,1	-
490	0,1	0,1	0,1	-
500	0,1	0,1	0,1	-
510	0,1	0,1	0,1	-
520	0,1	0,1	0,1	-
530	0,1	0,1	0,1	-
540	0,1	0,1	0,1	-
550	0,1	0,1	0,1	-
560	0,1	0,1	0,1	-

570	0,1	0,1	0,1	-
580	0,1	0,1	0,1	-
590	0,1	0,1	0,1	-
600	0	0,1	0,1	-
610	-	0	0,1	-
620	-	-	0,1	-
630	-	-	0	-

3.2.3 Variación del EACN

Para el estudio de la variación del número de alcano equivalente (EACN), se procedió a modificar la relación de la mezcla aceite –kerosén. Además se tomaron las mediciones de viscosidad para cada uno de los sistemas obteniendo 0,7545, 0,1189, 0,0936 y 0,402 cp; para la relación 80:20, 60:40, 40:60 y 20:80 respectivamente.

Para el estudio de las propiedades de la espuma de estos nuevos sistemas se utilizó el método mixto, bajo la norma ASTM 892 D modificada, manteniendo los demás parámetros fijos.

Los valores de las soluciones puras de aceite mineral y kerosén se tomaron de estudios anteriores [3,6], siendo 20 y 10 respectivamente. Los EACN de las mezclas se calcularon por promedios, asumiendo una mezcla lineal.

Los datos obtenidos para esta serie de experimentos se encuentran reportados en la tabla 3.9

Tabla 3. 9 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para sistemas Aceite – Kerosene, con Span 20 al 0,5 % y variación de EACN.

Tiempo (s)	EACN			
	18	16	14	12
Altura de espuma (cm)				
0	0	0	0	0
10	0,7	0,4	0,6	0,4
20	1,1	0,5	0,8	0,6
30	1,2	0,5	1	0,8
40	1,5	0,6	1,1	0,9
50	1,8	0,7	1,1	1
60	1,9	0,7	1,2	1
70	2	0,8	1,2	1
80	2,1	0,9	1,2	1
90	2,3	0,9	1,2	1
100	2,4	0,9	1,2	1
110	2,5	0,9	1,3	1
120	2,6	0,9	1,3	1,1
130	2,7	0,9	1,3	1,1
140	2,8	0,9	1,3	1,1
150	2,8	0,9	1,3	1,1
160	2,8	0,5	1,4	1,1
170	2,8	0,3	1,4	1,1
180	2,8	0,2	1,4	1,1
190	2,8	0,1	1,4	1,1
200	2,8	0,1	1,4	0,8
210	2,8	0,1	1,4	0,3
220	2,9	0,1	1,4	0,2
230	2,9	0,1	1,4	0,1
240	2,9	0,1	1,4	0,1
250	2,9	0,1	1,1	0,1
260	2,9	0	0,7	0,1
270	3	-	0,2	0,1
280	3	-	0	0
290	3	-	-	-
300	3	-	-	-
310	3	-	-	-
320	3	-	-	-

Tabla 3. 9 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para sistemas Aceite – Kerosene, con Span 20 al 0,5 % y variación de EACN (continuación).

Tiempo (s)	EACN			
	18	16	14	12
	Altura de espuma (cm)			
330	3	-	-	-
340	3	-	-	-
350	3	-	-	-
360	2,5	-	-	-
370	1,8	-	-	-
380	1,4	-	-	-
390	1,1	-	-	-
400	0,8	-	-	-
410	0,6	-	-	-
420	0,5	-	-	-
430	0,4	-	-	-
440	0,2	-	-	-
450	0,2	-	-	-
460	0,2	-	-	-
470	0,1	-	-	-
480	0,1	-	-	-
490	0,1	-	-	-
500	0,1	-	-	-
510	0,1	-	-	-
520	0,1	-	-	-
530	0,1	-	-	-
540	0,1	-	-	-
550	0,1	-	-	-
560	0,1	-	-	-
570	0,1	-	-	-
580	0,1	-	-	-
590	0,1	-	-	-
600	0	-	-	-

3.2.4 Variación del flujo de gas (N₂)

Para el estudio de las variables flujomecánicas, fue importante estudiar la influencia que tiene el caudal de gas inyectado a la muestra para producir la espuma.

Para este experimento se fijó distintos valores de caudal en el rotámetro de entrada a la columna de espumeo, y luego se procedió a realizar la experiencia según metodología definida en norma ASTM 892 D modificada, siguiendo el procedimiento explicado con anterioridad.

Los valores de altura de espuma en función del tiempo, obtenidos para las experiencias con caudal de: 40, 70, 100 y 130 mL/s; se encuentran reportados en la tabla 3.10.

Tabla 3. 10 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, a distintos caudales de inyección de gas N₂.

Tiempo (s)	Flujo de gas N ₂ (ml/s)			
	40	70	100	130
0	0	0	0	0
10	0,4	0,7	0,9	0,4
20	0,6	1,1	1,4	0,5
30	0,7	1,2	1,8	0,6
40	0,8	1,5	2,3	0,7
50	0,9	1,8	2,5	0,7
60	1	1,9	2,7	0,7
70	1,1	2	3	0,7
80	1,2	2,1	3,4	0,8
90	1,2	2,3	3,7	0,8
100	1,2	2,4	4,1	0,9
110	1,3	2,5	4,3	0,9

120	1,3	2,6	4,4	0.9
130	1,4	2,7	4,5	0.9
140	1,4	2,8	4,7	0.9
150	1,4	2,8	5	0.9
160	1,4	2,8	5,1	0.9
170	1,4	2,8	5,2	0.9
180	1,4	2,8	5,2	0.9
190	1,4	2,8	5,4	0.6
200	1,4	2,8	5,4	0.5
210	1,2	2,8	5,5	0.4
220	0,9	2,9	5,6	0.4
230	0,7	2,9	5,8	0.3
240	0,6	2,9	5,9	0.2
250	0,4	2,9	6	0.2
260	0,4	2,9	4,9	0.1
270	0,3	3	4,4	0.1
280	0,3	3	3,9	0.1
290	0,2	3	3,5	0.1
300	0,2	3	2,8	0.1
310	0,2	3	2,4	0.1
320	0,2	3	1,8	0
330	0,2	3	1,4	-
340	0,1	3	1	-

Tabla 3. 10 Datos de prueba de espumabilidad y estabilidad de espuma de la mezcla hidrocarbonada, a distintos caudales de inyección de N₂ (continuación).

Tiempo (s)	Flujo de gas N ₂ (ml/s)			
	40	70	100	130
Altura de espuma (cm)				
350	0,1	3	0,8	-
360	0,1	2,5	0,7	-
370	0,1	1,8	0,5	-
380	0,1	1,4	0,4	-
390	0,1	1,1	0,4	-
400	0,1	0,8	0,4	-

410	0,1	0,6	0,4	-
420	0,1	0,5	0,4	-
430	0,1	0,4	0,3	-
440	0	0,2	0,2	-
450	-	0,2	0,2	-
460	-	0,2	0,2	-
470	-	0,1	0,2	-
480	-	0,1	0,2	-
490	-	0,1	0,2	-
500	-	0,1	0,2	-
510	-	0,1	0,2	-
520	-	0,1	0,2	-
530	-	0,1	0,1	-
540	-	0,1	0,1	-
550	-	0,1	0,1	-
560	-	0,1	0,1	-
570	-	0,1	0,1	-
580	-	0,1	0,1	-
590	-	0,1	0,1	-
600	-	0,1	0,1	-
610	-	0	0,1	-
620	-	-	0,1	-
630	-	-	0	-
640				

3.2.5 Variación de la viscosidad del aceite (por adición de sólidos)

Para llevar a cabo las pruebas con adición de distintos sólidos, primero se escogieron dos sólidos de naturaleza hidrofílica, y comunes en procesos vinculados a la extracción del crudo como la bentonita y el carbonato de calcio, CaCO_3 . Estos sólidos tienen propiedades bien definidas y ligadas a su función en los procesos de ingeniería de perforación de pozos. La bentonita se usa como viscosificante y el carbonato de calcio como densificante por su alta gravedad específica. En la tabla 3.11 se reportan las características físicas y químicas de estos sólidos.

Por otra parte, para establecer diferencias con la naturaleza del sólido, se utilizaron asfaltenos precipitados (sólido de carácter lipofílico), diluido en kerosén. Además permitió relacionar el comportamiento de estas macromoléculas, comúnmente encontrada en crudos y con características surfactantes por su centro polar y complejas ramificaciones lipofílicas, con el efecto espumante de una muestra hidrocarbonada.

La adición de los sólidos va a permitir principalmente aumentar la viscosidad del sistema, y así alterar una de las variables que más influencia tiene en la estabilidad de las espumas no acuosas [3,6,7].

El procedimiento usado para la pruebas con sólidos, es el mismo descrito en el método ASTM D-892. Consistió en adicionar a 200 ml de mezcla hidrocarbonada, una cantidad dada de sólido (que para el caso de los asfaltenos, se agregan diluidos en kerosén) y luego, se procedió a caracterizar midiendo la altura y tiempo durante la formación y colapso de la espuma. La experiencia se repitió variando la cantidad y tipo de sólido. Los datos registrados durante las diferentes corridas se reportan en las tablas 3.12 y 3.13 y 3.14.

Tabla 3.11 Propiedades físicas y químicas de los sólidos hidrofílicos en estudio.

	Carbonato de Calcio	Bentonita
Fórmula química	CaCO ₃	Si ₄ (Al _{2-x} R _x)(H ₂ O) _n Con R = Mg, Fe, Mn, Zn, Ni
Densidad (°25)	2,7	2,5
Hinchamiento inmediato en agua	0,0013 g /100 mL	24 mín (2 g /100 mL)
Humedad	0,25 %	10 % máx (110 °C)
Poder ligante		1:6 /1:9 Arcilla/H ₂ O
Granulometría (malla 200)	4% ; malla 400: 90%	97% mín

Capacidad de intercambio catiónico	7,12 meq/100g	65-70 meq / 100 g
pH (dispersión en agua)	7-7,5	7,5 -8,2 (al 10% g/v)

Tabla 3.12 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de Bentonita en distintas cantidades.

	Bentonita (gr)		
	0,5	1	2
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
0	0	0	0
10	0,8	0,7	0,7
20	1,2	1,1	0,9
30	1,4	1,2	1,1

Tabla 3.12 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de Bentonita en distintas cantidades (continuación).

	Bentonita (gr)		
	0,5	1	2
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
40	1,6	1,4	1,6
50	1,7	1,7	1,8
60	1,9	1,9	1,9
70	2,1	2	2
80	2,3	2,1	2,2
90	2,4	2,3	2,5
100	2,4	2,3	2,6
110	2,5	2,6	2,8
120	2,5	2,6	2,9
130	2,7	2,6	3
140	2,7	2,7	3,1
150	2,9	2,7	3,1

160	2,9	2,9	3,1
170	2,9	2,9	3,1
180	2,9	2,9	3,1
190	2,9	2,9	3,2
200	3	3	3,2
210	3	3	3,2
220	3	3,1	3,4
230	3	3,1	3,4
240	3	3,2	3,4
250	3	3,2	3,4
260	3	3,2	3,5
270	3	3,2	3,5
280	3	3,2	3,5
290	2,7	3,2	3,5
300	2	2,7	3,5
310	1,5	2,3	3,5
320	1	2	3,5
330	0,8	1,8	3,5
340	0,5	1,6	3,5
350	0,4	1,4	3,5
360	0,3	1,3	3,5

Tabla 3.12 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de Bentonita en distintas cantidades (continuación).

	Bentonita (gr)		
	0,5	1	2
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
370	0,3	1,1	3,5
380	0,2	0,9	3,1
390	0,2	0,8	2,7
400	0,1	0,6	2,5
410	0,1	0,4	2,3
420	0,1	0,3	2,1

430	0,1	0,3	2
440	0,1	0,3	1,9
450	0,1	0,2	1,8
460	0,1	0,2	1,6
470	0,1	0,2	1,3
480	0,1	0,2	1,2
490	0,1	0,2	1,1
500	0,1	0,2	1
510	0,1	0,2	0,9
520	0,1	0,2	0,9
530	0	0,2	0,8
540	-	0,2	0,6
550	-	0,1	0,5
560	-	0,1	0,4
570	-	0,1	0,3
580	-	0,1	0,2
590	-	0,1	0,2
600	-	0,1	0,2
610	-	0,1	0,2
620	-	0,1	0,2
630	-	0,1	0,2
640	-	0,1	0,2
650	-	0,1	0,1
660	-	0,1	0,1
670	-	0,1	0,1
680	-	0,1	0,1
690	-	0	0,1

Tabla 3.12 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de Bentonita en distintas cantidades (continuación).

	Bentonita (gr)		
	0,5	1	2
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
700	-	-	0,1
710	-	-	0,1
720	-	-	0,1
730	-	-	0,1
740	-	-	0,1
750	-	-	0,1
760	-	-	0,1
770	-	-	0

Tabla 3.13 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de CaCO₃ en distintas cantidades.

	CaCO ₃ (gr)		
	0,5	1	2
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
0	0	0	0
10	0,8	0,8	0,9
20	1,2	0,9	1,1
30	1,4	1,2	1,3
40	1,5	1,3	1,4
50	1,8	1,6	1,6
60	2,1	1,8	1,8
70	2,2	2	2,1
80	2,3	2,1	2,2
90	2,4	2,3	2,3
100	2,4	2,4	2,5

110	2,5	2,4	2,5
120	2,6	2,6	2,6
130	2,6	2,6	2,7
140	2,7	2,7	2,7
150	2,7	2,8	2,7
160	2,8	2,9	2,8
170	2,8	2,9	2,9

Tabla 3.13 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de CaCO₃ en distintas cantidades (continuación).

