

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



“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ALCOHOLES EN LA  
ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMAS ACUOSAS MEDIANTE EL  
MÉTODO DE DISPERSIÓN DE LUZ”

PRESENTADO POR:

ADOLFO ANTONIO RODRÍGUEZ CEDEÑO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE  
ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, marzo de 2010

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



“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ALCOHOLES EN LA  
ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMAS ACUOSAS MEDIANTE EL  
MÉTODO DE DISPERSIÓN DE LUZ”

Ing. Químico Shirley Marfisi  
Asesor Académico

---

Firma

Puerto La Cruz, marzo de 2010

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



“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ALCOHOLES EN LA  
ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE ESPUMAS ACUOSAS MEDIANTE EL  
MÉTODO DE DISPERSIÓN DE LUZ”

---

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

---

Ing. Químico Alexis Cova (M.Sc)  
Jurado Principal

---

Ing. Químico Lucas Álvarez (PhD)  
Jurado Principal

Puerto La Cruz, marzo de 2010

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

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

## **RESUMEN**

En el presente trabajo, se estudió el efecto de los alcoholes en la espumabilidad y estabilidad de espumas acuosas, utilizando la tecnología de transmisión y retrodispersión de luz mediante el Turbiscan Classic MA 2000 como método novedoso para esta aplicación. La metodología empleada consistió en preparar soluciones de agua destilada y surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio, midiendo la densidad y tensión superficial de las mismas, para luego espumarlas y medir la espumabilidad y colapso de las espumas bajo la influencia de alcoholes, utilizando el Turbiscan; luego a partir de los datos generados por el software del equipo se obtuvieron correlaciones empíricas referentes al colapso de las espumas. Los resultados indican que el alcohol n-butanol para la espuma A y el ter-pentanol para la espuma B (ambos en espumas con 1%v/v del alcohol) son los mejores inhibidores de espumas, colapsando la columna de espuma en 10 y 15 minutos respectivamente; y que el alcohol n-octanol sirve como aditivo para formar espumas de menor altura (reduce la altura de las espumas entre 50 y 70%), pero de muy alta estabilidad (mayor de 1 h).

## CONTENIDO

RESOLUCIÓN .....	v
RESUMEN.....	vi
CONTENIDO .....	vii
LISTA DE TABLAS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. ANTECEDENTES.....	4
2.2. ANFÍFILOS .....	5
2.3. SURFACTANTES.....	6
2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SURFACTANTES .....	7
2.4.1. Surfactantes aniónicos .....	8
2.4.2. Surfactantes noiónicos.....	8
2.4.3. Surfactantes catiónicos .....	9
2.5. ESPUMAS .....	9
2.5.1. Adsorción del surfactante en la superficie gas-líquido: tensoactividad... 10	
2.5.2. Separación del gas por gravedad: acumulación de burbujas .....	10
2.5.3. Efecto Gibbs-Marangoni .....	11
2.6. ESPUMABILIDAD .....	12
2.6.1. Máximo de espumabilidad y concentración micelar crítica .....	13
2.7. ESTABILIDAD .....	14
2.8. MECANISMO DE RUPTURA DE ESPUMAS .....	14
2.8.1. Segregación de burbujas y drenaje gravitacional del líquido.....	15
2.8.2. Succión capilar .....	15

2.8.3. Difusión gaseosa intra-burbuja.....	16
2.9. ALCOHOLES COMO ADIVITIVOS PARA ESPUMAS ACUOSAS .....	17
2.10. MÉTODOS DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ESPUMAS.....	17
2.10.1. Método estático de Ross-Miles.....	17
2.10.2. Método dinámico de Bikerman.....	18
2.10.3. Método de transmisión de luz.....	20
CAPITULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	23
3.1. FORMULACIÓN DE ESPUMAS ACUOSAS, MIDIENDO LAS ETAPAS DE VIDA DE LA ESPUMA (ESTABILIDAD, ESPUMABILIDAD Y COLAPSO).....	23
3.1.1 Selección de la concentración del surfactante y medición de propiedades de la solución a espumar .....	23
3.1.2 Formulación de las espumas acuosas .....	25
3.1.3 Medición de las etapas de vida de la espuma (estabilidad, espumabilidad y colapso), utilizando la transmisión y retrodispersión de luz mediante el Turbiscan MA classic 2000.....	26
3.1.4 Análisis de espumas acuosas.....	31
3.2. RELACIÓN DEL EFECTO DEL TIPO DE ALCOHOLES Y SU CONCENTRACIÓN EN EL COLAPSO DE UNA ESPUMA ACUOSA .....	33
3.3. DESARROLLO DE MODELOS DE CORRELACIÓN PARA PREDECIR EL COLAPSO DE LA ESPUMA POR ACCIÓN DE UN ALCOHOL .....	35
3.4. TABLA DE DATOS.....	35
3.4.1 Datos de densidades.....	35
3.4.2 Datos de colapso.....	40
3.5 EQUIPOS MATERIALES Y SUSTANCIAS .....	41
Equipos .....	41
Materiales .....	41
Sustancias .....	41
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	43

4.1 FORMULACIÓN DE ESPUMAS ACUOSAS, MIDIENDO LAS ETAPAS DE VIDA DE LA ESPUMA, UTILIZANDO LA TRANSMISIÓN Y RETRODISPERSIÓN DE LUZ MEDIANTE EL TURBISCAN MA CLASSIC 2000 .....	43
4.1.1 Propiedades de la solución a espumar .....	43
4.1.2 Etapas de vida de la espuma .....	49
4.2 RELACIÓN DEL EFECTO DEL TIPO DE ALCOHOL Y SU CONCENTRACIÓN EN EL COLAPSO DE LAS ESPUMAS ACUOSAS .....	52
4.3 DESARROLLO DE MODELOS DE CORRELACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DEL COLAPSO DE UNA ESPUMA POR ACCIÓN DE UN ALCOHOL.....	63
4.4. CONCLUSIONES .....	72
4.5. RECOMENDACIONES .....	73
4.6. BIBLIOGRAFÍA .....	74
ANEXO A.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO B.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO C.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<u>METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO</u> .....	76



## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Propiedades del Dodecil Sulfato de Sodio.....	24
Tabla 3.2 Propiedades fisicoquímicas de los alcoholes utilizados en la formulación de espumas acuosas con el surfactante dodecil sulfato de sodio. ....	34
Tabla 3.3 Valores de masa y volumen para el cálculo de la densidad.....	36
de las soluciones a espumar para espuma A. ....	36
Tabla 3.4 Valores de masa y volumen para el cálculo de la densidad.....	38
de las soluciones a espumar para espuma B. ....	38
Tabla 4.1 Densidad (g/ml) para solución que forma la espuma A.....	44
Tabla 4.2 Densidad (g/ml) para solución que forma la espuma B.....	46
Tabla 4.3 Tensión superficial para la solución A (dinas/cm).....	47
Tabla 4.4 Tensión superficial para la solución B (dinas/cm).....	48
Tabla 4.5 Espumabilidad para espuma A.....	50
Tabla 4.6 Espumabilidad para espuma B.....	50
Tabla 4.7 Primeros 5 coeficientes polinomiales para la espuma A.....	64
Tabla 4.8 Últimos 5 coeficientes polinomiales y coeficiente de correlación para la espuma A.....	65
Tabla 4.9 Primeros 5 coeficientes polinomiales para la espuma B.....	68
Tabla 4.10 Últimos 5 coeficientes polinomiales y coeficientes de correlación para la espuma B.....	69
Tabla C-1. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de etanol.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla C-2. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de etanol .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla C-3. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de n-propanol.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla C-4. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de n-propanol.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

Tabla C-5. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de iso-propanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-6. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de iso-propanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-7. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de n-butanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-8. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de n-butanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-9. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de sec-butanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-10. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de sec-butanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-11. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de ter-butanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-12. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de ter-butanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-13. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de n-pentanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-14. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de n-pentanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-15. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de ter-pentanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-16. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de ter-pentanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-17. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0% y 0,1% v/v de n-octanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-18. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma A con 0,5% y 1% v/v de n-octanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-19. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de etanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-20. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de etanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-21. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de n-propanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-22. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de n-propanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-23. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de iso-propanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-24. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de iso-propanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-25. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de n-butanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-26. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de n-butanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-27. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de sec-butanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-28. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de sec-butanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-29. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de ter-butanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-30. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de ter-butanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-31. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de n-pentanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-32. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de n-pentanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-33. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de ter-pentanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-34. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de ter-pentanol.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-35. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0% y 0,1% v/v de n-octanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C-36. Datos extraídos de las gráficas de grosor máximo para espuma B con 0,5% y 1% v/v de n-octanol .....**¡Error! Marcador no definido.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fórmula molecular del Dodecil Benceno Sulfato de Sodio.[5].....	6
Figura 2.2 Fórmulas desarrolladas de algunos surfactantes corrientes.[5] .....	8
Figura 2.3 Efecto Gibbs-Marangoni.[7].....	12
Figura 2.4 Variación típica de la espumabilidad con la concentración del tensoactivo en la fase líquida.[7].....	13
Figura 2.5. Método estático de Ross-Miles.[8].....	18
Figura 2.6. Método dinámico de Bikerman.[8].....	19
Figura 2.7. Curva de estabilidad de espumas.[10] .....	20
Figura 3.1 Espuma formada en la celda de medición del Turbiscan. ....	26
Figura 3.2. Principio de medición del Turbiscan Classic MA 2000.[15] .....	27
Figura 3.3. Transmisión y retrodispersión para aceite de silicón (color rojo) y teflón blanco (color violeta). ....	27
Figura 3.4. Perfiles referentes al cremado. [15].....	28
Figura 3.5. Cremado con dependencia. [15].....	29
Figura 3.6. Perfiles referentes a la sedimentación. [15].....	30
Figura 3.7. Perfiles referentes a la coalescencia. [15].....	31
Figura 3.8. Perfiles referentes a un cremado y coalescencia. [15].....	31
Figura 3.9. Perfiles de transmisión (superior) y retrodispersión (inferior) que indican la espumabilidad y colapso de una espuma acuosa.....	33
Figura 4.1. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de etanol. ..	53
Figura 4.2. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-propanol. ....	53
Figura 4.3. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de iso-propanol. ....	54
Figura 4.4. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-butanol. ....	54

Figura 4.5. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de sec-butanol.....	55
Figura 4.6. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de ter-butanol.....	55
Figura 4.7. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-pentanol. .....	55
Figura 4.8. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de ter-pentanol.....	56
Figura 4.9. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-octanol. .....	56
Figura 4.10. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de etanol..	56
Figura 4.11. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-propanol. ....	57
Figura 4.12. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de iso-propanol. ....	57
Figura 4.13. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-butanol. .....	58
Figura 4.14. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de sec-butanol.....	58
Figura 4.15. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de ter-butanol.....	59
Figura 4.16. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-pentanol.....	59
Figura 4.17. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de ter-pentanol.....	60
Figura 4.18. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-octanol. .....	60

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio de las espumas es de gran importancia a nivel industrial y doméstico debido a un gran número de aplicaciones. Las burbujas del champú, la espuma de afeitar, la espuma de cerveza, cada una ejemplifican una espuma con una calidad determinada, cuyas propiedades están lejos de ser comunes.

En una espuma acuosa, un gas, a menudo aire, es dispersado como una aglomeración de burbujas en un líquido, separadas unas de otras por películas de líquido que contienen agua mezclada con otras sustancias conocidas como surfactantes, es decir, agentes activos de superficie. Las espumas acuosas tienen diversos usos en detergencia, alimentos, cosméticos, recuperación de aceites, flotación de minerales, en extinción de fuego, en aislamiento térmico y acústico, entre otros.

Una aplicación reciente es en un invernadero, diseñado por la Universidad de Arizona en Estados Unidos, usando una espuma acuosa de baja densidad para mantener el calor durante la noche. Como casi todas las espumas, las formas acuosas son buenos aislantes térmicos. Cada tarde, la espuma se bombea entre dos capas de plástico translúcido que forman el techo de la estructura, en la mañana la espuma se licúa por el calor del sol, el líquido se recoge, y queda listo para que se convierta nuevamente en espuma al llegar la tarde.