	CaCO ₃ (gr)		
	0,5	1	2
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
180	2,8	2,9	2,9
190	2,9	3	3
200	2,9	3	3,1
210	2,9	3	3,1
220	2,9	3	3,1
230	2,9	3,1	3,2
240	2,9	3,1	3,2
250	2,6	3,1	3,2
260	2	3,1	3,2
270	1,7	3,1	3,2
280	1,5	3,1	3,2
290	1,2	3,1	3,2
300	1	3,1	3,2
310	0,8	3,1	3,2
320	0,7	3,1	2,8
330	0,5	2,7	2,4
340	0,3	2,4	2,3
350	0,3	2,3	2
360	0,3	2,1	1,9
370	0,3	2	1,7

380	0,2	1,8	1,6
390	0,2	1,7	1,5
400	0,2	1,5	1,3
410	0,2	1,4	1,2
420	0,2	1,2	1,1
430	0,2	1	0,9
440	0,2	0,8	0,8
450	0,1	0,5	0,6
460	0,1	0,4	0,5
470	0,1	0,4	0,5
480	0,1	0,3	0,4
490	0,1	0,3	0,4
500	0,1	0,2	0,4

Tabla 3.13 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de CaCO₃ en distintas cantidades (continuación).

	CaCO ₃ (gr)		
	0,5	1	2
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
510	0,1	0,2	0,3
520	0,1	0,2	0,3
530	0,1	0,2	0,3
540	0	0,1	0,3
550	-	0,1	0,3
560	-	0,1	0,2
570	-	0,1	0,2
580	-	0,1	0,2
590	-	0,1	0,2
520	-	0,1	0,2
530	-	0	0,2
540	-	0,2	0,1
550	-	0,2	0,1
560	-	0,1	0,1
570	-	0,1	0,1

580	-	0,1	0,1
590	-	0,1	0,1
600	-	0,1	0,1
610	-	0,1	0
620	-	0,1	0,3
630	-	0,1	0,3
640	-	0,1	0,3
650	-	0,1	0,3
660	-	0,1	0,2
670	-	0,1	0,2
680	-	0,1	0,2
690	-	0	0,2

Tabla 3.14 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de asfaltenos en distintas cantidades.

	Asfaltenos (gr)		
	0,1	0,25	0,5
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
0	0	0	0
10	0,6	0,7	0,2
20	0,8	0,9	0,4
30	1,2	1,1	0,6
40	1,4	1,4	0,9
50	1,7	1,7	1
60	1,8	1,9	1,2
70	2,1	2	1,2
80	2,2	2,2	1,4
90	2,2	2,4	1,4
100	2,3	2,6	1,4
110	2,4	2,7	1,5
120	2,6	2,9	1,5
130	2,7	3	1,5
140	2,8	3	1,6

150	2,8	3,1	1,6
160	2,9	3,1	1,6
170	2,9	3,2	1,6
180	3	3,2	1,6
190	3	3,2	1,6
200	3	3,2	1,6
210	3	3,2	1,2
220	3	3,2	0,9
230	3	3,3	0,8
240	3	3,3	0,6
250	1,9	3,3	0,4
260	1,5	3,3	0,2
270	1,3	3,3	0,2
280	1,1	3,3	0,2
290	0,9	3,3	0,2
300	0,7	3,3	0,2
310	0,6	3,3	0,2
320	0,5	2,9	0,2

Tabla 3.14 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de asfaltenos en distintas cantidades (continuación).

	Asfaltenos (gr)		
	0,1	0,25	0,5
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
330	0,4	2,4	0,2
340	0,3	2,1	0,2
350	0,3	1,9	0,2
360	0,3	1,7	0,2
370	0,2	1,5	0,1
380	0,2	1,3	0,1
390	0,2	1,2	0,1
400	0,2	1	0,1
410	0,2	0,8	0,1
420	0,1	0,7	0,1

430	0,1	0,6	0,1
440	0,1	0,6	0,1
450	0,1	0,5	0,1
460	0,1	0,5	0
470	0,1	0,5	-
480	0,1	0,5	-
490	0	0,4	-
500	-	0,4	-
510	-	0,4	-
520	-	0,4	-
530	-	0,4	-
540	-	0,3	-
550	-	0,3	-
560	-	0,3	-
570	-	0,2	-
580	-	0,2	-
590	-	0,2	-
600	-	0,2	-
610	-	0,1	-
620	-	0,1	-
630	-	0,1	-
640	-	0,1	-

Tabla 3.14 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para la mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 0,5 % y adición de asfaltos en distintas cantidades (continuación).

	Asfaltos (gr)		
	0,1	0,25	0,5
Tiempo (s)	Altura (cm)	Altura (cm)	Altura (cm)
650	-	0,1	-
660	-	0,1	-
670	-	0,1	-
680	-	0,1	-
690	-	0,1	-
700	-	0,1	-
710	-	0	-

3.3 Interpretación del rol de los alcoholes en la estabilidad de una espuma no acuosa, cambiando el tipo de alcohol

Para entender la acción o rol de los alcoholes en los procesos de estabilización de espumas no acuosas, se procedió a la medición de las propiedades de estas dispersiones de manera experimental, probando con alcoholes con ramificaciones alifáticas de distinta longitudes. Los alcoholes utilizados para esta prueba fueron: n-Butanol, n-Pentanol, n-Octanol, n-Dodecanol.

Para la prueba se procedió a preparar la muestra hidrocarbonada con 0,1 % de los distintos alcoholes a estudiar, además 0,5% de Span 20. Luego, se llevó a cabo la medición de espumabilidad y estabilidad de la espuma según norma ASTM D 892 modificada, descrita anteriormente. Los datos obtenidos para cada una de estas pruebas se encuentran registrados en la tabla 3.15.

Tabla 3. 15 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para sistema Aceite – Kerosene, con Span 20 al 0,5 % y distintos tipos de alcohol al 0,1 %.

Tiempo (s)	Tipo de Alcohol al 0,1 % v/v				
	Sin alcohol	n-Butanol	n-Pentanol	n-Octanol	n-Dodecanol
	Altura de espuma (cm)				
0	0	0	0	0	0
10	0,7	0,2	0,2	0,4	0,4
20	1,1	0,3	0,3	0,5	0,6
30	1,2	0,4	0,3	0,5	0,7

Tabla 3. 15 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para sistema Aceite – Kerosene, con Span 20 al 0,5 % y distintos tipos de alcohol al 0,1 % (continuación).

Tiempo (s)	Tipo de Alcohol al 0,1 % v/v				
	Sin alcohol	n-Butanol	n-Pentanol	n-Octanol	n-Dodecanol
	Altura de espuma (cm)				
40	1,5	0,4	0,3	0,5	0,9
50	1,8	0,4	0,3	0,5	0,9
60	1,9	0,4	0,3	0,5	0,9
70	2	0,4	0,4	0,5	1
80	2,1	0,4	0,4	0,5	1
90	2,3	0,4	0,4	0,5	1,1
100	2,4	0,4	0,4	0,5	1,1
110	2,5	0,4	0,2	0,5	1,2
120	2,6	0,1	0,1	0,5	1,2
130	2,7	0	0	0,3	1,3
140	2,8	-	-	0,1	1,3
150	2,8	-	-	0,1	1,4
160	2,8	-	-	0	1,4
170	2,8	-	-	-	1,4
180	2,8	-	-	-	1,5
190	2,8	-	-	-	1,5
200	2,8	-	-	-	1,5
210	2,8	-	-	-	1,5
220	2,9	-	-	-	1,5
230	2,9	-	-	-	1,5
240	2,9	-	-	-	1,5
250	2,9	-	-	-	1,5
260	2,9	-	-	-	1,5
270	3	-	-	-	1,5
280	3	-	-	-	1,5
290	3	-	-	-	1,1
300	3	-	-	-	0,8
310	3	-	-	-	0,5
320	2,4	-	-	-	0,3
330	2,3	-	-	-	0,2
340	2,1	-	-	-	0,2
350	2	-	-	-	0,1

360	1,9	-	-	-	0
370	1,8	-	-	-	-
380	1,5	-	-	-	-

Tabla 3. 15 Datos de pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para sistema Aceite – Kerosene, con Span 20 al 0,5 % y distintos tipos de alcohol al 0,1 % (continuación).

Tiempo (s)	Tipo de Alcohol al 0,1 % v/v				
	Sin alcohol	n-Butanol	n-Pentanol	n-Octanol	n-Dodecanol
	Altura de espuma (cm)				
390	1,1	-	-	-	-
400	0,8	-	-	-	-
410	0,6	-	-	-	-
420	0,5	-	-	-	-
430	0,4	-	-	-	-
440	0,2	-	-	-	-
450	0,2	-	-	-	-
460	0,2	-	-	-	-
470	0,1	-	-	-	-
480	0,1	-	-	-	-
490	0,1	-	-	-	-
500	0,1	-	-	-	-
510	0,1	-	-	-	-
520	0,1	-	-	-	-
530	0,1	-	-	-	-
540	0,1	-	-	-	-
550	0,1	-	-	-	-
560	0,1	-	-	-	-
570	0,1	-	-	-	-
580	0,1	-	-	-	-
590	0,1	-	-	-	-
600	0	-	-	-	-

3.4 Comparación de los diferentes regímenes de formación y colapso

Para el estudio de los regímenes de formación y colapso, en primera instancia se procedió a la construcción de las curvas de comportamiento de altura con respecto al tiempo para cada una de las pruebas realizadas.

Luego, de estudiar las tendencias de los segmentos de las curvas productos de la zona de inyección de gas hasta el equilibrio de Bikerman, y haciendo comparaciones con los modelos de regímenes de formación pre-establecidos, que se muestran en la figura 3.4.

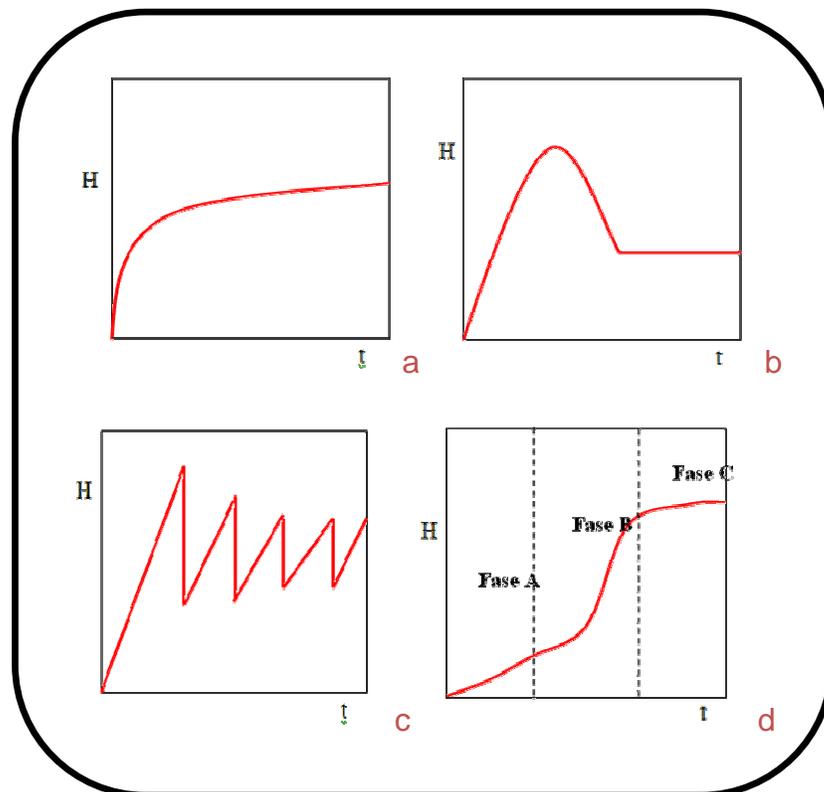


Figura 3. 4 Regímenes de formación de espuma, (a) Tipo Bikerman, (b) Tipo Campana, (c) Tipo Pulsante, (d) Tipo Sigmoide.

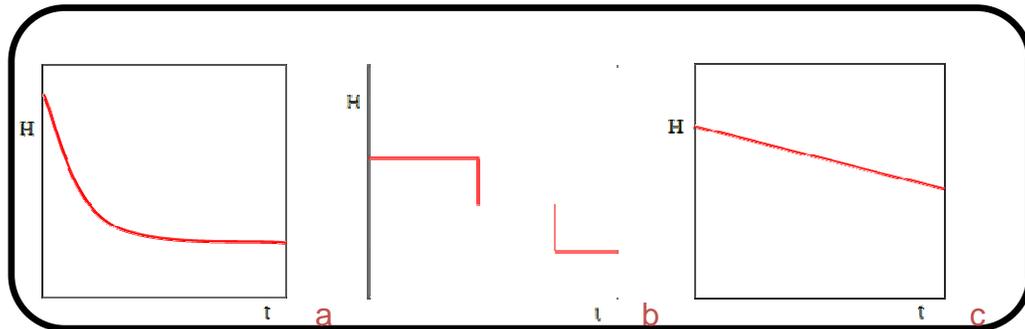


Figura 3. 5 Regímenes de colapso, (a) Tipo Exponencial Negativo, (b) Tipo Escalonada, (c) Tipo cuasi rectilíneo.

Para definir el régimen de colapso de las curvas obtenidas se procedió a comparar las curvas de espumabilidad y estabilidad, en el segmento de decaimiento, con los regímenes parámetros que se muestran en la figura 3.5

3.5 Equipos, materiales y sustancias

Equipos

- Agitador magnético con calentamiento, modelo Fisher versamix con plato de acero inoxidable de 15 cm de diámetro.
- Balanza digital de 200 gramos de capacidad, marca Denver Instrument Company, modelo TR - 4102.
- Balanza electrónica: apreciación $\pm 0,01$ gr.
- Baño termostataado con recirculación.
- Equipo de formación de espuma.
- Equipo de destilación.
- Tensiómetro superficial de anillo CSC-Du NOÜY.
- Viscosímetro Cannon-Fenske (flujo reversible) para líquidos opacos, No. 100.

- Viscosímetro Fann, marca Baroid Testing Equipment, modelo 35 A, 3–600 rpm.
- Agitador magnético con calentamiento, modelo Fisher versamix con plato de acero, Inoxidable de 15 cm de diámetro.
- Balanza digital de 200 gramos de capacidad marca Denver Instrument Company, modelo TR - 4102.
- Balanza electrónica: Apreciación $\pm 0,01$ gr.
- Baño térmico con recirculación.
- Equipo de formación de espuma
- Equipo de destilación.
- Tensiómetro interfacial de anillo CSC-Du NOÜY.
- Viscosímetro Cannon-Fenske (flujo reversible) para líquidos opacos, Número 100.
- Viscosímetro Fann, marca Baroid Testing Equipment, modelo 35 A. Rango: 3 – 600 rpm.