Las espumas acuosas mantienen su configuración cuando no pueden transformarse en otro "arreglo" que emplee menos energía. En este caso, deben considerarse tres tipos de energías: la energía del gas retenida en las burbujas, la

energía química de las sustancias contenidas en la película (que forman las paredes de las burbujas) y la tensión superficial del líquido en las películas. También se investiga su capacidad para disminuir la presión generada durante una explosión; esta asombrosa propiedad deviene de la destrucción del entorno de la espuma. En particular, algo de la energía en la onda de choque de la explosión se consume al convertir la espuma en diminutas gotas de agua; y una cantidad mayor de energía se consume en la evaporación de estas pequeñas gotas. En total, la espuma puede consumir un 90% de la presión generada durante una explosión.

A pesar de que las investigaciones científicas sobre espumas vienen desarrollándose desde el siglo XVII, falta mucho por saber sobre los complejos fenómenos físicos y químicos que ocurren en dicha dispersión, inclusive en una sola burbuja de espuma. Las numerosas aplicaciones de estos sistemas justifican el interés en estudiarlos, siendo hoy una activa área de investigación, donde existen químicos, matemáticos y físicos abocados a investigar este tema, y en el cual recién están entendiendo matemáticamente la fisicoquímica de las espumas, cómo modelarlas y aplicarlas.

La importancia de este proyecto reside en el adelanto del estudio de las propiedades fisicoquímicas de las espumas, proponiendo la formulación de éstas a partir de un sistema acuoso, como lo es la mezcla de un surfactante aniónico con agua, y observando la influencia de alcoholes y de su concentración, en cuanto a la espumabilidad y la estabilidad de las mismas mediante el uso de una tecnología relativamente nueva y muy precisa como lo es la dispersión de luz.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Estudiar la influencia de los alcoholes en la espumabilidad y estabilidad de espumas acuosas mediante el método de dispersión de luz.



### 1.2.2. Objetivos específicos

Formular espumas acuosas, midiendo las etapas de vida de la espuma (estabilidad, espumabilidad y colapso), utilizando la transmisión y retrodispersión de luz mediante el Turbiscan MA classic 2000.

Relacionar el efecto del tipo de alcohol y su concentración en el colapso de una espuma acuosa.

Desarrollar modelos de correlación para predecir el colapso de una espuma por acción de un alcohol.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. ANTECEDENTES

Entre las investigaciones más recientes relacionadas con el tema se encuentran: en el año 1990, Lachaise y col.<sup>[1]</sup> experimentaron con un nuevo método basado en reflectometría para la medición de la estabilidad de las espumas usando como parámetro de comparación el método de presión excesiva; el cual usa como principio el flujo de luz reflejado sobre una superficie esférica, empleando el modelo de Nishioka y Ross y utilizando espumas de Coatex, AOS, LOA y SDS mediante el bombeo de nitrógeno. Los resultados obtenidos fueron favorables ya que este método concordaba excelentemente con la predicción teórica de Markworth y permitía clasificar rápidamente la espuma medida antes de que esté lo suficientemente clara para obtenerse un cambio a simple vista.

En el año 1995, Iglesias y col.<sup>[2]</sup> desarrollaron un método para estimar la estabilidad en espumas de corta vida, basándose en que el colapso está bien definido cuando el estado original de la espuma es tomado como el estado en equilibrio del experimento clásico de Bikerman. Encontró que bajo esas condiciones iniciales, las espumas de corta vida exhiben una variación lineal de la altura de la espuma con el logaritmo del tiempo transcurrido. Algunas de las soluciones usadas contienen nonil-fenol etoxilado comercial a una concentración de 0,02% m/m, un poco más alta que la concentración micelar crítica CMC (0,002%). Los experimentos permitieron el monitoreo de dos parámetros: el tiempo medio de colapso (es una medida confiable de la tasa de colapso) y la espumabilidad.

En el año 2003, Langevin<sup>[3]</sup> estudió la relación entre el comportamiento de las espumas, las propiedades de las películas de jabón que separan las burbujas y las propiedades de las monocapas surfactantes que recubren la superficie de las películas de jabón. Luego de varios experimentos y revisiones de literatura concluyeron que para comprender el comportamiento de las espumas es necesario evaluar más detalladamente la escala de tiempo durante el colapso de las mismas.

En el año 2005, Rouimi y col.<sup>[4]</sup> estudiaron las propiedades interfaciales y el comportamiento dinámico de las proteínas y emulsionantes en la leche comercial en interfases de aire-agua y n-dodecano-agua. Las pruebas de formación de espumas fueron realizadas incorporando aire en mezclas de *sirop* de sacarosa-agua que contenían emulsionantes previamente caracterizados para ayudar en la estabilización de la espuma. En las pruebas se concluyó que en sistemas de proteínas aireados se requiere una elasticidad alta en la superficie para prevenir la ruptura de las capas interfaciales y la coalescencia de burbujas; que la estabilidad de las espumas en este caso estuvo relacionada con la reología y que las espumas estabilizadas con emulsionantes fueron bastante estables, especialmente en cuanto a drenaje se refiere, pero la estabilidad está relacionada con varios mecanismos. Se estableció que la proporción entre proteínas y emulsionantes debe ser óptima para lograrse la mejor estabilidad.

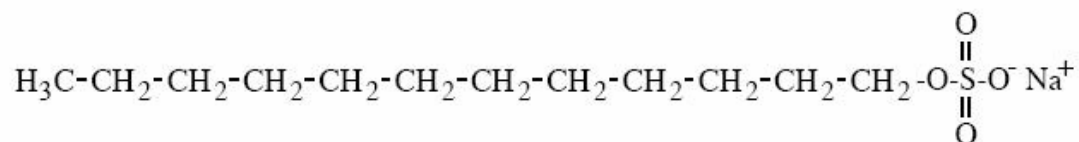
En el presente trabajo se realizó el estudio del colapso de espumas acuosas formadas por agua destilada y dodecil sulfato de sodio (DSS), al añadirseles pequeñas concentraciones de diferentes alcoholes de hidrofiliidad alta e intermedia.

## 2.2. ANFÍFILOS

Una sustancia anfífila posee una doble afinidad que se define desde el punto de vista fisicoquímico como una dualidad polar-apolar. La molécula típica de un anfífilo tiene dos partes: un grupo polar que contiene heteroátomos como O, S, P ó N que se

encuentran en grupos alcohol, ácido, sulfato, sulfonato, fosfato, amina, amida, etc., y un grupo apolar o poco polar que es en general un grupo hidrocarbonado de tipo alquil o alquil benceno y que puede contener eventualmente átomos de halógeno u oxígeno. La parte polar posee afinidad por los solventes polares en particular agua y se denomina parte hidrófila o hidrofílica. Por el contrario, el grupo apolar se llama parte hidrófoba o hidrofóbica, o bien lipofílica, del griego “phobos”, el miedo, y “lipos”, la grasa.

La figura 2.1 muestra la fórmula de un anfifilo muy utilizado en los champúes, el dodecil benceno sulfato de sodio.



**Figura 2.1 Fórmula molecular del Dodecil Benceno Sulfato de Sodio.[5]**

### 2.3. SURFACTANTES

Del hecho de su doble afinidad, la molécula de anfifilo “no se siente bien” en el seno de un solvente, sea este apolar o polar, puesto que existirá siempre una interacción que no será satisfecha. Es por esto que las moléculas de anfifilo muestran una fuerte tendencia a migrar a las interfaces, de forma tal, que su grupo polar se encuentre dentro del agua y su grupo apolar se encuentre orientado hacia un solvente orgánico o en la superficie.

Se denomina superficie al límite entre una fase condensada y una fase gaseosa; e interfase al límite entre dos fases condensadas. Esta diferenciación es cómoda, pero no indispensable.

Los ingleses utilizan la palabra “surfactante” (agente activo de superficie) para denotar una sustancia que posee una actividad superficial o interfacial. Es necesario

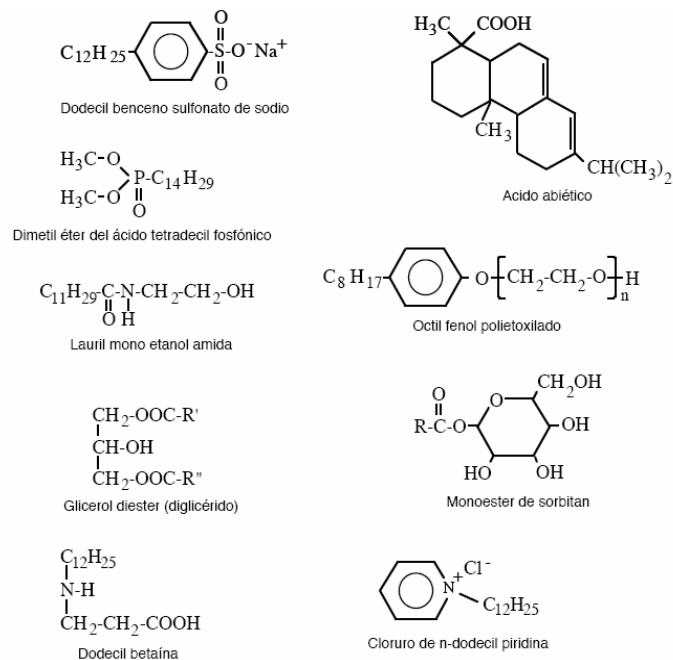
hacer resaltar que todos los anfífilos no poseen tal actividad, para que esto suceda es necesario que la molécula posea propiedades relativamente equilibradas, quiere decir, que no sea ni demasiado hidrófila ni demasiado hidrófoba.

La palabra “tensoactivo” se refiere a una actividad o a una acción sobre la tensión superficial o interfacial, es decir sobre la energía libre de Gibbs. Este término es equivalente a surfactante sólo si se supone que la actividad superficial o interfacial se traduce necesariamente en 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 muchas otras propiedades y se les califica según las aplicaciones: jabones, detergentes, dispersantes, emulsionante, espumantes, bactericida, inhibidores de corrosión, antiestático, etc. o estructuras de tipo: membrana, microemulsión, cristal líquido, liposomas o gel.<sup>[5]</sup>

## **2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SURFACTANTES**

Desde el punto de vista comercial los surfactantes se clasifican según su aplicación. Sin embargo, se observa que muchos surfactantes son susceptibles de ser utilizados en aplicaciones diferentes, lo que provoca confusiones.

Por tanto, se prefiere clasificarlos de acuerdo a la estructura de su molécula, o más exactamente según la forma de disociación en el agua.<sup>[5]</sup> La figura 2.2 muestra las fórmulas desarrolladas de algunos surfactantes corrientes.



**Figura 2.2 Fórmulas desarrolladas de algunos surfactantes corrientes.[5]**

### 2.4.1. Surfactantes aniónicos

Se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es en general un metal alcalino. A este tipo pertenecen los detergentes sintéticos como los alquil bencenos sulfonatos, los jabones (sales de sodio de ácidos grasos), los agentes espumantes como el lauril sulfato, los humectantes del tipo sulfosuccinato, los dispersantes del tipo lignosulfonatos, etc. La producción de los surfactantes aniónicos representa alrededor de 55% de los surfactantes producidos anualmente en el mundo.<sup>[5]</sup>

### 2.4.2. Surfactantes noiónicos

Están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40% del total. En solución acuosa no se ionizan, puesto que ellos poseen grupos hidrófilos del tipo alcohol, fenol, éter o amida. Una alta proporción de estos surfactantes puede tornarse relativamente hidrofílicos gracias a la presencia de una cadena poliéter del tipo polióxido de etileno. El grupo hidrófobo es generalmente un

radical alquilo o alquil benceno y a veces una estructura de origen natural como un ácido graso, sobre todo cuando se requiere una baja toxicidad.<sup>[5]</sup>

### **2.4.3. Surfactantes catiónicos**

Se disocian en una solución acuosa en un catión orgánico anfífilo y un anión generalmente del tipo halogenuro. La gran mayoría de estos surfactantes son compuestos nitrogenados del tipo sal de amina grasa o de amonio cuaternario. La fabricación de estos surfactantes es más cara que la de los anteriores y es por esta razón que no se les utilizan salvo en caso de aplicación particular, como cuando se hace uso de sus propiedades bactericidas o de su facilidad de adsorción sobre sustratos biológicos o inertes que poseen una carga negativa. Esta última propiedad hace que sean excelentes agentes antiestáticos, hidrofobantes, así como inhibidores de corrosión, y puedan ser utilizados tanto en productos industriales como para uso doméstico.<sup>[5]</sup>

## **2.5. ESPUMAS**

Las espumas consisten en una alta fracción volumétrica de gas disperso en un líquido; debido a esto las burbujas de gas en la espuma están distorsionadas en forma de poliedro, separado por películas finas de líquido.<sup>[6]</sup> Hay muchas similitudes entre la estructura de las espumas y las emulsiones concentradas debido a que las ecuaciones termodinámicas e hidrodinámicas son muy similares, por ende se puede tener un punto de vista macroscópico general. En adición, desde un punto de vista microscópico, los diferentes tipos de fuerza superficiales (electroestáticas, van der Waals, estéricas, hidratación, etc.) son aplicables tanto en espumas como en emulsiones y suspensiones.

Las propiedades macroscópicas de las espumas dependen de las propiedades de las partículas individuales de la interacción. En general, en una dispersión se tienen

diferentes tamaños de partículas, composición y por ende diferentes tensiones superficiales. En el modelo termodinámico de Gibbs, modificado posteriormente por Boruvka y Neuman (1977), una espuma es tratada como un sistema multifásico.[6]

### **2.5.1. Adsorción del surfactante en la superficie gas-líquido: tensoactividad**

Las burbujas que se forman representan un aumento del aire superficial gas-líquido. La nueva superficie que se crea por agitación está por tanto disponible para que se produzca la adsorción de un surfactante presente en el líquido.

Un surfactante es una sustancia cuya molécula posee un grupo hidrófilo y un grupo hidrófobo o lipofílico (el dodecibenceno sulfonato de sodio usado en los polvos para lavar la ropa o el oleato de potasio en los jabones o más aún el lauril sulfato de sodio de los champúes).

Una de las propiedades fundamentales de los surfactantes es la fuerte tendencia de adsorberse en las superficies o en las interfases. Una vez adsorbidas en la superficie, estas moléculas tensoactivas producen un descenso notable de la tensión superficial del agua desde 72,75 mN/m hasta 30 mN/m para una solución diluida de surfactante; y muchas veces hasta menos, como es el caso de los surfactantes perfluorados. Ciertos productos pueden disminuir la tensión de la interfase agua-aceite a valores extremadamente bajos del orden de 0,001 mN/m. A menor valor de tensión más fácil se crea un área superficial o interfacial.[7].

### **2.5.2. Separación del gas por gravedad: acumulación de burbujas**

La formación de un sistema disperso no es la única razón cuando se está bajo la presencia de tensioactivos. Luego que las burbujas se forman, ellas se separan debido a la diferencia de densidad con la fase líquida.

Estas burbujas se amontonan unas sobre otras y en este proceso se forman películas entre las burbujas. Estas películas son sometidas a esfuerzos de estiramiento y es indispensable que ellas no se rompan, ya que la espuma se forma a partir de la acumulación de burbujas.<sup>[7]</sup>



### 2.5.3. Efecto Gibbs-Marangoni

Es aquí donde el tensoactivo juega un papel determinante en lo que se conoce como efecto Gibbs-Marangoni: cuando una película gruesa se forma entre dos burbujas y las burbujas se acercan a menudo éstas se aplastan, la película está expuesta a un esfuerzo de estiramiento frecuentemente complejo, en el que el área superficial gas-líquido aumenta rápidamente. La concentración de surfactante adsorbido (denominado adsorción  $\Gamma$  de moléculas por unidad de superficie) tiende a disminuir en la zona estirada donde la película es más delgada que en las zonas vecinas. En consecuencia, la tensión superficial aumenta según la relación que permite calcular la elasticidad de Gibbs  $\varepsilon$ .<sup>[7]</sup> La ecuación para calcular la elasticidad de Gibbs es:

$$\varepsilon = 2 \cdot \frac{d\gamma}{d \ln A} = -2 \cdot \frac{d\gamma}{d \ln \Gamma} \quad (\text{Ec.2.1})$$

donde:  $\gamma$  = tensión superficial ( $\text{N/m}^2$ ),  $A$  = área superficial ( $\text{m}^2$ ),  $\Gamma$  = concentración superficial de moléculas adsorbidas en la superficie. El coeficiente 2 indica que la película está comprendida por dos superficies gas-líquido.

Como lo indica la figura 2.3, se tiene una diferencia de tensión entre la zona estirada de la película (tensión más elevada, menor grosor) y las zonas adyacentes (no estirada, tensión más baja). Esto produce un fenómeno denominado inestabilidad de Marangoni, el cual se puede observar en las cocinas cuando se le agrega una gota de detergente líquido a un fregadero lleno de agua; en la superficie quedan gotas de aceite flotando. El gradiente de tensión produce una fuerza dirigida desde la zona donde se encuentra el exceso de tensoactivo, es decir donde la tensión es baja, hasta la zona de alta tensión, que desplazan a las gotas de aceite.

En el caso de las películas estiradas entre la superficie libre y una burbuja, o entre dos burbujas, el movimiento superficial se produce desde la zona vecina hasta la zona estirada; si la película es suficientemente delgada, este movimiento superficial se lleva a cabo desde el líquido hasta la parte delgada de la película, lo que restaura su espesor original, o bien impide que el estiramiento prosiga. Se asiste entonces a un mecanismo (denominado Gibbs-Marangoni) que confiere una cierta elasticidad a una película estirada entre dos burbujas.<sup>[7]</sup>

El mecanismo Gibbs-Marangoni es por tanto el fenómeno sobre el que reposa la existencia misma de la espuma. En lo que concierne a la noción de abundancia de espuma o más exactamente el poder espumante de una solución, es cuantificado por la espumabilidad, medido como el volumen de espuma formada en ciertas circunstancias dadas.<sup>[7]</sup>

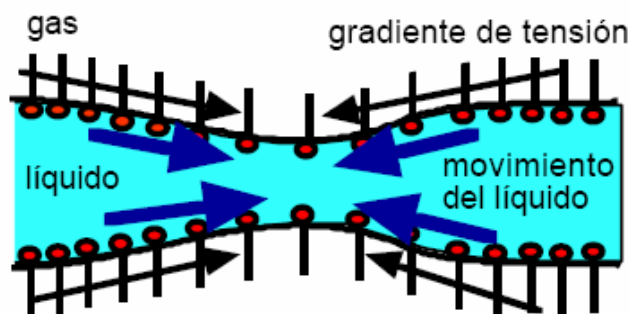


Figura 2.3 Efecto Gibbs-Marangoni.<sup>[7]</sup>

## 2.6. ESPUMABILIDAD

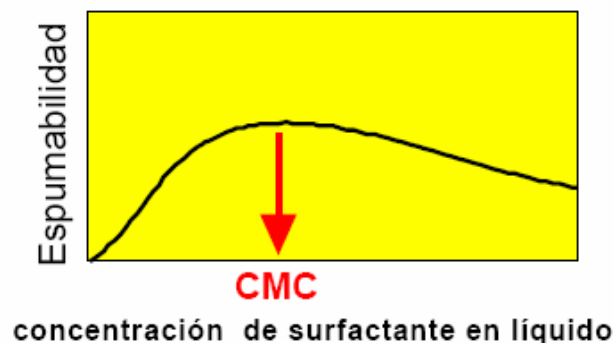
La espumabilidad es el poder de generar espuma de un líquido, la cual está directamente relacionada a factores físicos tales como la viscosidad, tensión superficial, entre otros.<sup>[8]</sup>

### 2.6.1. Máximo de espumabilidad y concentración micelar crítica

El gradiente de adsorción entre la zona delgada y la zona vecina se debe al gradiente de tensión correspondiente, el cual depende del equilibrio entre la superficie y la fase líquida, que se explica por la relación característica de la isoterma de Gibbs relacionada al equilibrio, la adsorción  $\Gamma$  a la tensión  $\gamma$  y a la concentración de surfactante en fase líquida  $C$ .<sup>[7]</sup>

$$\frac{d\gamma}{d \ln C} = -RT\Gamma \quad (\text{Ec.2.2})$$

A baja concentración de surfactante, la tensión superficial se parece a la del agua pura y por tanto no hay un gradiente de tensión apreciable por estiramiento de la película. Esto corresponde con las medidas experimentales que indican que la espumabilidad aumenta a medida que la concentración de surfactante se incrementa hasta la concentración micelar crítica (CMC), y que a continuación ésta tiende a invertirse como lo indica la figura 2.4.<sup>[7]</sup>



**Figura 2.4 Variación típica de la espumabilidad con la concentración del tensoactivo en la fase líquida.[7]**

## 2.7. ESTABILIDAD

Una vez que el líquido ha espumado, su estabilidad se define como la persistencia en el tiempo de la espuma.<sup>[8]</sup>

La tasa de deterioro de una espuma líquida depende de las actividades relativas de tres fenómenos físicos: separación gravitacional (drenaje), floculación y coalescencia, y la maduración de Ostwald (difusión gaseosa). La separación gravitacional envuelve el aumento de las burbujas a través de la masa de espuma (un fenómeno también conocido como cremado), mientras que al mismo tiempo el líquido se drena bajo la influencia de la gravedad, a través los bordes de Plateau en las burbujas. El flujo relativo entre las burbujas de diferentes tamaños también induce a la separación debido al arrastre por viscosidad. La tasa a la cual el drenaje/separación ocurre depende de la viscosidad de la espuma y de la presencia de cualquier coagulante o fases dispersas separadas.

La coalescencia involucra al adelgazamiento y a la ruptura final de la película que separan dos o más burbujas. La coalescencia normalmente ocurre como resultado del adelgazamiento de la película debido al drenaje prolongado.<sup>[6]</sup>

La maduración es la pérdida de gas por difusión desde una burbuja pequeña (alta presión) a una burbuja más grande (baja presión). Ya que todas las espumas contienen una distribución al azar de tamaños de burbujas, se observará hasta cierto punto la influencia de la maduración en el deterioro de la espuma. La tasa a la cual ocurre este fenómeno depende de la difusión del gas del cual está hecha la espuma.<sup>[9]</sup>

## 2.8. MECANISMO DE RUPTURA DE ESPUMAS

Una vez que la espuma se forma, súbitamente ésta sufre una degradación más o menos lenta, a una escala de tiempo de algunos minutos a algunas horas, en su

transcurso entran en juego diferentes mecanismos: la segregación y el drenaje gravitacional, la succión capilar y la difusión gaseosa intra-burbuja.<sup>[7]</sup>

### **2.8.1. Segregación de burbujas y drenaje gravitacional del líquido**

Durante los primeros instantes se produce una segregación gravitacional de las burbujas del hecho que el empuje de Arquímedes es más fuerte sobre las burbujas grandes que sobre las pequeñas. El rearrreglo relativo de las burbujas no se puede hacer fácilmente hasta que la espuma contenga una proporción volumétrica de líquido mínimo en el orden del 15-20 %. Por tanto, esto se produce sobre todo en los primeros momentos.

El drenaje gravitacional del líquido hacia abajo se produce durante toda la vida de la espuma, pero es evidente que es más importante en la espuma húmeda.<sup>[7]</sup>

### **2.8.2. 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 en poliédricas.

En este momento el contenido de líquido no excede al 10% y continúa disminuyendo ya que la diferencia de curvatura entre los bordes de Plateau (puntos de unión entre tres películas interfaciales que forman  $120^\circ$ ) 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 seguidamente 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 intra-burbuja. 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.<sup>[7]</sup>

### **2.8.3. Difusión gaseosa intra-burbuja**

Cuando las burbujas son poliédricas, las películas intra-burbujas se comportan como películas planas de poco espesor, pero a causa de la ley de Laplace la presión es mayor en las burbujas pequeñas que en las grandes. En consecuencia, existe por lo general un gradiente de presión de una parte y de la otra de una película, que induce una difusión gaseosa a través de esta película. Este fenómeno, llamado maduración de Ostwald, hace que las pequeñas burbujas se desinflen lentamente en las grandes y desaparezcan. Este es el fenómeno que dominó la evolución de las espumas a escala de tiempos intermedios (algunos minutos a algunas horas). En otros términos, el número de burbujas disminuyen y las burbujas devienen grandes poco a poco sin que sea necesario que las películas se rompan (lo que se puede producir, sin embargo, al mismo tiempo).