Materiales

- Bombona de CO₂ con regulador.
- Cilindros graduados de 10ml y 50ml.
- Cronómetro: apreciación $\pm 0,01$ min
- Rotámetro máx. 150ml ± 2 ml
- Gotero.
- Mangueras de alta presión.
- Piedras difusoras.
- Pinzas.
- Soporte universal.
- Termómetro: apreciación ± 1 °C
- Tubos calibrados de 10ml.

3.6 Muestra de cálculo

3.6.1 Cálculo de la altura de la espuma (He)

Las alturas obtenidas para cada una de las pruebas de espumabilidad, representan la altura del líquido más la altura de la espuma, por ello es importante calcular sólo la altura de la espuma, para su posterior estudio.

$$\text{Altura de espuma (He)} = \text{Altura medida (H)} - \text{Altura inicial (Hi)} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Para el primer punto de la prueba con variación de concentración de Span 20 al 0,25 %, de la tabla 3.5:

$$\text{He} = 7,7 \text{ cm} - 7,7 \text{ cm} = 0 \text{ cm}$$

De esta manera, se calcularon todas las alturas de líquido y de espuma para cada una de las pruebas.

3.6.2 Cálculo de EACN promedio

Teniendo los valores tabulados del EACN del aceite mineral y el kerosén, se calculó el EACN de las distintas mezclas, siempre asumiendo que el comportamiento de la propiedad en la mezcla es lineal.

$$\text{EACN}_m = X_a \text{EACN}_a + Y_k \text{EACN}_k \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

$$\text{EACN}_a = 20$$

$$\text{EACN}_k = 10$$

X_a = fracción de Aceite mineral en la mezcla

Y_k = fracción de Kerosene en la mezcla

Para la mezcla 80% aceite – 20% kerosén, se tiene:

$$\text{EACN Mezcla} = 0,8 \times 20 + 0,2 \times 10 = 18$$

Este resultado, y los EACN para las demás mezclas se encuentran reportados en la tabla A.1 de los anexos A.

CAPITULO IV. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Resultados y discusión

4.1.1 Realización de Pruebas Exploratorias para la Calibración del Equipo de Espumas

En la figura 4.1 se muestra el montaje final del equipo piloto diseñado para medir la espumabilidad y estabilidad de una espuma no acuosa en operación, con una mezcla hidrocarbonada de 80% aceite – 20% kerosén. El diseño tiene la ventaja que se puede trabajar simultáneamente con dos columnas de espumeo.



Figura 4. 1 Equipo ASTM-D 892 modificado, utilizado para medir Espumabilidad y estabilidad de espumas no acuosas.

4.1.1.1 Pruebas preliminares

En primera instancia se trató de conseguir una espuma con una cierta estabilidad, que permitiera estudiar de manera satisfactoria tanto las características de la espuma como los regímenes de formación y colapso de la dispersión.

Se realizaron una cantidad de pruebas con una mezcla de aceite-kerosén a distintas relaciones, sin lograr resultados satisfactorios. A continuación, utilizando las referencias teóricas [3, 6, 7], se procedió a realizar pruebas con la adición de Span 20 como surfactante para dar estabilidad a la espuma.

Para ninguna de estas pruebas se obtuvieron resultados satisfactorios, ya que las espumas no tenían suficiente estabilidad como para poder estudiar su comportamiento en el tiempo.

La piedra difusora utilizada para cada una de estas experiencias iniciales, fue una piedra cilíndrica, utilizada comercialmente para oxigenar peceras caseras. Para obtener una espuma de mayor volumen, esta piedra cilíndrica fue sustituida por una piedra esférica certificada, con una porosidad de , diseñada para inyectar gases en mezclas apolares (aceitosas).

Los resultados obtenidos, en una prueba con sistema hidrocarbonado con Span 20, con el uso de las distintas piedras se puede apreciar en la figura 4.2. La espumabilidad del sistema utilizando la piedra difusora esférica aumenta un 300% con respecto a la misma prueba utilizando la piedra difusora cilíndrica.

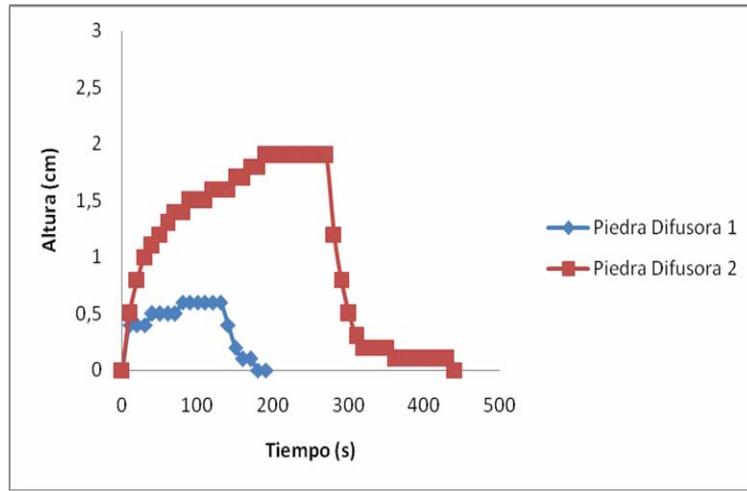


Figura 4.2 Espumabilidad y estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada, con Span 20 al 1,0%, con: (1) piedra cilíndrica y (2) piedra esférica (80% aceite-20% kerosén temperatura 30 °C con un flujo de gas de 70 mL/s a 20 psia).

La diferencia en los niveles de espumabilidad, con la sustitución de la piedra, se puede atribuir principalmente a las características porosas de cada una de estas. La piedra cilíndrica utilizada inicialmente presentó cierta descomposición con el uso, y agujeros en su superficie, notablemente más grandes que los encontrados en la segunda piedra; por otra parte la piedra certificada, además de su favorable forma cilíndrica para garantizar la uniformidad de la distribución de burbuja, también presenta poros más pequeños que ayudan a la estabilidad de la dispersión.

4.1.1.2 Definición de parámetros operativos

Para establecer los parámetros a utilizar en cada una de las pruebas, se procedió a estudiar el comportamiento de sistemas con distintas

relaciones aceite – Kerosene. Los resultados de altura de espuma en función del tiempo se encuentran reflejados en la figura 4.3.

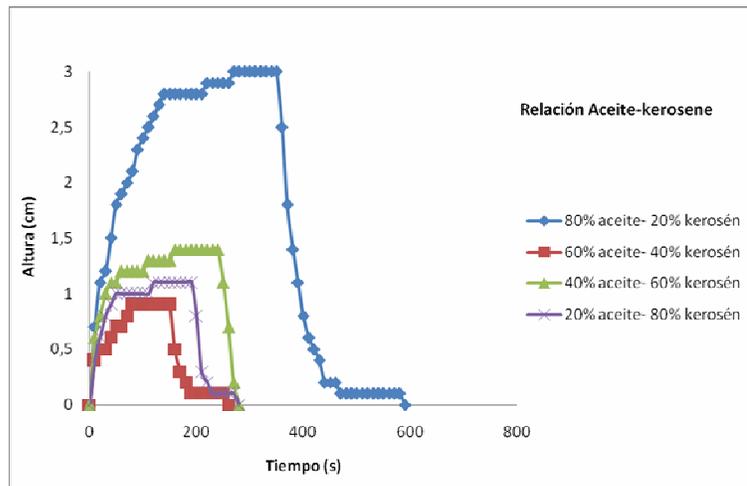


Figura 4.3 Espumabilidad y estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada variando relación Aceite-kerosene, con Span 20 al 0,5% (30 °C con un flujo de gas de 70 mL/s a 20 psia).

Para el sistema de 80% aceite, se obtuvo una altura máxima de espuma de 3 cm, además de una estabilidad del sistema bastante considerable. Para las siguientes pruebas se fue disminuyendo el porcentaje de aceite presente en la mezcla, obteniéndose alturas máximas de espumas cada vez menores y estabilidades considerablemente reducidas, como se muestra en la figura 4.3. La disminución de la espumabilidad y la estabilidad de espuma, con el aumento del kerosén y la disminución del aceite, se puede atribuir a la disminución de la viscosidad del sistema, ya que el Aceite es más viscoso que el kerosene.

Por tales razones se seleccionó el sistema 80% aceite, ya que permite la formación de espuma suficiente para llevar a cabo un estudio del

comportamiento de la espuma con la modificación de otras variables.

Por otra parte, se hizo necesario establecer parámetros de flujo para cada una de las pruebas a realizar. Por lo que se realizaron pruebas con un sistema 80% Aceite-20% kerosene, y flujos de N₂ de 40 ml/s, 70 ml/s y 100 ml/s. En la grafica 4.4 se observa el comportamiento obtenido para esta serie de pruebas. Se puede apreciar que con 100 ml/sde flujo de gas se obtuvo una máxima espumabilidad de 6 cm. Para un flujo de 70 ml/s se obtuvo una altura de espuma de 3 cm, representando valores intermedios para las pruebas de flujo realizadas, Con el cual se tiene un grado de holgura en las alturas registradas, para así agregar otros espumantes; también, permite la comparación con otras investigaciones [3, 6].

<

Figura 4.4 Espumabilidad y estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada variando flujo de gas N₂, con Span 20 al 0,5% (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, 20 psia).

Ya con parámetros de flujo y composición de muestra establecidos, se hizo necesario establecer el volumen de mezcla a espumar. En la figura 4.5 se presentan resultados de pruebas de espumabilidad para sistemas con un volumen inicial de muestra de 100 ml, 200 ml y 300 ml.

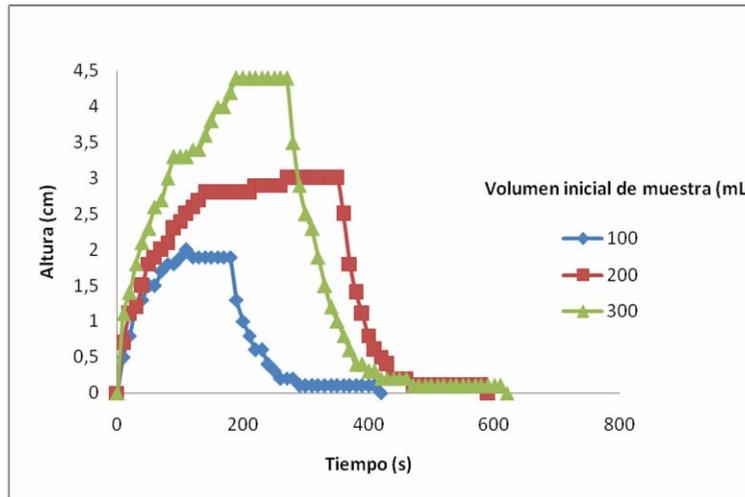


Figura 4.5 Espumabilidad y estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada variando volumen inicial de mezcla, con Span 20 al 0,5% (80% aceite-20% kerosén, 30°C, flujo de gas de 70 ml/s y 20 psia).

Para cada una de las pruebas se obtuvieron sistemas espumosos con cierta estabilidad, siendo la prueba de mayor espumabilidad la de 300 ml con altura de 4,5 cm. Es importante resaltar que la disminución de la espumabilidad de los sistemas fue proporcional a la reducción del volumen inicial de la muestra, ya que en la prueba de 200 ml se obtuvo una altura de espuma 33% menor que la prueba de 300 ml,; de igual manera la prueba de 100 ml presentó una disminución en su altura máxima de 33% en comparación con la experiencia de 200 ml de muestra.

Se seleccionó un volumen de 200 mL para el estudio, con el cual se obtiene una espumabilidad suficientemente alta, y no se tiene un gasto excesivo de aceite mineral.

4.1.2 Formulaciones de Espumas de Hidrocarburos, Variando la Concentración y Tipo de Surfactante, Relación Agua-Aceite, el EACN (Número de Alcano Equivalente del Aceite), el Flujo de Gas y la Viscosidad del Aceite (por adición de sólidos)

4.1.2.1 Variación de la concentración y tipo de surfactante

Para el estudio del efecto de la concentración y tipo de surfactante, se realizaron pruebas con Span 20, Tween 20 y Span 80. En la figura 4.6 se reporta la variación de la espumabilidad en la mezcla hidrocarbonada, usando el surfactante no iónico Span 20 a diferentes concentraciones.

En dicha figura se observa un aumento considerable de la espuma a la concentración de 0,5 % del surfactante, respecto a las otras concentraciones; las cuales tienen un comportamiento similar: espumas de baja calidad con alto contenido de líquido. También, se puede apreciar que a medida que a concentraciones diferentes de 0,5% los sistemas disminuyen su espumabilidad, sin importar si la concentración está por encima o por debajo de 0,5% . Resultados similares fueron obtenidos por Anderson [3] y Sheng [6].

Tales resultados llevan a pensar que a la concentración de 0,5%, a la cual se alcanzó mayor espumabilidad, la solución se encuentra muy cerca de la concentración micelar crítica (CMC), tal como se reporta en la literatura. [1,18] Entonces, para concentraciones mayores a 0,5 %, sólo se logra aumentar la concentración de micelas y no la cantidad de surfactante adsorbido en la interface líquido-gas, es por eso que la espumabilidad en vez de aumentar, disminuye. Por debajo de la CMC, no hay micelas formadas y la cantidad de surfactante no es suficiente para formar una espuma de alta calidad.

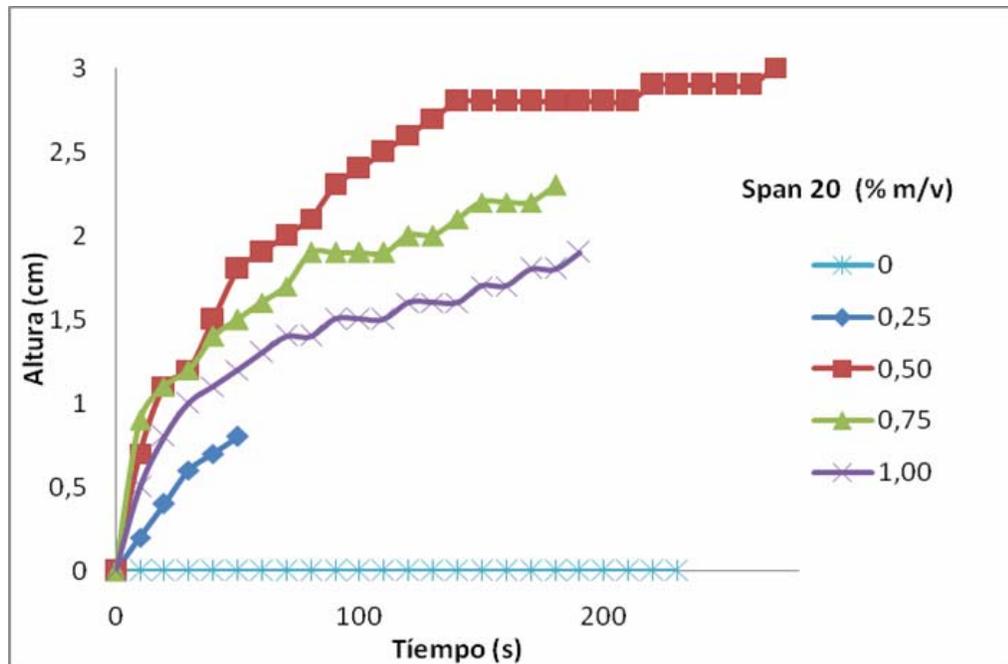


Figura 4.6 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con variación en la concentración de Span 20(80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

Para el estudio de la estabilidad se muestra en la figura 4.7 donde se presenta el comportamiento de la espuma desde el momento en que se cierra el flujo de gas y empieza el proceso de colapso. A pesar de que la concentración de 0,5 % reportó la mayor espumabilidad del sistema, ésta no fue la prueba de mayor estabilidad de espuma, ya que la experiencia realizada con 0,75% de Span presentó un tiempo de permanencia superior, de mas de 250 segundos. A pesar de esta, la CMC (0,5% m/v) arrojó valores de estabilidad importantes que lo ubican como la segunda concentración más estable.

Para las otras dos pruebas se encuentra una estabilidad de espuma no superior a los 200 segundos, en comparación con las concentraciones de 0,5 y 0,75%.

Sin embargo, es importante resaltar que tanto para la espumabilidad como estabilidad de espuma todas las concentraciones de Span 20 probadas, condujeron a sistemas espumosos mucho más estables que sin la acción del surfactante.

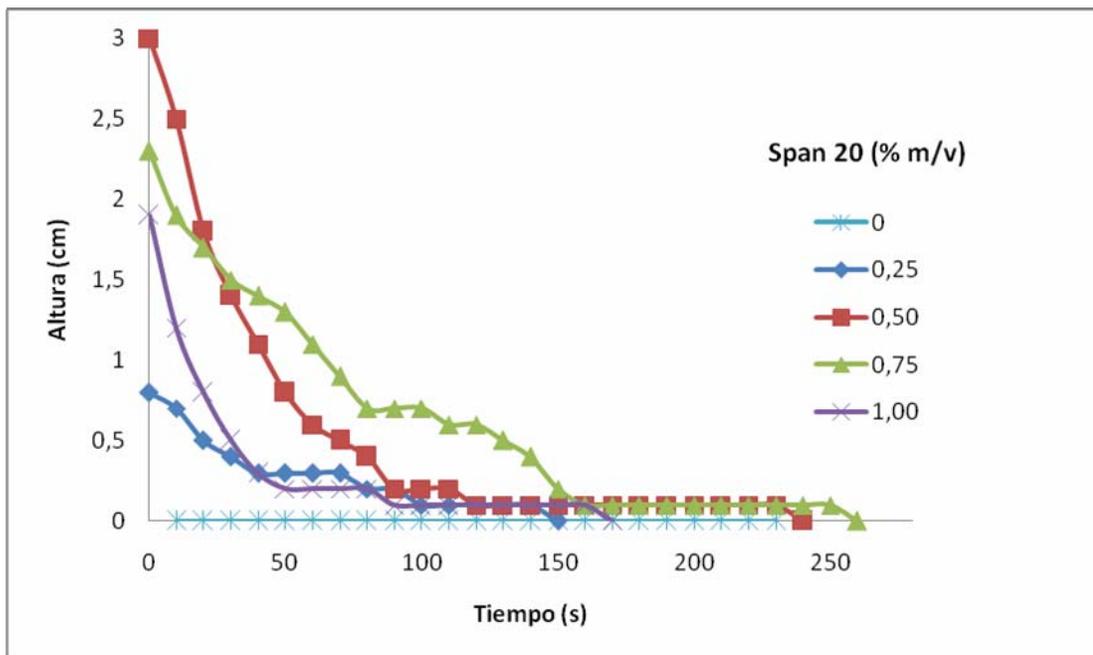


Figura 4.7 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con variación en la concentración de Span 20(80% Aceite-20% Kerosene, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

En el caso del Span 80 se realizaron pruebas en un sistema 80% aceite-20% kerosén con concentraciones de: 0,05%; 0,1%; 0,25% y 0,50 %, como se muestra en la figura 4.8.

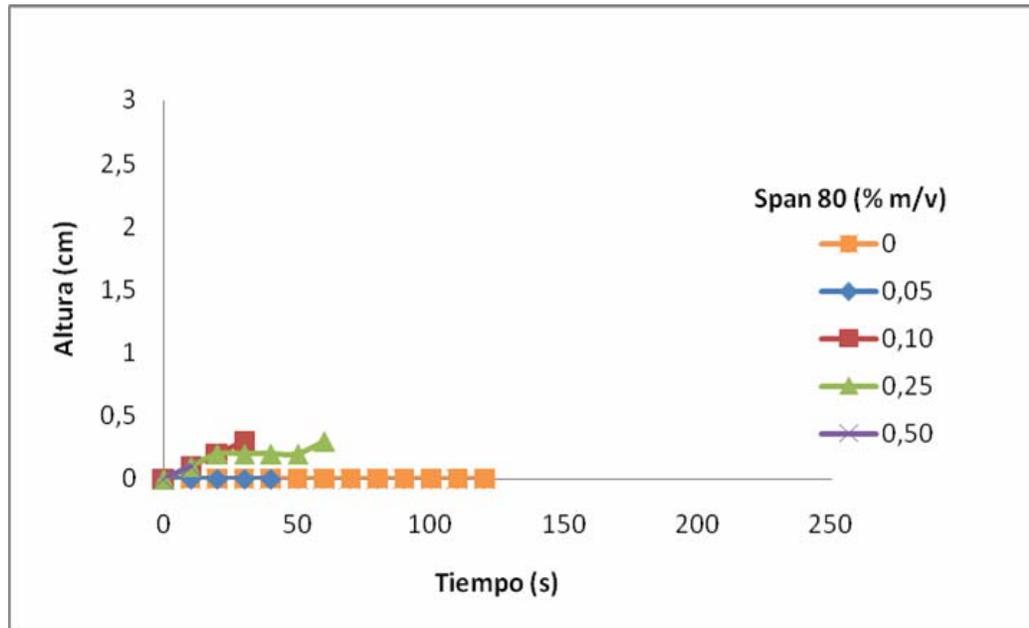


Figura 4.8 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con variación en la concentración de Span 80 (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

Para cada una de las pruebas realizadas con la adición de Span 80 se obtuvo una baja espumabilidad, siendo la prueba con 0,10 % la de mayor incidencia en la espuma con una altura máxima de 0,3 cm. A pesar de que en la experiencia con la adición de un 0,25 % de Span 80 se obtuvo una altura igual a la alcanzada en la prueba de 0,1 %, pero desplazada en el tiempo. Para la prueba con un 0,05 % de surfactante no se obtuvo espuma.

Para el caso de la estabilidad en los sistemas con adición del Span 80, se presentan las curvas de colapso en la figura 4.9, las cuales muestran una persistencia superior a los 100 segundos, respecto a las concentraciones de 0,1 y 0,25%. Para el caso de las otras concentraciones, los tiempos de persistencia no superan los 50 segundos, demostrando el alto grado de evanescencia de estos sistemas. A los resultados indican que el Span 80 no

es un buen espumante en sistemas no acuosos.

Se probaron distintas concentraciones del surfactante Tween 20, para la mezcla establecida de hidrocarburos, estudiando las características de la espuma. Los resultados obtenidos para cada una de estas concentraciones en función del tiempo se reportan en las figuras 4.10 y 4.11

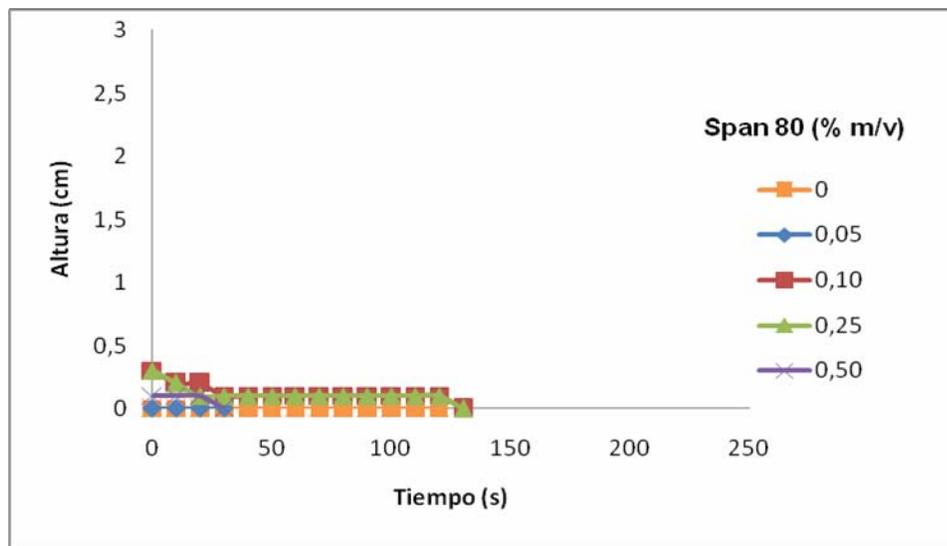


Figura 4.9 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con variación en la concentración de Span 80 (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

El sistema con 0,25% m/v de Tween 20 resultó ser el de mayor espumabilidad con una altura máxima de 0,6 cm, y los demás sistemas presentaron alguna espumabilidad que se evidencia en alturas superiores a los 0,25 cm. Estudiando el conjunto de curvas se aprecia la existencia de un punto crítico que se puede considerar CMC a la concentración de 0,25%, ya que a concentraciones menores o mayores disminuye la espumabilidad.

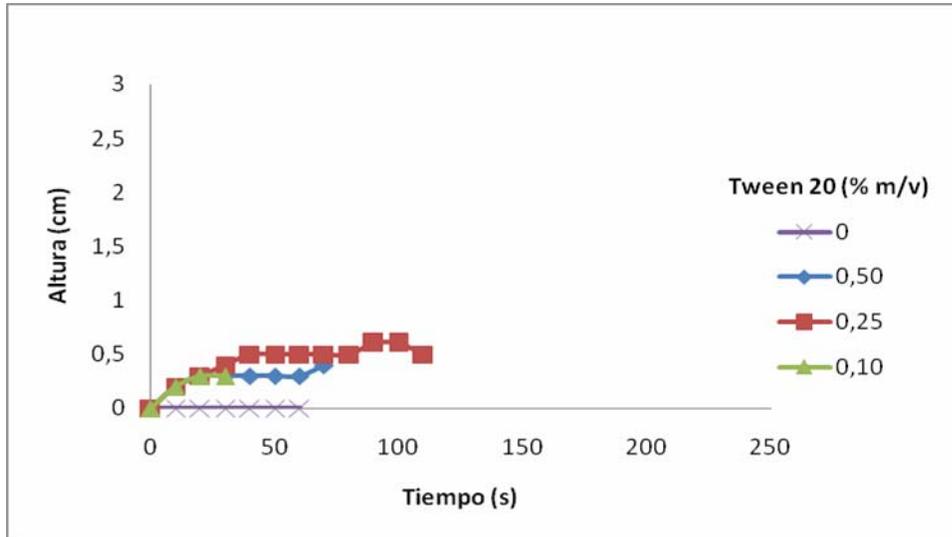


Figura 4.10 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con variación en la concentración de Tween 20 (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

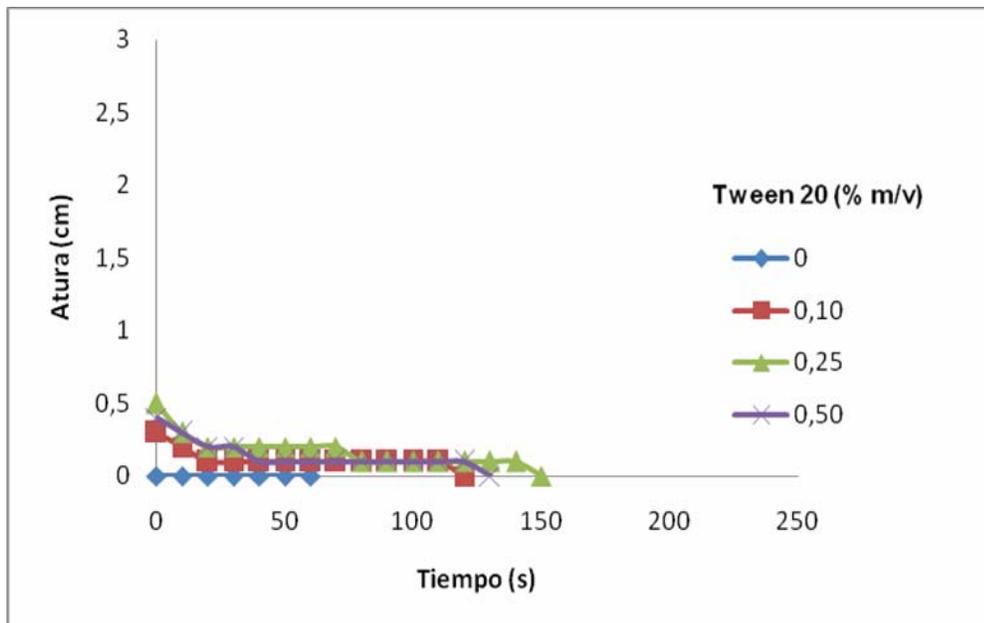


Figura 4.11 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con variación en la concentración de Tween 20 (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

La estabilidad de espuma para los sistemas elaborados con diferentes concentraciones de Tween 20, se encuentran expuestos en la figura 4.11. Aquí resalta el comportamiento estable del sistema con 0,25 % de Tween 20, ya que se presentan tiempos de estabilización hasta 150 s. Las pruebas con 0,10 % y 0,5% del surfactante también presentaron una estabilidad considerable de más de 100 s.