Este fenómeno es a menudo importante en la práctica, y puede ser inhibido por la presencia de una capa adsorbida insoluble como la que forman las proteínas en la clara de huevo batidas a punto de nieve en la preparación de merengues. En este caso, la disminución del diámetro de una burbuja (que se desinfla en sus vecinas más grandes) produce el aumento de la adsorción (ya que las moléculas adsorbidas son prácticamente insolubles y el valor de la elasticidad es muy elevada). En consecuencia, se produce una reducción de tensión suficiente para compensar la diferencia de presión debida a la ley de Laplace. Otra medida de bloquear la difusión intra-burbuja es de recubrir toda la superficie de partículas sólidas minúsculas (insolubles en el líquido) por ejemplo, los glóbulos de grasa de la leche en la crema batida llamada *Chantilly*, o las partículas de asfaltenos en los petróleos brutos espumantes.<sup>[7]</sup>

## **2.9. ALCOHOLES COMO ADITIVOS PARA ESPUMAS ACUOSAS**

En las espumas acuosas los compuestos orgánicos de superficie activa son los aditivos más estudiados y también son comúnmente los más utilizados en aplicaciones prácticas, entre ellos los alcoholes.

Estos aditivos típicamente estabilizan la espuma al permitir que las moléculas de surfactantes formen una película espumosa empacada que exhibe más elasticidad y más resistencia al drenaje de líquido, y consecuentemente es menos susceptible a las perturbaciones externas.

Entre los efectos producidos por los alcoholes en las espumas se pueden mencionar que tienen la propiedad de disminuir la concentración micelar crítica de los surfactantes lo cual conlleva a un efecto de estabilización. Los alcoholes aparentemente afectan la viscosidad superficial del surfactante, lo que lleva a un aumento en la vida de la espuma al mismo tiempo disminuyendo en gran proporción la tasa de drenaje de líquido de la espuma.<sup>[6]</sup>

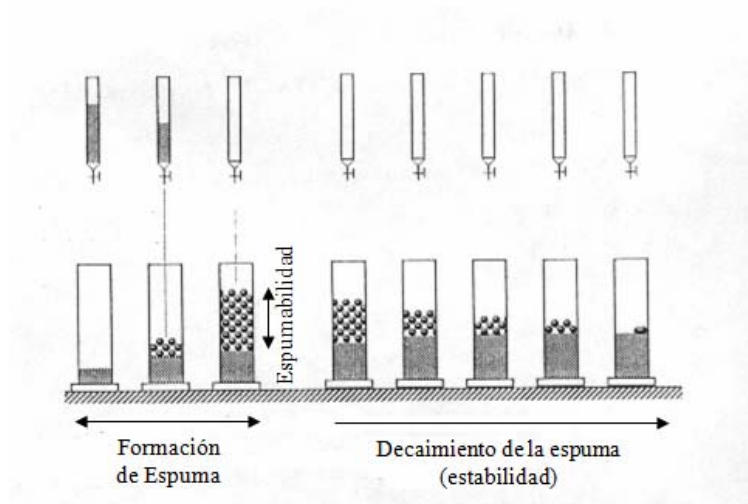
## **2.10. MÉTODOS DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ESPUMAS**

### **2.10.1. Método estático de Ross-Miles**

En este método (figura 2.5) se deja caer el líquido espumante en un cilindro graduado que contiene una cierta cantidad del mismo líquido, 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 desaparecer es una medida de estabilidad.

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 columna de 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 toma 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 dicho proceso indica la persistencia de la espuma.<sup>[8,9]</sup>

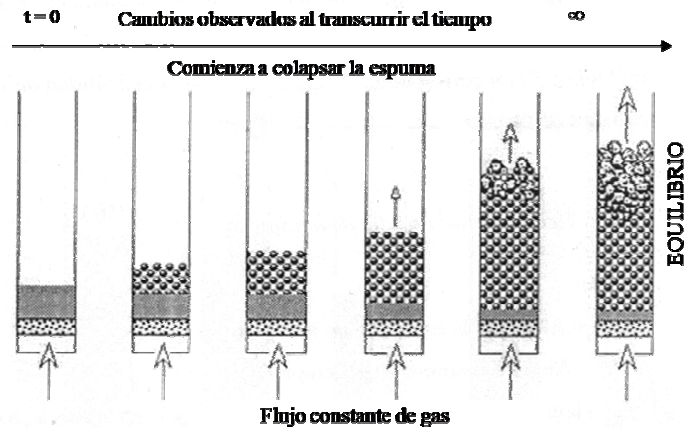


**Figura 2.5. Método estático de Ross-Miles.[8]**

### 2.10.2. 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 2.6). En la parte inferior de la columna se coloca un vidrio sinterizado, cuya función es generar las burbujas. En la columna se coloca un cierto volumen de la solución a espumar y al fluir el gas, las burbujas quedan atrapadas en el líquido dando lugar a la formación de espuma. La espuma formada flota sobre el líquido y se acumula, formándose una columna de espuma alimentada por burbujas de gas provenientes del fondo del aparato. En la parte superior del mismo se produce el decaimiento de la espuma en forma relativamente rápida.<sup>[8,9]</sup>





**Figura 2.6. Método dinámico de Bikerman.[8]**

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. La altura de la espuma depende tanto de la espumabilidad (generación de espuma) como de la estabilidad (decaimiento de la espuma).

La proporción de volumen de espuma generado por un flujo de gas constante, se denomina índice de espumabilidad <sup>[10]</sup>

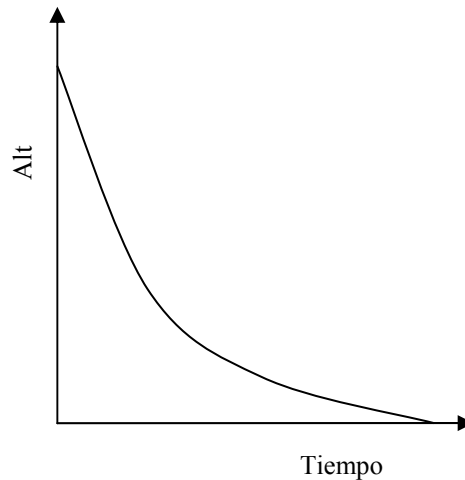
$$\text{Índice de espumabilidad} = \frac{\text{Volumen de Espuma}}{\text{Flujo de gas}} \quad (\text{Ec.2.3})$$

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 (figura 2.7), en la que se observa el decaimiento de la espuma en el tiempo, y se determina el tiempo de vida media de la espuma:

$$\text{Tiempo de vida media} = \int \frac{H(t)}{H(0)} dt \quad (\text{Ec.2.4})$$

donde:  $H(0)$  = Altura inicial de la espuma (en un tiempo  $t = 0$ );  $H(t)$  = Altura de la espuma en un tiempo;  $t$  = tiempo.



**Figura 2.7. Curva de estabilidad de espumas.[10]**

### 2.10.3. Método de transmisión de luz

Un rayo de luz que entra a una espuma es reflejado y refractado en cada plano de la burbuja; suponiendo ésta como un poliedro. Ya que cada plano asume una configuración al azar con respecto al rayo, la luz que sale de la espuma debe de ser uniforme a través de la superficie de ésta (cuando los efectos de absorción son ignorados). Si el rayo entrante tiene un área seccional  $A_o$  y una intensidad  $I_o$ , la intensidad de la luz que deja la espuma es  $I = A_o I_o / A_e$ , donde  $A_e$  es la superficie externa de la espuma. Si se supone que el área externa ( $A_e$ ) es representativa de todas las superficies dentro de la espuma, los cambios medidos en  $(I_o/I)$  producen cambios en el área relativa total de la espuma.

Para espumas acuosas fue monitoreada la transmisión de luz en intervalos periódicos, graficando la relación  $I_o/I$  versus tiempo; los valores de  $I_o/I$  disminuyeron

con el tiempo. <sup>[11]</sup> La transmisión de luz a través de las espumas se representa por la siguiente ecuación: <sup>[12]</sup>

$$T = \frac{(5l^* / 3L)\beta}{[1 + (4l^* / 3L)]\sinh \beta} \quad (\text{Ec.2.5})$$

$$\beta = \sqrt{\frac{3L^2}{l^* la}} \quad (\text{Ec.2.6})$$

donde  $T$  = transmisión de luz,  $l^*$  = recorrido medio de libre transporte,  $la$  = longitud de absorción, y  $L$  = longitud del recorrido. Para  $L$  grande y sin absorción ( $L \gg l^*$  y  $\beta \ll 1$ ), la ecuación 3 se reduce a  $T \approx 5 l^* / 3L$ . Valores de  $l^*$  fueron medidos para diferentes espumas y se encontraron proporcionales al diámetro promedio de burbuja, medidos con un microscopio. La relación  $l^* = (3,5 \pm 0,5)d$  fue obtenido, donde  $d$  es el diámetro promedio de la burbuja.

Lachaise y colaboradores<sup>[13]</sup> propusieron que la intensidad de la luz reflejada desde una espuma es una medida del área total, obteniéndose:

$$A(t) / A(0) = KI(t)I(0) \quad (\text{Ec.2.7})$$

donde  $A(0)$  = área de la espuma a  $t = 0$ ,  $K$  = constante de proporcionalidad,  $I(t)$  = intensidad de la luz reflejada a tiempo  $t$ , y  $I(0)$  = intensidad de la luz reflejada a tiempo  $t = 0$ .

La ecuación (2.7) es derivada usando los siguientes argumentos: el flujo reflejado de una burbuja es proporcional al cuadrado del radio, o al área de superficie de la burbuja. El flujo total reflejado de todas las burbujas es a su vez proporcional al área de superficie de la espuma, en las primeras capas de burbuja. Si la espuma es monodispersa, esta área es proporcional al área interfacial de la espuma completa.

Aunque Prud'homme y Khan<sup>[6]</sup> hicieron comparaciones con las espumas de diferentes estabilidades para mostrar su validación cualitativa, la ecuación (2.7) no puede ser considerada como verificada desde el punto de vista experimental. Una simple burbuja refleja más luz cuando crece que cuando la burbuja es más pequeña que el rayo incidente. Por ende, la reflectancia se incrementa porque la sección de la burbuja que cruza el rayo incidente está incrementándose. Este no es el caso cuando un rayo es incidente en una super-espuma, en el cual la sección de espuma cruzada e iluminada por el rayo es constante y determinada por el diámetro del rayo. La analogía entre la reflectancia de una simple burbuja y la de la espuma completa es por ende falsa. La inferencia general de proporcionalidad entre el flujo reflejado y el área de superficie es incorrecta.

Desde que Rosenholm y col.<sup>[14]</sup> reportaron cambios en la reflectancia de diferentes espumas con el tiempo, y que las correlaciones de la reflectancia cambian con otras propiedades físicas de las espumas, el método de dispersión de luz ciertamente amerita mayor estudio. Este método es experimentalmente conveniente, y es insensible a fluctuaciones de temperatura y efectos hidrostáticos. Un análisis riguroso se requiere para relacionar los cambios reflejados con el cambio del área de las espumas.

## **CAPITULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO**

En este capítulo se muestra la metodología utilizada para la solución del problema planteado. El procedimiento metodológico consta de varias etapas, las cuales se describen a continuación.

### **3.1. FORMULACIÓN DE ESPUMAS ACUOSAS, MIDIENDO LAS ETAPAS DE VIDA DE LA ESPUMA (ESTABILIDAD, ESPUMABILIDAD Y COLAPSO)**

#### **3.1.1 Selección de la concentración del surfactante y medición de propiedades de la solución a espumar**

Se hicieron estudios preliminares para seleccionar la concentración más adecuada del surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio (DSS), el cual es uno de los espumantes más utilizados (en dentífricos, champúes, jabones de baño, entre otros). Forma espumas de vida relativamente larga lo que permite el estudio de las influencias de los alcoholes en sus etapas de vida, gracias a que los cambios que ocurran se pueden observar en un período de tiempo considerable. En la tabla 3,1 se reportan las propiedades fisicoquímicas del DSS.

**Tabla 3.1 Propiedades del Dodecil Sulfato de Sodio.**

Marca	Scharlau
% de pureza	95%
Fórmula molecular	$C_{12}H_{25}NaO_4S$
Peso Molecular	288,38 g/mol
Densidad	1.010 kg/m <sup>3</sup>
Punto de fusión	479 K (206°C)
Punto de ebullición	1.117 K (844°C)

La alta espumabilidad del surfactante trae como consecuencia que la concentración necesaria sea baja (menores de 2,33 g/dl) a fin de obtener una columna de espuma que sea fácil de caracterizar y que tenga un tiempo de vida considerable; otro de los factores que influyeron en la determinación de la concentración del surfactante es el largo de la celda y el rango de medición del equipo. Si se utiliza una concentración muy alta (mayor de 2,33 g/dl según la teoría) la columna de espuma rebasa el nivel de medición, lo que conlleva a la aparición de lecturas erróneas, así como omisión de medidas, ya que ocurren cambios importantes más allá del límite del rango de medida del equipo Turbiscan.