Comparando el desempeño de los tres surfactantes, como espumantes, a una misma concentración, se construyó la figura 4.12, donde se presentan las curvas de espumabilidad de sistemas a 0,25 % de concentración de los distintos tensoactivos.

El Span 20 resultó ser el espumante de mayor efectividad, teniendo una altura de espuma máxima superior en un 33 % a la del Tween 20, y en un 166% a la del Span 80. El Span 20 a pesar de ser un surfactante con un HLB mayor al del Span 80, parece tener mejor acción en el favorecimiento de la aparición de espumas en sistemas no acuosos, lo cual contradice la teoría existente, ya que a menor HLB el comportamiento espumante debería ser mayor para sistemas aceitosos y menor para sistemas acuosos según hipótesis teóricas [4]; pero en otros estudios experimentales se confirma que el Span 20 es mejor espumante, en gran rango de concentraciones y flujo, que el Span 80 [1,2,3].

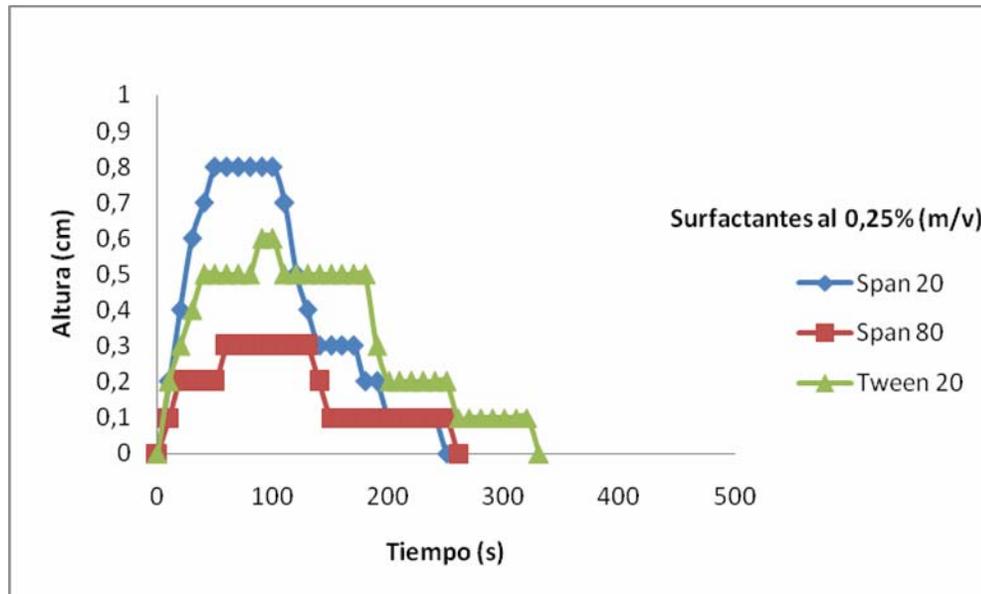


Figura 4.12 Espumabilidad y estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada, con adición de distintos surfactantes al 0,25% (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

Desde el punto de vista molecular el Tween 20 presenta una estructura similar a la del Span 20, pero con 20 grupos de óxido de etileno que le confieren mayor hidrofiliidad respecto al Span 20. Esto parece influir de manera drástica en la espumabilidad ya que para un mismo sistema la altura de espuma y la rapidez de formación de éstas es considerablemente menor en el surfactante polietoxilado que en el Span 20.

En el análisis de la estabilidad de la espuma, se encontró una gran similitud en los tiempos de colapso de las espumas para los sistemas presentados en la figura 4.12 siendo el más estable el Tween 20 con una persistencia de más de 300 s. Hay que agregar que el Tween 20 se encontraba a una concentración que se supone muy cercana a la CMC, a diferencia del Span 20 cuya concentración no es suficiente para abastecer

por completo la monocapa interfacial, lo que reduce su efecto estabilizante.

4.1.2.2 Relación Agua-Aceite

En las figura 4.13 y 4.14 se muestra que tanto la espumabilidad como la estabilidad es afectada favorablemente con el incremento del porcentaje de agua en la mezcla hidrocarbonada, obteniéndose un aumento entre 3,33 a 13,3 % en la espumabilidad y entre 44 a 56 % en la estabilidad, respecto al valor inicial de la mezcla aceite- kerosén con Span 20 al 0,5 % m /v, para un corte de Agua de 0,5 y 1% respectivamente. En el caso de fracciones de agua superiores (5%) se nota una disminución radical de las propiedades de la espuma.

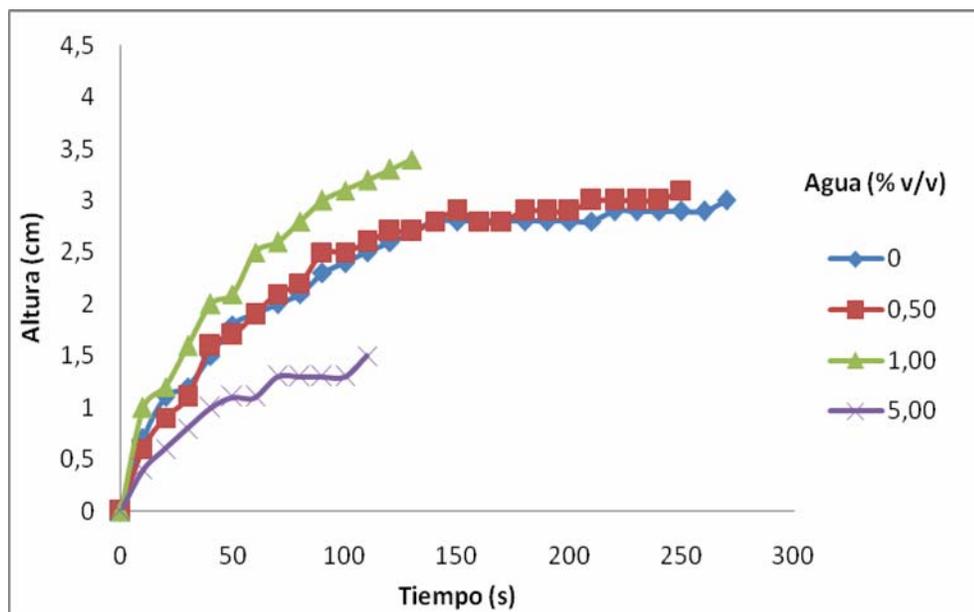


Figura 4.13 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con variación en el corte agua y Span 20 al 0,5% m/v (80% aceite-20% kerosene, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

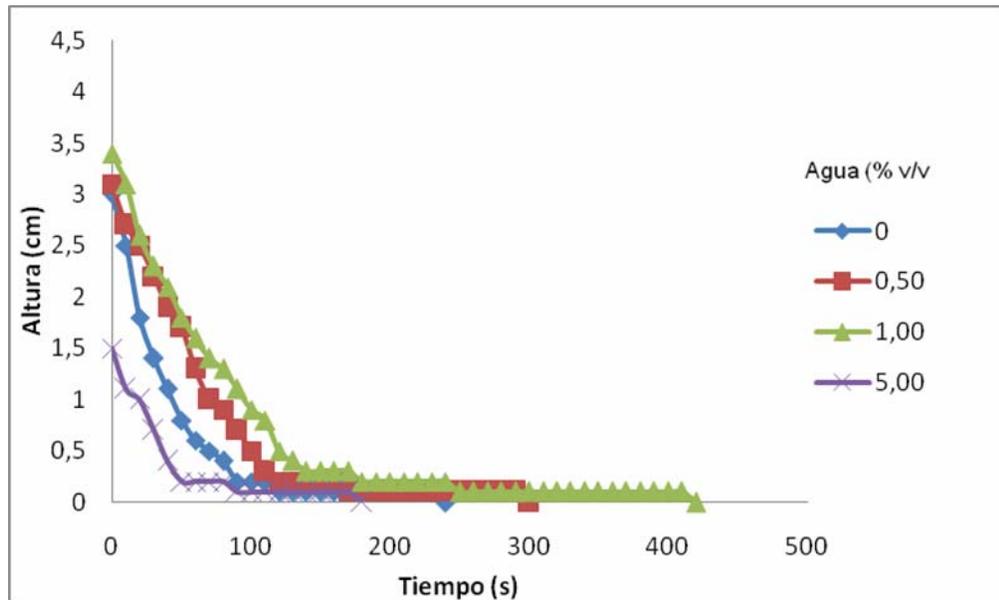


Figura 4.14 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con variación en el corte agua y Span 20 al 0,5% m/v (80% aceite-20% kerosene, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

En este caso, se infiere que pequeñas cantidades de agua forman una capa insoluble en la interface de las burbujas proporcionándoles una estabilidad extra, pero en el caso de que las cantidades sean mayores como el 5%, el agua forma una nueva fase en la mezcla que actúa como antiespumante.

4.1.2.3 Variación del EACN

Mezclando diferentes proporciones de aceite y kerosén, se logró obtener diferentes EACN; 12, 14, 16 y 18. Las pruebas de espumabilidad y estabilidad de espuma para con la adición de Span 20 al 0,5% m/v se encuentran graficadas en las figuras 4.15 y 4.16.

La prueba con mayor espumabilidad resultó ser la de EACN 18 (mezcla 80:20 aceite-kerosén), con una altura de espuma de 3 cm. Para las otras pruebas se evidenció una reducción de la espumabilidad a medida que la mezcla poseía un menor EACN. Para el EACN 16 se redujo la altura de espuma en un 70 %, para el EACN 14 se redujo en 53% y para el EACN 12 en 63%, todo esto con respecto a la prueba EACN 18.

Esta reducción considerable en la espumabilidad puede ser atribuida a la disminución de la viscosidad del sistema a medida que se redujo el EACN. Cuando la viscosidad disminuye los mecanismos de coalescencia de las burbujas se apresuran, ya que el drenaje del líquido en el fondo de la columna se facilita, las burbujas disminuyen su película líquida, y se forman dispersiones muchos más grandes de menor estabilidad.

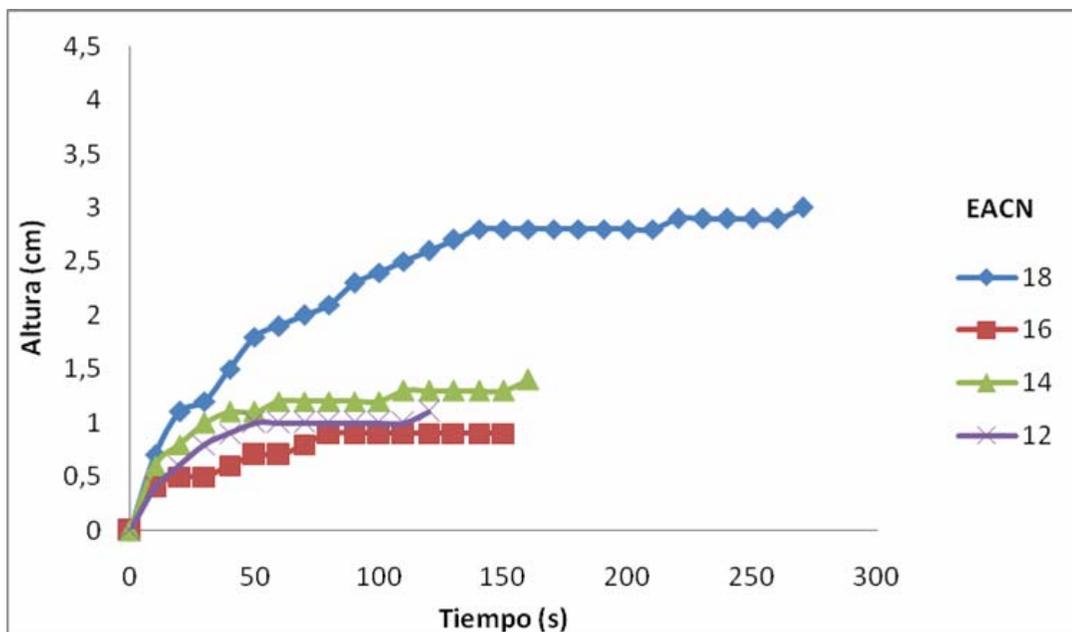


Figura 4.15 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con variación de EACN y Span 20 al 0,5% m/v (30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

Con respecto a la estabilidad se presenta el mismo caso, a mayor EACN (que significa un aumento de viscosidad) persistencia en el tiempo, siendo la prueba de EACN 18 la de mayor duración con 240 segundos desde que se cierra la inyección del gas hasta la existencia de la última espuma.

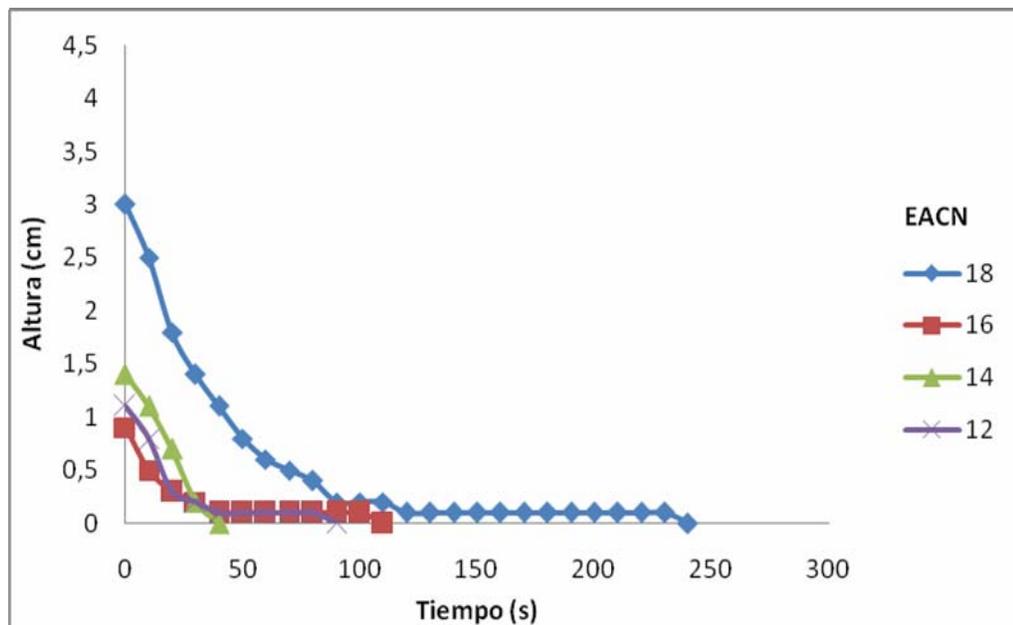


Figura 4.16 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con variación de EACN, y Span 20 al 0,5% m/v (30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

4.1.2.4 Variación del flujo de gas N₂

Para demostrar la influencia del caudal utilizado en la inyección de gas, se realizaron pruebas de espumabilidad a distintos flujos de gas N₂, en la muestra hidrocarbonada 80 % aceite- 20% kerosén, con adición de 0,5 % de Span 20 para aumentar la espumabilidad. Las curvas se encuentran graficadas en las figuras 4.17 y 4.18

Las pruebas se empezaron con un flujo de 40 ml/s de gas N₂, obteniendo una altura máxima de espuma de 1,4 cm, luego al incrementar el flujo esta altura se vió aumentada a 3 cm y 6 cm para 100 y 130 ml/s de flujo, respectivamente. Para el caso del flujo de 130 ml/s no se dió el incremento de espumabilidad esperado, ya que se obtuvo una reducción del 85% en la espumabilidad, con respecto a la prueba más cerca de 100 ml/s de flujo.

Entonces, el flujo de 100 ml/s representa un punto crítico, ya que a valores más altos no se consigue aumentar la espumabilidad. Lo que define el comportamiento del flujo en la formulación de espumas no acuosas como una variable no lineal, que encuentra puntos de inflexión, como es el caso de la prueba a los 100 ml/s.

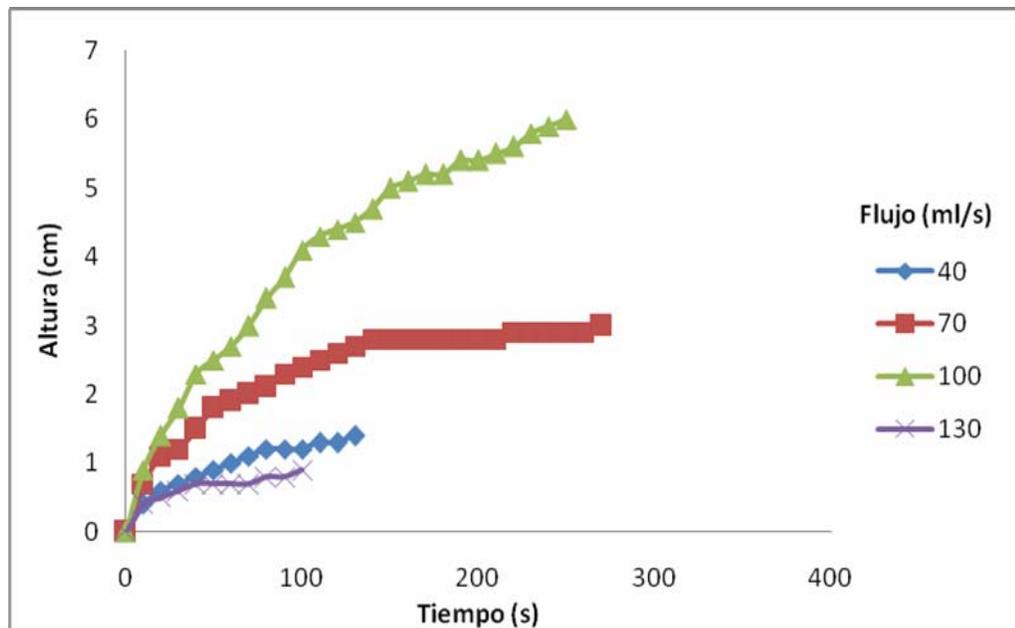


Figura 4.17 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con variación del flujo de N₂, y Span 20 al 0,5% m/v (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, 20 psia).

Para la estabilidad de espuma se aprecian los valores de altura de espuma con respecto al tiempo en la figura 4.18. aquí se evidencia un comportamiento similar al de la espumabilidad, ya que existe un incremento de la estabilidad a medida que se aumenta el caudal, teniendo un máximo a los 100 ml/s con un tiempo de persistencia de 400 s, para luego reducirse drásticamente en un 65% para el flujo de 130 ml/s.

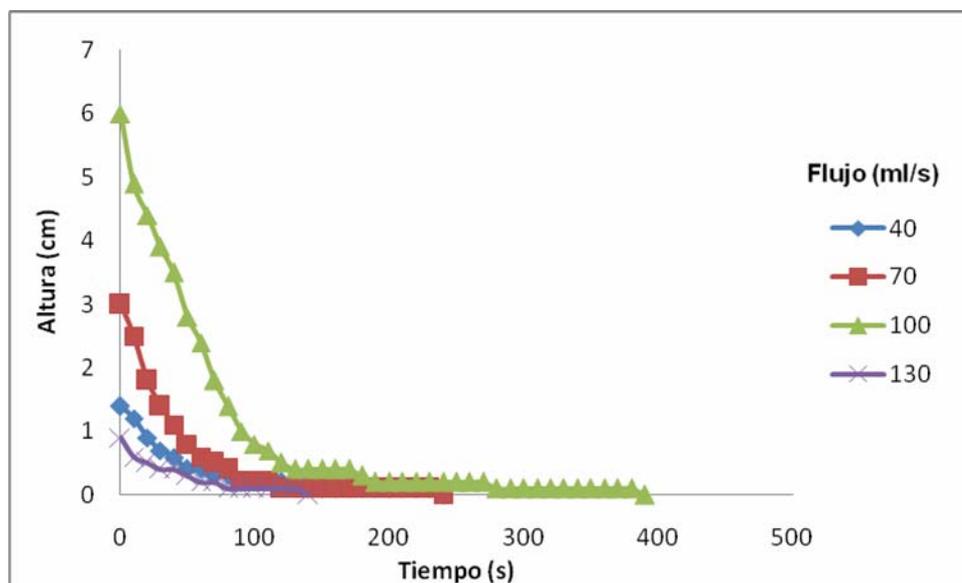


Figura 4.18 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con variación del flujo de N_2 , y Span 20 al 0,5% m/v (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, 20 psia).

4.1.2.5 Variación de la viscosidad del aceite (por adición de sólidos)

En las figuras 4.19 a 4.22 se observa el efecto de la adición de sólidos hidrofílicos (alterando la viscosidad) como la bentonita y el carbonato de calcio, sobre la espumabilidad de una mezcla hidrocarbonada con Span al 0,5% m/v. La selección de estos sólidos fue debido a su rol fundamental en la formulación de los lodos de perforación, y por lo tanto, forman parte de los

ripios de perforación; con la posibilidad de encontrarse en la producción de crudos.

Las viscosidades de los sistemas con 0,5, 1 y 2 g de bentonita fueron 0,7618, 1,0812 y 1,3171cp respectivamente.

En cuanto a la espumabilidad, con 2 g de bentonita se produce un aumento del 17% en la altura máxima de la espuma; mientras que con 2 g de carbonato de calcio se produce un aumento del 7% respecto al sistema sin sólido. Para el tiempo total de colapso de la espuma, con 1 g de bentonita la espuma tarda en colapsar 1,7 veces más que sin bentonita; y con 1 g de carbonato el factor de tiempo es de 1,6 veces. Para cada una de las cantidades de bentonita y carbonato se aprecia un pequeño aumento de las propiedades de la espuma, pero la cantidad de 2 g tiene mayor influencia para ambos tipos de sólidos.

Con 2 g de sólido se alcanzan tiempos de persistencias superiores a los 400 segundos para ambos sólidos, lo que resulta en sistemas más estables, donde el sólido tiene gran influencia en el retardo de los mecanismos de colapso de las espumas no acuosas.

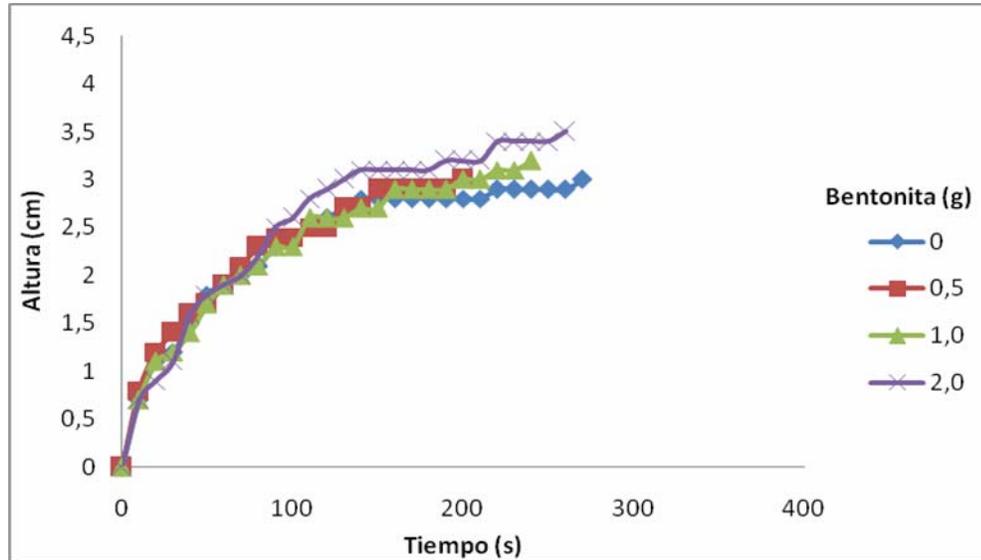


Figura 4.19 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y adición de Bentonita (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 mL/s, 20 psia).

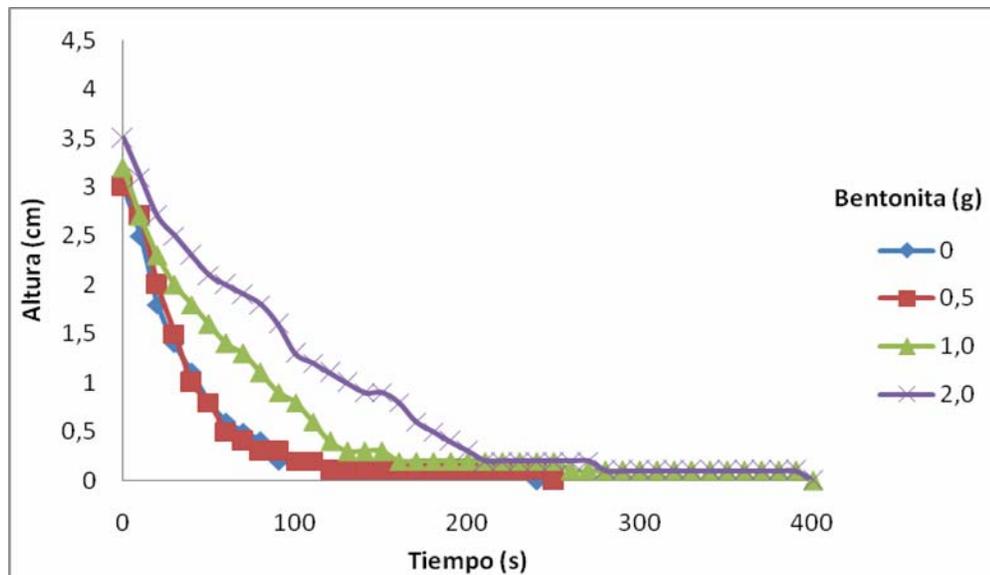


Figura 4.20 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y adición de Bentonita (80% aceite-20% kerosene, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

Las viscosidades para los sistemas con 0,5, 1, y 2 g de CaCO_3 fueron 0,7603, 0,9232 y 1,1814 cp respectivamente.