Es por ello que se trabajó muy por debajo de la concentración micelar crítica (CMC = 2,33 g/dl), donde se produce la máxima espumabilidad. Las concentraciones seleccionadas fueron: 0,0190gr/dl para la espuma A y 0,0205gr/dl para la espuma B.

Una vez escogidas las concentraciones se procedió a medir las propiedades de la solución de surfactante a espumar, sin y con alcohol, tales como: densidad mediante el método del picnómetro y tensión superficial mediante el método del anillo de DuNoy. Para la medición de estos parámetros se utilizó una base de espuma sola (aproximadamente 3 ml para densidad y 50 ml para tensión superficial) y progresivamente se añadió la cantidad de alcohol necesario hasta completar las tres

concentraciones de: 0,1%, 0,5% y 1% vol. de alcohol en la solución, manteniéndose constantes las cantidades iniciales de agua y de surfactante.

### **3.1.2 Formulación de las espumas acuosas**

Las espumas acuosas se formularon con agua destilada y surfactante dodecil sulfato de sodio, el cual se disuelve completamente en agua, a una determinada concentración (0,1g/ml a 20°C).

Mediante pruebas preliminares se determinó la cantidad de espuma a utilizar en las celdas de medición del Turbiscan (140 mm de alto y 6 mm de ancho), fabricadas con vidrio borosilicato Pyrex 15. Cada celda cuenta con su respectivo tapón de teflón negro, sello de agua, anillo de vitón y tapa enroscable.

El recorrido efectivo de medición del Turbiscan es de 80mm de alto de la celda, comenzando por el límite inferior, por lo cual se usó una solución de 3 a 4 ml que equivalen a 26,67 y 35,56 mm de altura, respectivamente. Al espumar se obtiene un máximo de 65 mm de altura dentro de la columna (tomando en cuenta el tapón de la celda). Esta referencia se usó para la espuma sin alcohol.

Una vez adicionada la solución dentro de la celda y en el equipo precalentado (se debe encender 30 minutos antes de cualquier escaneo) se procedió a formar la espuma utilizando una agitación vigorosa de 20 repeticiones con 30 cms de recorrido a aproximadamente 45° de inclinación, esto permite tanto la homogeneización de la solución así como la dispersión del aire y formación de burbujas. Este tipo de preparación evita que la cantidad de aire dispersado en la espuma posea gran variación, ya que al mantenerse cerrada la celda la cantidad de aire siempre será la misma. En la figura 3.1 se muestra la espuma formada en la celda de medición del equipo Turbiscan.

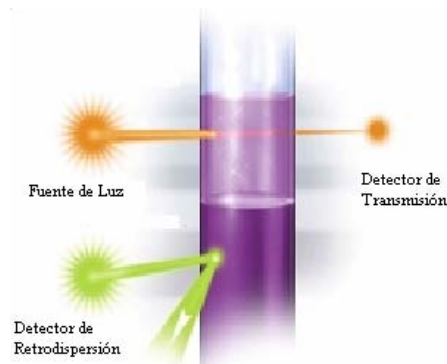


**Figura 3.1 Espuma formada en la celda de medición del Turbiscan.**

### **3.1.3 Medición de las etapas de vida de la espuma (estabilidad, espumabilidad y colapso), utilizando la transmisión y retrodispersión de luz mediante el Turbiscan MA classic 2000**

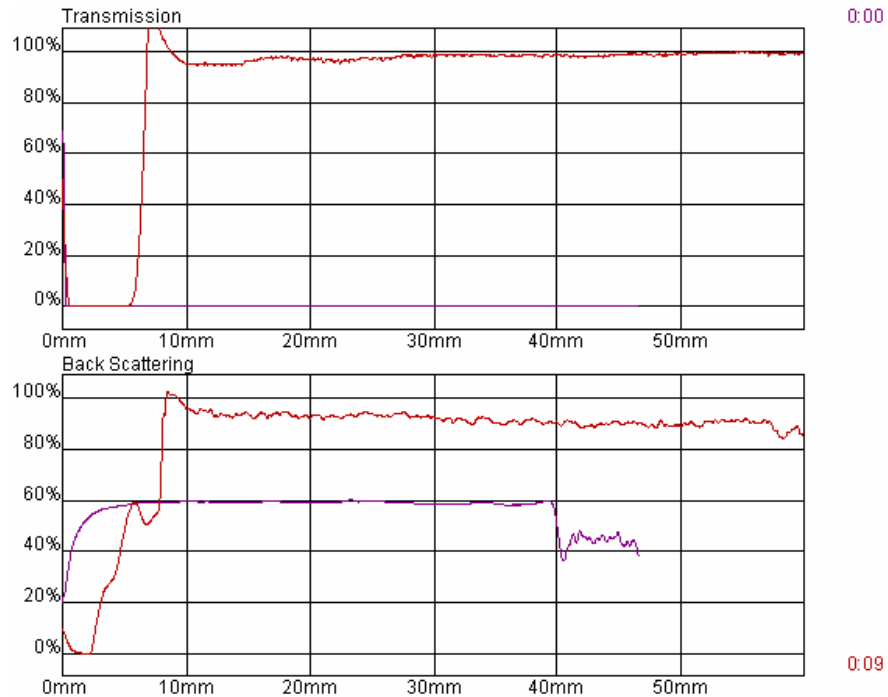
El funcionamiento del equipo para la medición de las etapas de vida de la espuma consiste en hacer pasar un haz de luz por la celda con la espuma, el cual corresponde a un diodo electro lumínico cercano al infrarrojo ( $\lambda_{\text{aire}}=850\text{nm}$ ); a lo largo de 80 mm de la longitud de la celda, comenzando por el fondo de la misma, y adquiriendo información cada 40  $\mu\text{m}$ . Dos sensores ópticos sincronizados reciben respectivamente la luz transmitida a través de la muestra ( $180^\circ$  desde la luz incidente, sensor de transmisión) y la luz retrodispersada por la muestra ( $45^\circ$  desde la radiación incidente, detector de retrodispersión), como se muestra en la figura 3.2.





**Figura 3.2. Principio de medición del Turbiscan Classic MA 2000.[15]**

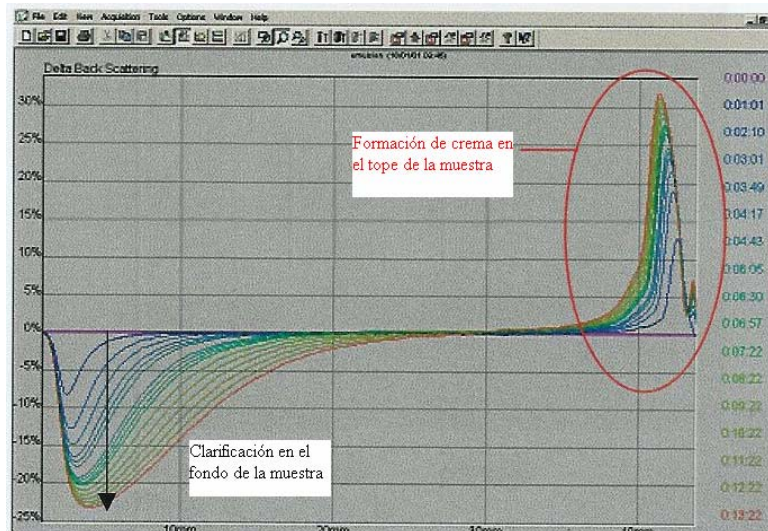
Las variables de respuesta del equipo son la radiación transmitida o transmisión y la retrodispersa o retrodispersión (*back scattering*) en porcentaje relativo a los estándares (suspensión de esferas monodispersas y aceite de silicón) como función de la altura de la espuma en milímetros, tal como se reporta en la figura 3.3.



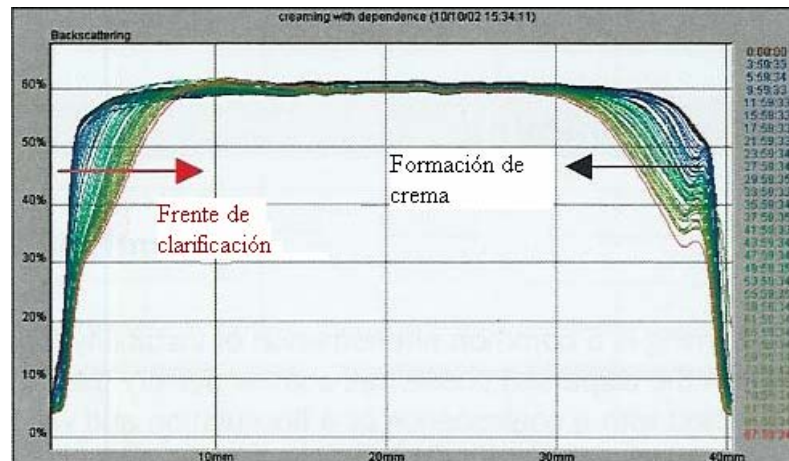
**Figura 3.3. Transmisión y retrodispersión para aceite de silicón (color rojo) y teflón blanco (color violeta).**

Para la interpretación de la información arrojada por el equipo, se procede a explicar los fenómenos de inestabilidad que el Turbiscan puede detectar, los cuales son: cremado, sedimentación y floculación y coalescencia.<sup>[15]</sup>

**Cremado:** es un fenómeno común de inestabilidad para emulsiones o suspensiones, que ocurre cuando la fase dispersa tiene menos densidad que la fase continua. Puede unirse con coalescencia o floculación y finalmente conllevaría a una separación de fases. Su detección en el Turbiscan es sencilla ya que induce una variación de la concentración entre el tope y el fondo de la celda. Por ende, se obtienen los perfiles mostrados en las figuras 3.4 y 3.5. Se puede observar a simple vista que el flujo de retrodispersión disminuye en el fondo de la muestra y debido a una disminución de la concentración de las partículas en esta parte (clarificación) y su incremento en el tope de la muestra debido al incremento en la concentración de la fase dispersa. Esto es observado cuando ocurre un fenómeno de no dependencia. Si hay dependencia (partículas pequeñas y concentradas) el nivel de dispersión disminuye tanto en el fondo como en el tope.

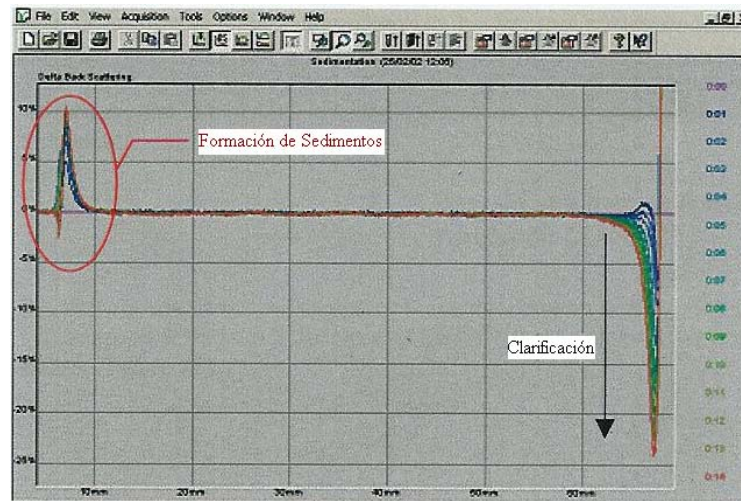


**Figura 3.4. Perfiles referentes al cremado. [15]**



**Figura 3.5. Cremado con dependencia. [15]**

Sedimentación: es un fenómeno similar a la cremación, el cual ocurre cuando la densidad de la fase dispersa es mayor en comparación con la densidad de la fase continua. Es fácil de detectar en el Turbiscan ya que induce una variación de la concentración de la fase dispersa entre el tope y el fondo de la muestra y se obtienen los perfiles mostrados en la figura 3.6. Esta vez se observa que la retrodispersión aumenta en el fondo de la muestra debido a un incremento en la concentración de la fase dispersa (sedimento) y disminuye en el tope de la muestra debido a una disminución de la concentración (clarificación). En este caso es posible tener un fenómeno de dependencia, llevando a una disminución de la retrodispersión en el fondo y tope de la muestra.



**Figura 3.6. Perfiles referentes a la sedimentación. [15]**

c) Floculación y coalescencia: estos fenómenos son muy diferentes desde el punto de vista fisicoquímico, pero ambos llevan a un incremento en el tamaño de las partículas. Por lo tanto, se comportan de la misma manera en el Turbiscan. Ambos fenómenos se diferencian en que la coalescencia es irreversible y conlleva a una fusión de las interfases, y a la creación de una sola gota. La floculación, por otro lado, es sólo una agregación reversible de partículas. En algunos casos, la floculación puede llegar a la coalescencia. La variación del tamaño de partícula como consecuencia de estos fenómenos es fácilmente detectado por el Turbiscan, ya que produce una disminución de la retrodispersión a lo largo de toda la altura de la muestra, (figura 3.7). En el caso de que las partículas sean más pequeñas que el ancho de onda de la luz incidente (850 nm), el nivel de la retrodispersión aumentará. Se puede observar en la figura 3.8 simultáneamente que el nivel de retrodispersión disminuye a lo largo de toda la longitud de la muestra debido a un incremento del tamaño de partículas, característica de una coalescencia o floculación. Además, hay una disminución de la señal de retrodispersión en el fondo de la celda y un incremento en el tope, ambos fenómenos característicos de una cremación.

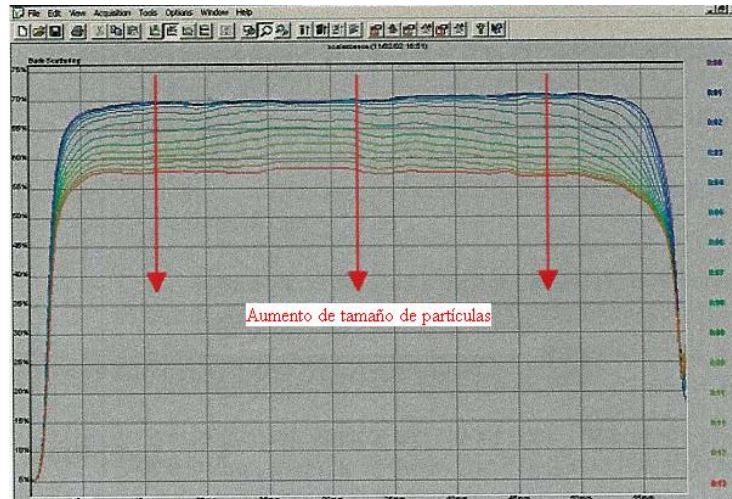


Figura 3.7. Perfiles referentes a la coalescencia. [15]

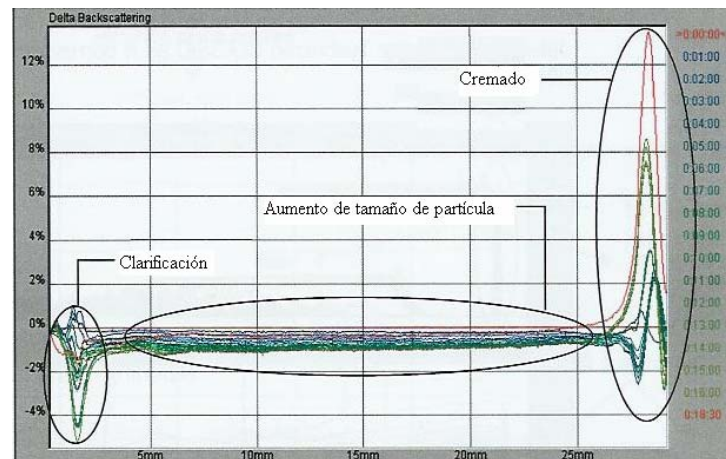


Figura 3.8. Perfiles referentes a un cremado y coalescencia. [15]

### 3.1.4 Análisis de espumas acuosas

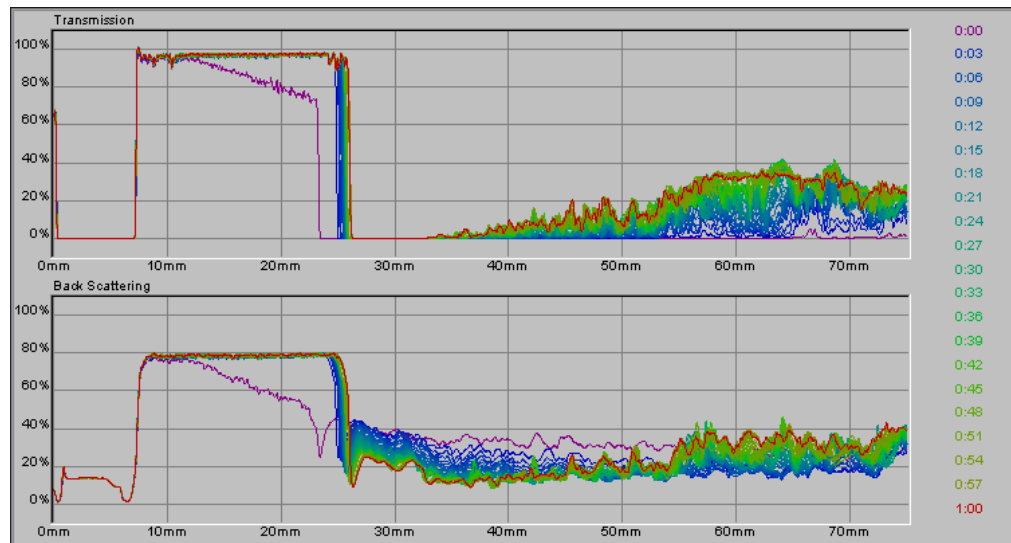
Las espumas siguen un fenómeno de inestabilidad principal, el cual es la maduración de la burbuja de gas por acción de ruptura de la película de líquido que estabiliza el sistema. Es fácilmente detectable en el Turbiscan, ya que corresponde a un cambio en el tamaño de partículas, como se muestra en la figura 3.9.

Los datos de la altura de la espuma en cada medición se obtienen al observar el nivel en donde la transmisión deja de tener un valor igual a 0% y a su vez se forma una figura en forma de montaña en el perfil de retrodispersión; el nivel exacto en mm se observa en la esquina inferior derecha de la pantalla al posicionar el ratón en el punto antes mencionado.

Una vez obtenidos los perfiles de transmisión y retrodispersión con el *software* utilizado para el escaneo (TMA2000), se procedió a reducir el rango de medición a la altura de la columna de espuma. Para obtener la espumabilidad, se eligió la visualización del escaneo correspondiente al minuto 1 y directamente se leyó la altura de la columna de espuma. Esto se hizo debido a que la solución en el minuto 0 no está completamente estabilizada, por ende no se recomienda para la medición de la espumabilidad.

Para observar el colapso de la espuma se procedió a utilizar el *zoom* del *software*, y mediante una función específica se obtuvieron las gráficas de cinética de grosor máximo, las cuales representan el decrecimiento de la espuma tomando como parámetro el tiempo de escaneo total y un umbral de retrodispersión como valor de tolerancia; este procedimiento se realizó para cada escaneo. Los perfiles obtenidos para cada medición se presentan en el anexo A.





**Figura 3.9. Perfiles de transmisión (superior) y retrodispersión (inferior) que indican la espumabilidad y colapso de una espuma acuosa.**

### **3.2. RELACIÓN DEL EFECTO DEL TIPO DE ALCOHOLES Y SU CONCENTRACIÓN EN EL COLAPSO DE UNA ESPUMA ACUOSA**

Los alcoholes utilizados fueron etanol, n-propanol, iso-propanol, n-butanol, sec-butanol, ter-butanol, n-pentanol, ter-pentanol y n-octanol. En la tabla 3.2 se reportan las propiedades fisicoquímicas de estos alcoholes.

Se realizó el escaneo de la espuma en el Turbiscan por un lapso de una hora, para luego añadir una cantidad de alcohol y repetir el escaneo por el mismo lapso de tiempo. El criterio de adición de alcoholes se basó en agregar 0,1; 0,5 y 1% v/v del mismo alcohol en la misma espuma para minimizar los errores causados por las fluctuaciones en la agitación y así tener un parámetro de comparación directo. Este procedimiento se repitió para cada alcohol y para las dos espumas preparadas. Los parámetros a medir principalmente son los que influyen en el colapso de la espuma, debido a que son los que se puede observar directamente en las gráficas arrojadas por

el equipo (decrecimiento de la columna de espuma a través del tiempo). Las gráficas reportadas por el software del equipo se presentan en anexo B.

**Tabla 3.2 Propiedades fisicoquímicas de los alcoholes utilizados en la formulación de espumas acuosas con el surfactante dodecil sulfato de sodio.**

Alcohol	Marca	% de Pureza	Fórmula Molecular	Masa Molecular
Etanol	Riedel-de Häen	99,8	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46,07
N-Propanol	Scharla u	99,5	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60,09
Iso-Propanol	Riedel-de Häen	99,8	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60,09
N-Butanol	Riedel-de Häen	99,5	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,12
Sec-Butanol	Riedel-de Häen	99	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,12
Ter-Butanol	Riedel-de Häen	99	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,12
N-Pentanol	BDH	99	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88,15
Ter-Pentanol	Merck	99	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88,15
N-Octanol	Riedel-de Häen	99,5	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	130,23



### **3.3. DESARROLLO DE MODELOS DE CORRELACIÓN PARA PREDECIR EL COLAPSO DE LA ESPUMA POR ACCIÓN DE UN ALCOHOL**

Este punto se basó en el uso del ajuste de curvas mediante un modelo polinomial, el cual correlacionó el mayor número de puntos experimentales posibles.

Primeramente, se procedió a introducir los valores de cinética de grosor máximo (*Peak Thickness Kinetics*) en forma de tablas en el software estadístico Origin versión 8.0. Este software permitió el arreglo de las curvas obtenidas para la simplificación de las mismas y mediante artificios matemáticos se procedió a organizar las ecuaciones de colapso para cada medida obtenida, para lo cual se obtuvo una ecuación de ajuste para cada curva.

Las funciones arrojadas por el *software* estadístico así como su coeficiente de correlación ( $r^2$ ), el cual determina la precisión del ajuste de la curva, permiten ajustar cualquier punto de colapso obtenido.

### **3.4. TABLA DE DATOS**

#### **3.4.1 Datos de densidades**

A continuación se presentan las tablas correspondientes a la medición de la masa y volumen de las soluciones que se espumaron; estos datos pertenecen a las soluciones sin alcohol y con alcohol (0,1, 0,5 y 1% v/v). El cálculo de la densidad radica en la división de la masa entre el volumen, reportada en la tabla 4.1.