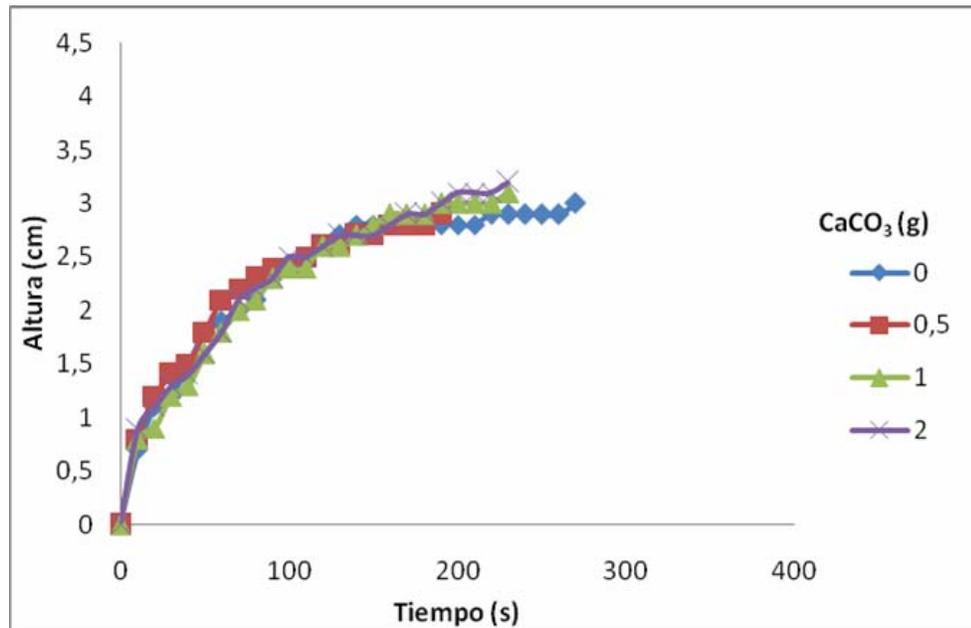


Figura 4.21 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y adición de CaCO_3 (80% aceite-20% kerosene, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

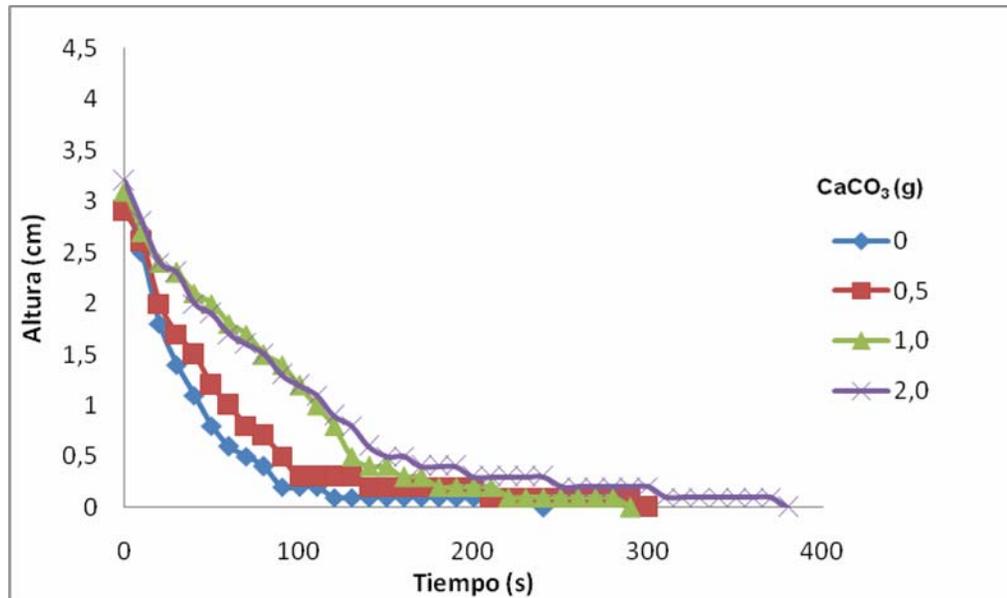


Figura 4.22 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y adición de CaCO_3 (80% aceite-20% kerosene, 30 °C, de gas de 70 ml/s, 20 psia).

Entonces, la espumabilidad y estabilidad de espuma se ve afectada por sólidos como la bentonita y el carbonato en forma positiva, es decir, la espuma tarda más en romperse y hay inicialmente un ligero aumento de su espumabilidad. Se producen espumas más estables con la bentonita que con el carbonato, pero con ambos a la concentración de 1 g/100 mL de mezcla hidrocarbonada se retarda el efecto antiespumante durante el colapso de la espuma.

Esto puede explicarse, desde el punto de vista de hinchamiento de las arcillas: la bentonita se hincha en presencia de agua en mayor proporción (2 g /100 mL, tabla 3.11) que el carbonato (0,0013 g /100 mL, tabla 3.15); induciendo un aumento de la viscosidad de la mezcla hidrocarbonada y por ende, afectando favorablemente la estabilidad de la espuma al aumentar la

resistencia a la segregación y coalescencia de las burbujas formadas.

Las figuras 4.23 y 4.24 muestran la espumabilidad y estabilidad de espuma de una mezcla hidrocarbonada con la adición de asfaltenos, para modificar su viscosidad.

Para las experiencias con 0,1 y 25 g se obtuvo un aumento de la espumabilidad del 3 y 10%, respectivamente. A medida que se incrementó la cantidad de asfaltenos aumentó la altura máxima de la espuma, hasta llegar a la prueba de 0,5 g donde el efecto fue antiespumante, obteniéndose una reducción del 47% en la espumabilidad.

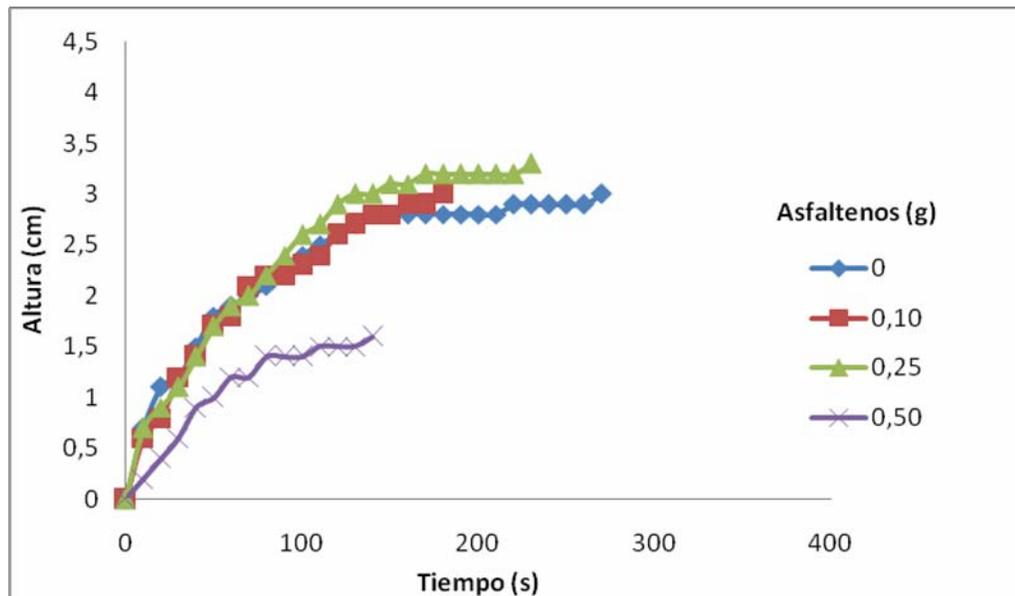


Figura 4.23 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y adición de Asfaltenos (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 mL/s, 20 psia).

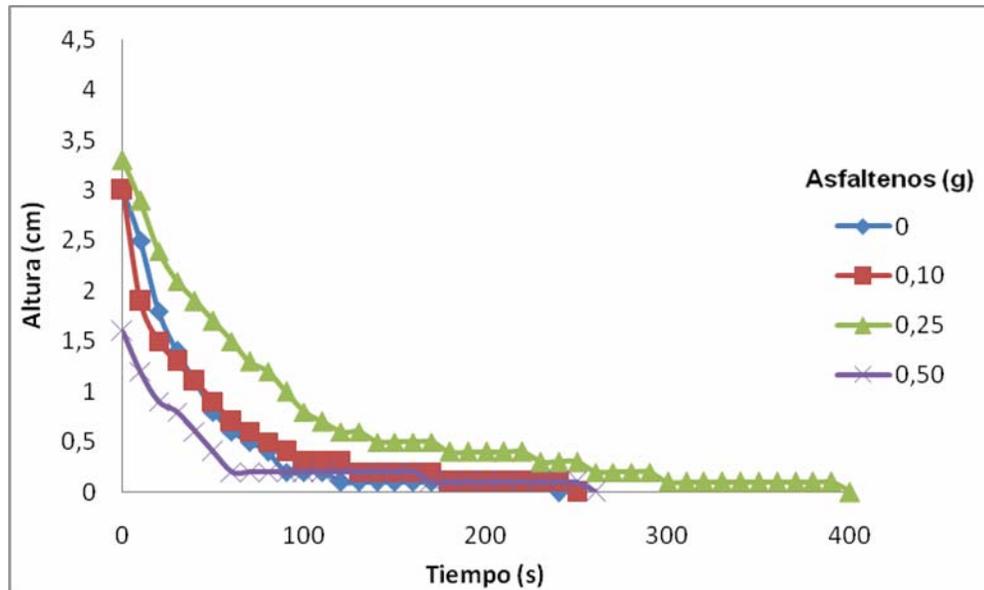


Figura 4.24 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y adición de Asfaltenos (80% aceite-20% kerosene, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

Los asfaltenos por su naturaleza, tienden a tener cierta comodidad en la fase aceitosa, permitiéndoles ser más efectivos en el aumento de la viscosidad del sistema, haciendo a su vez que el sistema aumente su espumabilidad y estabilidad, pero es importante considerar otro mecanismo; se cree que los asfaltenos migran a la interface y forman una costra alrededor de las burbujas, dándoles una estabilidad extra a la dispersión [7]. El problema se presenta cuando ésta costra se hace tan rígida que la película pierde la capacidad de elasticidad.

4.1.3 Interpretación del rol de los alcoholes en la estabilidad de una espuma no acuosa, cambiando el tipo de alcohol.

Las curvas que representan la influencia de distintos alcoholes en la espumabilidad y estabilidad de espuma se encuentran graficadas en las

figuras 4.25 y 4.26.

Cada uno de los sistemas que contenían alcohol, como co-surfactante, resultaron tener una reducción de la espumabilidad y estabilidad de espuma, en comparación con la mezcla hidrocarbonada sin alcohol. Por una parte, el n-Butanol redujo la altura de espuma en un 87% , el n-Pentanol en 87%, el n-Octanol en 83% y finalmente el n-Dodecanol resulto ser el sistema de menor efecto antiespumante con una reducción del 50% . Para la estabilidad se presenta el mismo caso, que a medida que la cadena alifática de los alcoholes disminuye en tamaño las espumas se hacían más inestables, y poco persistentes en el tiempo.

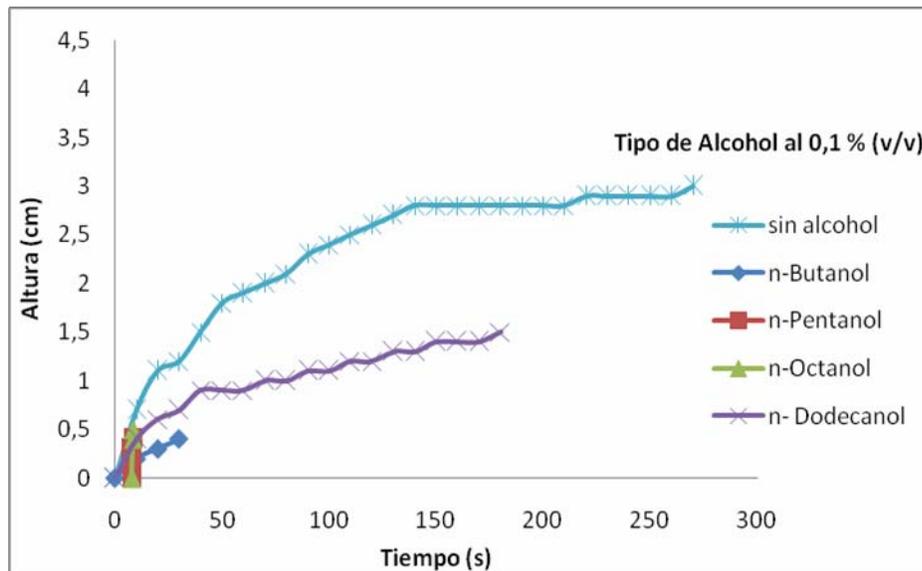


Figura 4.25 Espumabilidad en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y distintos tipos de alcohol al 0,1 % v/v (80% aceite-20% kerosén, 30 °C flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

El n-Butanol, el n-Pentanol y el n-Octanol presentaron estabilidades de espuma tan bajas, que se les puede considerar burbujas evanescentes, ya

que sus tiempos de persistencia no llegaron a sobrepasar los 40 segundos. Para el n- Dodecanol si se obtuvo una disminución de la estabilidad de espuma, pero en menor grado que los otros alcoholes probados, teniendo una disminución del 60%.

El efecto causado se puede atribuir a la adsorción de los alcoholes en la interface, disminuyendo la elasticidad de la película de líquido entre burbuja, en este caso el Span 20. A medida que los alcoholes tienen cadenas más largas su afinidad por el aceite es mayor, y es menor tendencia a migrar a la interface, permaneciendo en la mezcla hidrocarbonada y teniendo menor efecto antiespumante sobre el sistema, con una disminución del 67% con respecto a la muestra sin alcohol.

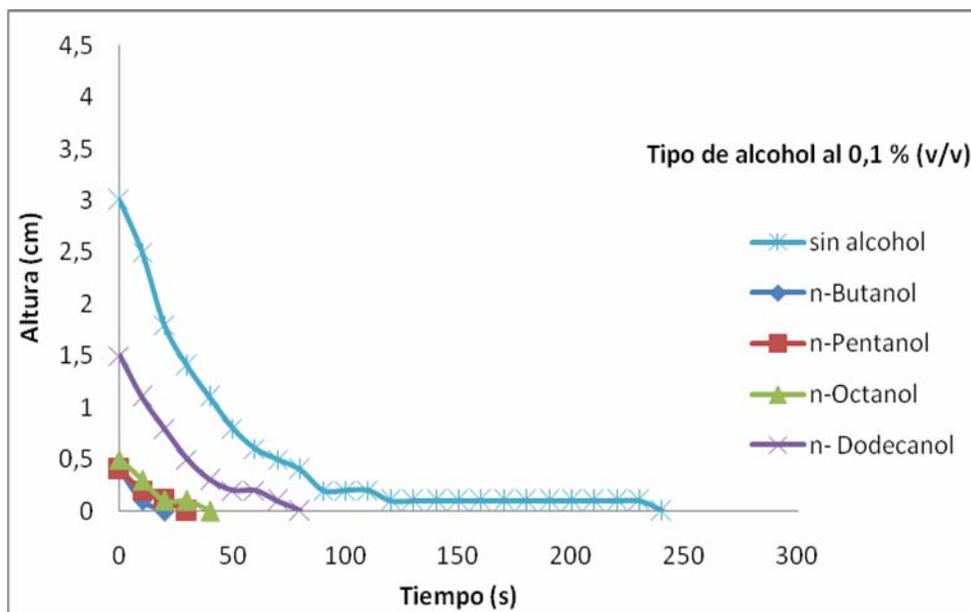


Figura 4.26 Estabilidad de espuma en mezcla hidrocarbonada con Span 20 al 0,5% y distintos tipos de alcohol al 0,1 % v/v (80% aceite-20% kerosén, 30 °C, flujo de gas de 70 ml/s, 20 psia).