**Tabla 3.3 Valores de masa y volumen para el cálculo de la densidad de las soluciones a espumar para espuma A.**

<b>Espuma</b>	<b>Alcohol</b>	<b>m (g) sin alcohol</b>	<b>V(ml) sin alcohol</b>	<b>M (g) 0,1% alcohol</b>	<b>V(ml) 0,1% alcohol</b>
1	etanol	3,60440	3,60000	3,60620	3,60360
2	etanol	3,413 70	3,40000	3,41660	3,40340
3	n- propanol	3,209 30	3,20000	3,21160	3,20320
4	n- propanol	3,617 60	3,60000	3,61940	3,60360
5	iso- propanol	3,312 30	3,30000	3,33750	3,33033
6	iso- propanol	3,809 50	3,80000	3,81080	3,80380
7	n- butanol	3,415 60	3,40000	3,41570	3,40340
8	n- butanol	3,820 90	3,80000	3,82380	3,80380
9	sec- butanol	3,424 30	3,40000	3,42580	3,40340
10	sec- butanol	3,309 80	3,30000	3,31130	3,30330
11	ter- butanol	3,815 60	3,80000	3,81600	3,80380
12	ter- butanol	3,521 40	3,50000	3,52240	3,50350
13	n- pentanol	3,409 00	3,40000	3,40330	3,40340
14	n-	3,720	3,70000	3,72000	3,70370

	pentanol	90			
15	ter- petanol	3,309 90	3,30000	3,30100	3,30330
16	ter- petanol	3,830 10	3,80000	3,83250	3,80380
17	n- octanol	3,530 10	3,50000	3,52900	3,50350
18	n- octanol	3,623 00	3,60000	3,62590	3,60360

**Tabla 3.3 Valores de masa y volumen para el cálculo de la densidad de las soluciones a espumar para espuma A (continuación).**

Espuma	Alcohol	m (g)	V(ml)	m (g)	V (ml)
		0,5% alcohol	0,5% alcohol	1% alcohol	1% alcohol
1	etanol	3,61520	3,61810	3,62890	3,63605
2	etanol	3,42580	3,41710	3,43710	3,43050
3	n-propanol	3,22020	3,21610	3,23150	3,32050
4	n-propanol	3,62960	3,61810	3,64200	3,63050
5	iso-propanol	3,32150	3,31660	3,33230	3,33335
6	iso-propanol	3,81980	3,81990	3,83040	3,83840
7	n-butanol	3,68490	3,81990	3,69550	3,83840
8	n-butanol	3,83420	3,81990	3,84730	3,83840
9	sec-butanol	3,43120	3,41710	3,44290	3,43050
10	sec-butanol	3,31950	3,31660	3,33130	3,33335
11	ter-butanol	3,82310	3,81990	3,83640	3,83840
12	ter-butanol	3,52780	3,51760	3,53700	3,53535
13	n-pentanol	3,41430	3,41710	3,42480	3,43405
14	n-pentanol	3,73390	3,71860	3,74690	3,73735
15	ter-petanol	3,30930	3,31660	3,32060	3,33335
16	ter-petanol	3,84080	3,81990	3,84930	3,83840

17	n-octanol	3,53860	3,51760	3,54970	3,53535
18	n-octanol	3,63620	3,61810	3,64520	3,63605

**Tabla 3.4 Valores de masa y volumen para el cálculo de la densidad de las soluciones a espumar para espuma B.**

Solución	Alcohol	m (g) sin alcohol	V (ml) sin alcohol	m (g) 0,1% alcohol	V (ml) 0,1% alcohol
1	etanol	2,80830	2,80000	2,80860	2,80280
2	etanol	3,00410	3,00000	3,00510	3,00300
3	n-propanol	3,20540	3,20000	3,20660	3,20320
4	n-propanol	3,80300	3,80000	3,80430	3,80380
5	iso-propanol	3,61020	3,60000	3,61080	3,60360
6	iso-propanol	2,90420	2,90000	2,90600	2,90290
7	n-butanol	3,31030	3,30000	3,31170	3,30330
8	n-butanol	3,61420	3,60000	3,61630	3,60360
9	sec-butanol	3,82930	3,80000	3,83030	3,80380
10	sec-butanol	3,82500	3,80000	3,82660	3,80380
11	ter-butanol	3,61640	3,60000	3,61830	3,60360
12	ter-	3,529	3,50000	3,53020	3,30330

	butanol	00			
13	n-pentanol	3,513 40	3,50000	3,51580	3,50350
14	n-pentanol	3,309 40	3,30000	3,31140	3,30330
15	ter-pentanol	3,120 30	3,10000	3,12180	3,10310
16	ter-pentanol	3,204 10	3,20000	3,20560	3,20330
17	n-octanol	3,221 00	3,20000	3,22300	3,20320
18	n-octanol	3,309 20	3,30000	3,31040	3,30330

**Tabla 3.4 Valores de masa y volumen para el cálculo de la densidad de las soluciones a espumar para espuma B (continuación).**

Solució n	Alcohol	m (g)		V (ml)	
		0,5% alcohol	0,5% alcohol	1% alcohol	1% alcohol
1	etanol	2,8154 0	2,8140 5	2,8263 0	2,8283 0
2	etanol	3,0134 0	3,0150 5	3,0240 0	3,0303 0
3	n-propanol	3,2154 0	3,2166 0	3,2256 0	3,2333 5
4	n-propanol	3,8136 0	3,8199 0	3,8267 0	3,8384 0
5	iso-propanol	3,6199 0	3,6217 0	3,7200 0	3,9781 0
6	iso-propanol	2,9137 0	2,9174 5	2,9235 0	2,9467 5

7	n-butanol	3,3205 0	3,1660 0	3,3316 0	3,1827 5
8	n-butanol	3,6264 0	3,6181 0	3,6385 0	3,6360 5
9	sec-butanol	3,8409 0	3,8199 0	3,8523 0	3,8384 0
10	sec-butanol	3,8376 0	3,8199 0	3,8518 0	3,8384 0
11	ter-butanol	3,6274 0	3,6181 0	3,6391 0	3,6360 5
12	ter-butanol	3,5374 0	3,3166 0	3,5477 0	3,3333 5
13	n-pentanol	3,5280 0	3,5176 0	3,5413 0	3,5353 5
14	n-pentanol	3,3221 0	3,3166 0	3,3345 0	3,3333 5
15	ter-pentanol	3,1310 0	3,1155 0	3,1427 0	3,1312 5
16	ter-pentanol	3,2166 0	3,2166 0	3,2299 0	3,2333 5
17	n-octanol	3,2329 0	3,2161 0	3,2456 0	3,2323 0
18	n-octanol	3,3202 0	3,3166 0	3,3295 0	3,3333 5

### 3.4.2 Datos de colapso

Los datos de colapso fueron extraídos de las gráficas de cinética de grosor máximo, obtenidas del *software* del equipo, ubicadas en el anexo B. Esta información se muestra en el anexo C, la representación 100h/ho corresponde a 100 veces la altura de espuma a un tiempo t entre la altura inicial de la solución antes de espumar. Este

arreglo se hace para evitar la influencia del volumen de inicial de la solución en la altura de la espuma. En las tablas se reportan: el umbral de retrodispersión; límite derecho (LD) y límite izquierdo (LI), utilizados para el cálculo de las gráficas de colapso. Los dos últimos valores numéricos corresponden a la cantidad inicial de solución a espumar (ml) y su valor correspondiente en altura (mm) respectivamente.

### **3.5 EQUIPOS MATERIALES Y SUSTANCIAS**

#### **Equipos**

-Tubiscan Classic MA 2000: consiste en un analizador de estabilidad mediante emisión de luz basado en dos principios: transmisión y retrodispersión, el cual cuenta con una conexión directa a un computador para la transmisión de datos desde el equipo hasta el *software* del mismo.

-Balanza electrónica, marca Symmetry, modelo Cole-Parmer, apreciación  $\pm 0.0001\text{g}$

-Tensiómetro de Du Noüy, marca Expotech Inc., apreciación  $\pm 0,1\text{dyna/cm}$

#### **Materiales**

- Cilindros graduados de 10 mL
- Balones aforados de 100 y 1000 ml.
- Celdas abiertas de 140mm de longitud.
- Micropipeta de 1 a 10  $\mu\text{l}$ , marca SOCOREX, apreciación  $\pm 0,05\ \mu\text{l}$ .
- Micropipeta de 10 a 100  $\mu\text{l}$ , marca Accumax, apreciación  $\pm 0,5\ \mu\text{l}$ .
- Beakers de 10ml.

#### **Sustancias**

- Agua Destilada.
- Dodecil Sulfato de Sodio (DSS, surfactante aniónico)

-Alcoholes:

- n etanol: Marca *Riedel-de Häen* Porcentaje de pureza = 99,8%
- n-propanol: Marca *Scharlau*. Porcentaje de pureza = 99,5 %
- iso-propanol: *Riedel-de Häen*. Porcentaje de pureza = 99,8 %
- n-butanol: Marca *Riedel-de Häen*. Porcentaje de pureza = 99,5 %
- sec-butanol: Marca *Riedel-de Häen*. Porcentaje de pureza = 99 %
- ter-butanol: Marca *Riedel-de Häen*. Porcentaje de pureza = 99 %
- n-pentanol: Marca *BDH*. Porcentaje de pureza = 99 %
- ter-pentanol: Marca *Merck*. Porcentaje de pureza = 99 %
- n-octanol: *Riedel-de Häen*. Porcentaje de pureza = 99,5 %



## **CAPITULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 FORMULACIÓN DE ESPUMAS ACUOSAS, MIDIENDO LAS ETAPAS DE VIDA DE LA ESPUMA, UTILIZANDO LA TRANSMISIÓN Y RETRODISPERSIÓN DE LUZ MEDIANTE EL TURBISCAN MA CLASSIC 2000**

#### **4.1.1 Propiedades de la solución a espumar**

En las tablas 4.1 y 4.2 se reportan la densidad de las soluciones usadas para formar las espumas (0,0190 g/dl para la espuma A y 0,0205 g/dl para la espuma B del surfactante dodecil sulfato de sodio).

Tabla 4.1 Densidad (g/ml) para solución que forma la espuma A.

Espuma	Alcohol	Densidad sin alcohol	Densidad 0,1% alcohol	Densidad 0,5% alcohol	Densidad 1% alcohol
1	etanol	1,0012 2	1,0007 2	0,99920	0,99803
2	etanol	1,0040 3	1,0038 8	1,00255	1,00192
3	n-propanol	1,0029 1	1,0026 2	1,00127	0,97320
4	n-propanol	1,0048 9	1,0043 8	1,00318	1,00317
5	iso-propanol	1,0037 3	1,0021 5	1,00148	0,99969
6	iso-propanol	1,0025 0	1,0018 4	0,99997	0,99792
7	n-butanol	1,0045 9	1,0036 1	0,96466	0,96277
8	n-butanol	1,0055 0	1,0052 6	1,00374	1,00232
9	sec-butanol	1,0071 5	1,0065 8	1,00413	1,00361
10	sec-butanol	1,0029 7	1,0024 2	1,00087	0,99939
11	ter-butanol	1,0041 1	1,0032 1	1,00084	0,99948
12	ter-butanol	1,0061 1	1,0053 9	1,00290	1,00047
13	n-pentanol	1,0026 5	0,9999 7	0,99918	0,99731

14	n-pentanol	1,0056 5	1,0044 0	1,00411	1,00256
15	ter-pentanol	1,0030 0	0,9993 0	0,99780	0,99618
16	ter-pentanol	1,0079 2	1,0075 5	1,00547	1,00284
17	n-octanol	1,0086 0	1,0072 8	1,00597	1,00406
18	n-octanol	1,0063 9	1,0061 9	1,00500	1,00252

Tabla 4.2 Densidad (g/ml) para solución que forma la espuma B.

Espuma	Alcohol	Densidad sin alcohol	Densidad 0,1% alcohol	Densidad 0,5% alcohol	Densidad ad 1% alcohol
1	etanol	1,00296	1,00207	1,00048	0,99929
2	etanol	1,00137	1,00070	0,99945	0,99792
3	n-propanol	1,00169	1,00106	0,99963	0,99760
4	n-propanol	1,00079	1,00013	0,99835	0,99695
5	iso-propanol	1,00283	1,00200	0,99950	0,93512
6	iso-propanol	1,00145	1,00107	0,99871	0,99211
7	n-butanol	1,00312	1,00254	1,04880	1,04677
8	n-butanol	1,00394	1,00352	1,00229	1,00067
9	sec-butanol	1,00771	1,00697	1,00550	1,00362
10	sec-butanol	1,00658	1,00599	1,00463	1,00349
11	ter-butanol	1,00456	1,00408	1,00257	1,00084
12	ter-butanol	1,00829	1,06869	1,06657	1,06430
13	n-pentanol	1,00383	1,00351	1,00296	1,00168
14	n-	1,002	1,00245	1,00166	1,00034

	pentanol	85			
15	ter- petanol	1,006 55	1,00603	1,00498	1,00366
16	ter- petanol	1,001 28	1,00072	1,00000	0,99893
17	n- octanol	1,006 56	1,00618	1,00522	1,00411
18	n- octanol	1,002 79	1,00215	1,00109	0,99885

Se puede observar en las tablas 4.1 y 4.2 que la densidad de las soluciones disminuye a medida que se va agregando más cantidad de alcohol, lo cual es algo predecible debido a que la densidad de cada uno de los alcoholes es menor que las densidades del agua y del surfactante.

En las tablas 4.3 y 4.4 se presentan los valores de tensión superficial de la solución a espumar medidos con el tensiómetro de Du Noüy para la solución A y B respectivamente. La presencia de surfactante en las soluciones reduce sustancialmente la tensión del agua de 72,75 dinas/cm a 35,5 dinas/cm para la solución A y a 36,5 dinas/cm para la solución B, ambas sin alcohol.