4.1.4 Comparar los diferentes regímenes de formación y colapso de las espumas no acuosas formuladas

Para estudiar los regímenes de formación y colapso de las espumas formuladas con la adición de los distintos surfactantes, se analizaron las curvas representadas en la figura 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11.

Para el Span 20 se denota un régimen de formación tipo Bikerman, que se presenta en los sistemas a las distintas concentraciones probadas. Para el caso del régimen de decaimiento de tipo exponencial negativo se presenta de igual manera en cada una de las concentraciones presentes.

En las experiencias realizadas con el Span 80 y Tween 20 no se pueden definir regímenes tanto de formación como de colapso, por la poca altura de espuma alcanzada y los reducidos tiempos de persistencia de la espuma.

El comportamiento de las curvas con distintos cortes de agua que se presentan en las graficas 4.13 y 4.14, no parecen verse alterados con el incremento de la fase polar, ya que el régimen de formación permanece como tipo Bikerman y el de colapso como exponencial negativo. Por otra parte, para las curvas de flujo de gas presentes en la figura 4.15 y 4.16, los regímenes de formación y colapso se mantienen definidos con el mismo tipo Bikerman y exponencial negativo respectivamente, sin verse afectados por los altos incrementos de espumabilidad y estabilidad de la muestra.

El comportamiento de las curvas de espumabilidad y estabilidad de espuma para variación del EACN se encuentran en las figuras 4.17 y 4.18. Todas las curvas presentan un régimen de formación tipo Bikerman, y un

régimen de colapso tipo exponencial negativo, con excepción de la EACN 14 donde el decaimiento es tan violento que se puede considerar casi rectilíneo.

En las figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 y 4.24 se presenta el comportamiento espumante de la mezcla hidrocarbonada, con la adición de los distintos sólidos: Bentonita, CaCO_3 y Asfaltenos. Para las curvas de los sólidos hidrofílicos se tiene un régimen de formación tipo Bikerman para todas las curvas, y en el caso del régimen de decaimiento se tienen comportamientos tipo exponencial negativo en las curvas de 0,5 g tanto de bentonita como CaCO_3

En las curvas donde se presenta mayor cantidad de sólido, los regímenes de colapso parecen verse afectados, presentado un régimen tipo escalonado, sobre todo en la última etapa de la vida de la espuma. Este fenómeno se da en ambos casos y con mayor incidencia en las curvas con 2,0 g de sólido.

Los regímenes de formación y colapso, de las espumas formuladas con adición de alcoholes se denotan en las figuras 4.25 y 4.26.

La curva que representa la tendencia de la espuma formada en la mezcla con adición de n-Dodecanol, denota un régimen de formación tipo Bikerman y un régimen de decaimiento tipo exponencial negativo, muy similar a la mezcla sin alcohol.

Para el caso de los alcoholes de cadenas más cortas, se nota un efecto en el régimen de decaimiento, ya que a medida que los alcoholes tienen cadenas carbonadas más reducidas su colapso tiende a ser casi rectilíneo.

Luego de detener la inyección de gas en las pruebas de espumabilidad, las espumas tienen muy poca estabilidad por el efecto antiespumante de los alcoholes de cadena corta, por lo que el decaimiento es muy rápido.

4.2 Conclusiones

1. Los parámetros operacionales del equipo de espuma fueron: 200 mL volumen inicial de muestra, mezcla hidrocarbonada 80% Aceite-20% Kerosene, 70 mL/s de flujo de gas N₂ y temperatura 30 °C.
2. La adición del surfactante Span 20, a la muestra hidrocarbonada incrementó la espumabilidad en todas sus concentraciones, con una altura y estabilidad máxima al 1,00% m/v de surfactante.
3. La adición del surfactante Span 80 incrementó, levemente, la espumabilidad del sistema hidrocarbonado a las concentraciones de 0,1, 0,25 y 0,5%, teniendo su máxima espumabilidad y estabilidad de espuma a la concentración de 0,25 % m/v.
4. La adición del surfactante Tween 20 incrementó la espumabilidad y estabilidad del sistema hidrocarbonado en el rango de concentraciones probadas entre 0,1 y 0,5%. Los valores máximos de altura de espuma y persistencia fueron 0,6 cm y 150s respectivamente, a la concentración de 0,25 % m/v.
5. Bajos porcentajes de agua en la espuma no acuosa (0,5 a 1% v/v) evidenció un aumento en la espumabilidad y estabilidad de la espuma, con valores promedios de 8 y 50 % respectivamente, comparado con la mezcla hidrocarbonada sin agua (con Span 20 al 0,1%).
6. La disminución del EACN de 18 a 12 en la mezcla hidrocarbonada redujo la espumabilidad y estabilidad del sistema hasta en un 70 y 83%, respectivamente. Esta reducción se atribuye a la disminución de

la viscosidad.

7. El flujo de gas N₂ presentó un punto máximo a los 100 mL/s con 6cm de altura y 370 s de persistencia; siendo este una inflexión en el comportamiento, ya que a caudales de gas menores o mayores no se logró incremento en la espumabilidad y estabilidad del sistema hidrocarbonado.
8. La presencia de sólidos hidrofílicos usados en formulaciones de fluidos de perforación, como la bentonita (viscosificante) y el carbonato de calcio (densificante), en las espumas no acuosas resultó en un incremento de la espumabilidad y estabilidad a concentraciones de 0,25 a 1 g/100 ml de mezcla hidrocarbonada; siendo mayor el efecto con la bentonita.
9. La adición de asfaltenos incrementó la viscosidad del sistema en todas las concentraciones a excepción de la concentración de 0,25 gr /100ml.
10. Los alcoholes n-Butanol, n-Pentanol, n-Octanol y n-Dodecanol redujeron considerablemente la espumabilidad y estabilidad de la espuma
11. Para todos los sistemas estudiados se encontraron regímenes de formación tipo Bikerman. Para el caso de los regímenes de colapso se encontró un dominante régimen exponencial negativo.

4.3 Recomendaciones

1. Estudiar el efecto de las distintas variables, pero en función del caudal de gas inyectado, ya que al parecer tiene influencia en el comportamiento de las propiedades de la espuma.
2. Estudiar el efecto de la adición de compuestos aromáticos en las espumas no acuosas.
3. Diseñar un equipo de espuma para medir la influencia de la presión sobre el comportamiento de espumas no acuosas, a fin de simular este parámetro a las condiciones de los separadores agua-crudo-gas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anderez, Ana V., “**Estabilidad de espumas no acuosas**”. Tesis de grado en Ingeniería Química, Informe Técnico FIRP N° 0106, ULA, Mérida, Venezuela (2001).

2. Belandria V., “**Estabilización de espumas no acuosas en presencia de sólidos finos**”. Tesis de Grado. Lab. FIRP. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (2001).

3. Alcalá P., “**Evaluación de formulaciones antiespumantes para la ruptura de espumas no acuosas**”. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Anzoátegui (2008).

4. Salager J.L., Anderez J.M y Forgiarin A., “**Influencia de la formulación sobre las espumas**”. Laboratorio FIRP. Cuaderno 263-A, ULA, Mérida, Venezuela (2003).

5. Denkov N., Cooper P. y Martin J., 1999, Mechanisms of action of Mixed Solid – Liquid Antifoams. 1. Dynamics of Foams Film Ruptura. *Langmuir*, 15, 8514-8529 (1999).

6. Sheng J.J., Maini B. B., Hayes R.E. and Tortike W. S., Experimental Study of Foamy Oil Stability. *The Journal of Canadian Petroleum Technology*, Volume 36, N°4, pp. 31-37 (1997).

7. Arandia, M. A. **“Estudio sobre la formación de espumas no acuosas. Influencia de Asfaltenos en polvo”**. Informe INTEVEP. Resultados no publicados **(2001)**.

8. Salager J., **“Surfactantes Tipos y Usos”**, Cuaderno FIRP 300-A, Versión #2, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Química, Mérida, Venezuela **(2002)**.

9. Fernández A., Salager J., **“Surfactantes”**, Cuaderno FIRP 301PP, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Química, Mérida Venezuela **(2004)**.

10. Fernández A., Salager J., **“Surfactantes Aniónicos”**, Cuaderno FIRP 302PP, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Química, Mérida Venezuela **(2004)**.

11. Fernández A., Salager J., **“Surfactantes Catiónicos y otros surfactantes”**, Cuaderno FIRP 304PP, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Química, Mérida Venezuela **(2004)**.

12. Fernández A., Salager J., **“Surfactantes Noiónicos”**, Cuaderno FIRP 303PP, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Química, Mérida Venezuela **(2004)**.

13. Salager J., **“El Mundo de los Surfactantes”**, Cuaderno FIRP 311-A, Versión # 01, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Química, Mérida, Venezuela **(1992)**.

16. Schmidt D., **“Nonaqueous Foam”**, 287-314. Foams: Theory, Measurement and Applications. R. K. Prud homme and S. A. Khan, eds, Marcel Dekker New Cork **(1996)**.

17. Forgiarini, A. y Salager J.L., **“Espumas, Espumantes y Antiespumantes”**. Cuaderno FIRP 261, ULA, Mérida, Venezuela **(2002)**.

18. Iglesias E., **“Antiespumabilidad”**. Tesis de grado, Lab. FIRP Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela **(1993)**.

19. Rodríguez C., **“Diferentes Regímenes de Formación y Colapso de Sistemas Espumantes”**. Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela **(1998)**.

20. Sha, T.O., **“Foam making and breaking: surface chemistry in action”**. Center of surface chemistry and engineering, University of Florida, USA **(2000)**.

21. Iglesias E., Andérez J.M., Forgiarini A., A method to estimate foam stability. 10th International Symposium of Surfactants in Solution, Caracas, Junio **(1994)**.

22. Tyrode, E. **“Espumabilidad y estabilidad de espumas a altas temperaturas y presiones”**. Parte I Diseño y construcción del equipo de evaluación”. Informe técnico FIRP N° 9914. **(1999)**. Escuela de Ing. Química. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

23. Rodríguez, N. **“Espumabilidad y Estabilidad de surfactantes fluorados en solución acuosa”** Tesis de Grado. Lab. FIRP. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela **(2000)**.

24. Rodríguez, C. **“Ruptura de espumas poco estables”**. Informe técnico FIRP n° 9804 **(1998)**. Escuela de Ing. Química. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

25. Marfisi S. y Meneses N., **“Manual de Laboratorio de propiedades de los hidrocarburos”**, Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Química, Anzoátegui Venezuela.

ANEXOS

Anexo A. Conversión de EACN y tablas adicionales

Anexo A. conversión de EACN y dimensiones de columna de espuma.

Tabla A.1 Conversión de EACN de distintas mezclas hidrocarbonadas.

Composición Mezcla Hidrocarbonada	EACN
80% aceite – 20% kerosén	18
60% aceite – 40% kerosén	16
40% aceite – 60% kerosén	14
20% aceite – 80% kerosén	12

Tabla A.2 Dimensiones de columna de medición de espumabilidad y estabilidad de espuma

Dimensión	Cantidad
Diametro interno	3 cm
Diametro externo	6 cm
Altura	35,4 cm
Volumen para Muestra	1000 ml

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS

TÍTULO	“EFECTO DE VARIABLES DE FORMULACIÓN Y FLUJOMECÁNICAS EN ESPUMAS DE HIDROCARBUROS”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Pedro Luís Alcalá Noriega	CVLAC: 16.485.352 EMAIL: pedroluis.alcala@hotmail.com
Cristina Mercedes Rojas León	CVLAC: 17.419.557 E MAIL: flagelod@yahoo.com
	CVLAC: E-MAIL:
	CVLAC: E-MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Espumas

Mezcla hidrocarbonada

Formulación flujomecánica

Riesgos

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACTO):

En el presente trabajo se evaluaron los efectos de variables de formulación y flujomecánicas en espumas de hidrocarburos. Se utilizó un equipo de medición de espumas diseñado bajo la norma ASTM D 892, con el que se realizaron una serie de pruebas preliminares para establecer parámetros operacionales; definiendo un flujo de gas N₂ de 70 ml/s, temperatura de 30°C, volumen inicial de 200 ml y mezcla hidrocarbonada 80% aceite- 20% kerosén. Para la formulación de espumas de hidrocarburos se variaron las concentraciones y tipos de surfactantes, probando con Span 20, Span 80 y Tween 20; registrándose un incremento de la espumabilidad y la estabilidad de la muestra, siendo el sistema con surfactante Span 20 al 1% m/v el de máxima espumabilidad. Bajos porcentajes de agua agregados a la mezcla hidrocarbonada evidenciaron un aumento en la espumabilidad y estabilidad de la espuma, mientras que una disminución en los valores del EACN redujeron las características de la espuma. Analizando los efectos flujomecánicos, se evaluó el efecto del flujo sobre la espuma, obteniendo una espumabilidad máxima a los 100 ml/s. La adición de sólidos, tales como Bentonita, CaCO₃ y Asfaltenos precipitados, incrementaron la espumabilidad y estabilidad de la espuma. Se analizó el efecto de los alcoholes

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO / CVLAC / E-MAIL				
	ROL	CA	AS	TU X	JU
Shirley Marfisi	CVLAC:				
	E_MAIL	shirleymarfisi@yahoo.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA X	AS	TU	JU X
Raida Patiño	CVLAC:	11.833.699			
	E-MAIL	raidapatino@gmail.com			
	E-MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU X
Oly Guerra	CVLAC:	3.733.796			
	E-MAIL	olyguerra1@yahoo.com			
	E-MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E-MAIL				
	E-MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO 2009	MES 08	DÍA 04
--------------------	------------------	------------------

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Efecto de variables de formulación y flujomecánicas en espumas de hidrocarburos.Doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F
G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t
u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE**ESPACIAL:****TEMPORAL:****TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Químico; Ingeniero de Petróleo

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE/ Núcleo Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS

“Los Trabajos de Grado son de Exclusiva propiedad de la Universidad, y sólo podrán ser utilizados a otro fin con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario”

AUTOR(ES)

**Pedro Luís Alcalá Noriega
Cristina Mercedes Rojas León**

**TUTOR
Shirley Marfisi**

**JURADO
Raida Patiño**

**JURADO
Oly Guerra**

POR LA SUBCOMISION DE TESIS

Iraima Salas