**Tabla 4.3 Tensión superficial para la solución A (dinas/cm)**

<b>Espum a</b>	<b>Alcohol</b>	<b>sin alcohol</b>	<b>0,1 %</b>	<b>0,5 %</b>	<b>1%</b>
1	Etanol	35,5	35,5	35,9	36, 2
2	n-propanol	35,5	36,5	37,0	38, 2
3	iso- propanol	35,5	36,0	37,1	39, 4

4	n-butanol	35,5	37,0	38,9	39,3
5	sec-butanol	35,5	36,0	37,0	38,9
6	ter-butanol	35,5	36,7	38,6	40,9
7	n-pentanol	35,5	38,3	38,4	35,0
8	ter-Pentanol	35,5	37,2	34,7	33,7

**Tabla 4.4 Tensión superficial para la solución B (dinas/cm).**

<b>Espuma</b>	<b>Alcohol</b>	<b>Sola</b>	<b>0.1%</b>	<b>0.5%</b>	<b>1%</b>
1	etanol	36.9	36.9	37.4	37.8
2	n-propanol	36.9	36.8	37.9	39.7
3	iso-propanol	36.9	37.0	37.4	39.4
4	n-butanol	36.9	38.4	39.9	40.3
5	sec-butanol	36.9	37.2	38.7	39.5
6	ter-butanol	36.9	36.9	38.0	40.0
7	n-pentanol	36.9	38.0	38.3	36.4
8	ter-Pentanol	36.9	37.5	34.8	33.3

Se observa en dichas tablas que los alcoholes etanol, n-propanol, iso-propanol, n-butanol, sec-butanol, ter-butanol y n-pentanol aumentan hasta en cuatro unidades la

tensión superficial respecto a la solución sin alcohol, en cambio el ter-pentanol a la concentración de 1 % v/v de alcohol disminuyó la tensión en dos unidades para la solución A y en 4 unidades para la solución B.

Un aumento de la tensión superficial de los sistemas con alcohol respecto a la solución sin alcohol, indican una menor cantidad de surfactantes adsorbidos en la superficie por la preferencia de quedarse en el agua al aumentar su solubilidad en ésta por el alcohol de cadena corta como el etanol y n-propanol; o de formar más rápido micelas con el alcohol cosubilizado, como el caso de alcoholes de hidrofiliidad intermedia (butanoles y pentanoles).

El valor de las tensiones superficiales por la adición de n-octanol no se reporta, a causa de que este alcohol no se disolvía en la solución debido a que es esencialmente lipofílico por su larga cadena de carbonos.

#### **4.1.2 Etapas de vida de la espuma**

Por el tiempo que requiere el equipo para iniciar el escaneo y colocar la celda en el equipo no fue posible medir la etapa de formación de la espuma, por lo cual sólo se reporta la altura máxima que alcanza la espuma, definida como espumabilidad, cuyos valores se muestran en las tablas 4.5 y 4.6 para las dos espumas formadas. Los perfiles de transmisión y retrodispersión de donde se obtuvieron estos resultados se muestran en el anexo A.

Para la espuma A se observa en la tabla 4.5 que los alcoholes etanol, n-propanol, iso-propanol, n-butanol y ter-pentanol tienden a aumentar la altura de la espuma con el incremento de la concentración de alcohol, siendo el valor más alto a la concentración de 1% v/v de alcohol. Los alcohol sec-butanol, ter-butanol y n-pentanol no tienen influencia en la espumabilidad; el alcohol n-octanol produce una disminución de hasta 5 unidades en la espumabilidad. El n-octanol produjo una reducción sustancial en la espumabilidad de 6 unidades, actuando como un buen desespumante.

**Tabla 4.5 Espumabilidad para espuma A.**

	0% alcohol	0,1% alcohol	0,5% alcohol	1% alcohol
Alcohol	Altura (mm)	Altura (mm)	Altura (mm)	Altura (mm)
Etanol	7,7	7,7	10,2	9,8
n- propanol	9,8	8,6	6,1	8,1
iso- propanol	8,5	7,7	6,2	7,9
n-butanol	8,1	7,2	5,1	13
sec- butanol	9,7	8,4	4,5	5,0
ter- butanol	7,6	7,3	4,6	3,9
n-pentanol	8,6	8,5	4,1	3,6
ter- pentanol	9,7	8,0	7,5	11,1
n-octanol	11,5	4,2	5,0	5,7

**Tabla 4.6 Espumabilidad para espuma B.**

	0% alcohol	0,1% alcohol	0,5% alcohol	1%alcoh ol
Alcohol	Altura mm	Altura mm	Altura mm	Altura mm
Etanol	22,1	22,1	20,9	10,0
n-propanol	24,1	15,2	16,3	12,3
iso- propanol	15,4	9,8	9,6	12,2
n-butanol	23	21,9	20,5	20,6



sec-butanol	28,1	11,3	18,4	23,5
ter-butanol	18,4	16,9	9,8	11,8
n-pentanol	23,7	23,9	23,8	19,0
ter-pentanol	18,2	20,3	24,3	20,3
n-octanol	24,3	7,9	8,0	7,7

Para la espuma B, tabla 4.6, se forma una cantidad de espuma considerable en comparación a la espuma A, tabla 4.5, lo que significa que hubo perturbaciones en la agitación y en la dispersión de aire dentro de la solución y que la diferencia entre la concentración aunque mínima hizo que espumara más, otro motivo de esta diferencia entre espumabilidades radica en que el promedio de las soluciones usadas para espumar fue de 3,27 ml para la espuma A y de 3,65 ml para la espuma B, la diferencia entre volúmenes hace que la columna de espuma sea más alta para la espuma B.

En cuanto a la influencia de los alcoholes en la espumabilidad para una concentración de 1% v/v, la tendencia es que alcoholes como el etanol, n-propanol y ter-butanol reducen a la mitad la espumabilidad, funcionando como buenos desespumantes. Los alcoholes como iso-propanol, n-butanol, sec-butanol y n-pentanol aportan un efecto casi despreciable en la espumabilidad. Mientras que alcoholes como ter-pentanol aumentan la espumabilidad. El n-octanol es el que produjo la mayor reducción en la espumabilidad, desde 24,3 mm hasta 7,7 mm, actuando como un buen desespumante en todo el rango de concentración estudiado; con 0,1 % de octanol se disminuye la espumabilidad en 16,4 unidades, lo cual es significativo.

Como una observación adicional el n-octanol formó un líquido turbio bajo la espuma, lo que se representa en las bajas mediciones de los perfiles de transmisión y

retrodispersión correspondientes a esa altura, debido a la naturaleza hidrófoba del alcohol. Este comportamiento no se observó para ninguno de los otros alcoholes utilizados.

## **4.2 RELACIÓN DEL EFECTO DEL TIPO DE ALCOHOL Y SU CONCENTRACIÓN EN EL COLAPSO DE LAS ESPUMAS ACUOSAS**

En las figuras 4.1 a 4.18 se representa la última etapa de vida de la espuma, dada por el colapso de la misma en el tiempo.

Como información adicional en el anexo B se reportan las gráficas de colapso para cada espuma obtenidas del cálculo de la cinética de grosor máximo (*Peak thickness kinetics*) y en el anexo C las tablas extraídas de esas gráficas.

A grandes rasgos es muy impredecible el comportamiento de las espumas, aunque se mantuvieron las condiciones de formación lo más similares posibles, hubieron diferencias entre las espumas de una misma formulación: para la espuma A sin ningún aditivo se obtuvo un promedio de 36 minutos de colapso y para la espuma B de 43 minutos, en este último caso los tiempos de colapso fueron más uniformes teniendo un intervalo de 7 minutos.

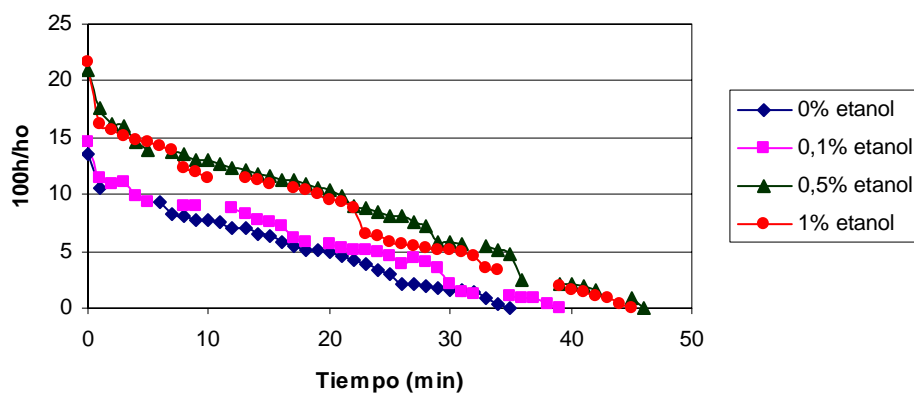


Figura 4.1. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de etanol.

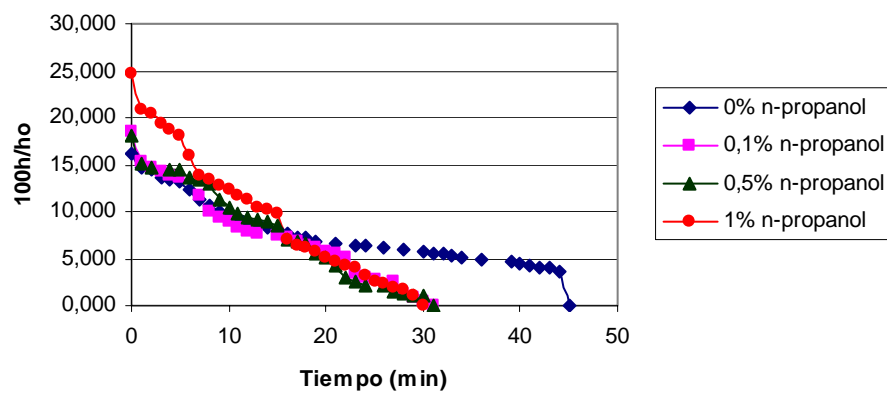


Figura 4.2. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-propanol.

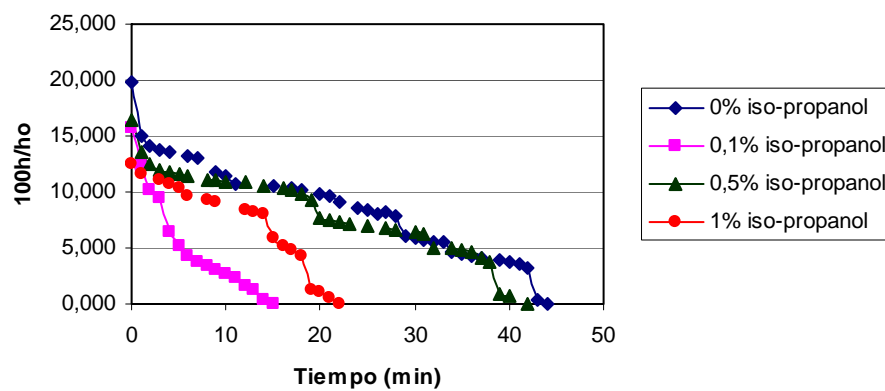


Figura 4.3. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de iso-propanol.

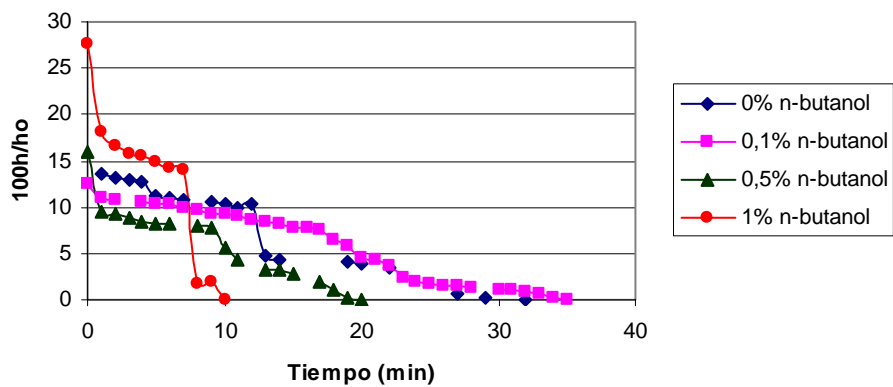


Figura 4.4. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-butanol.

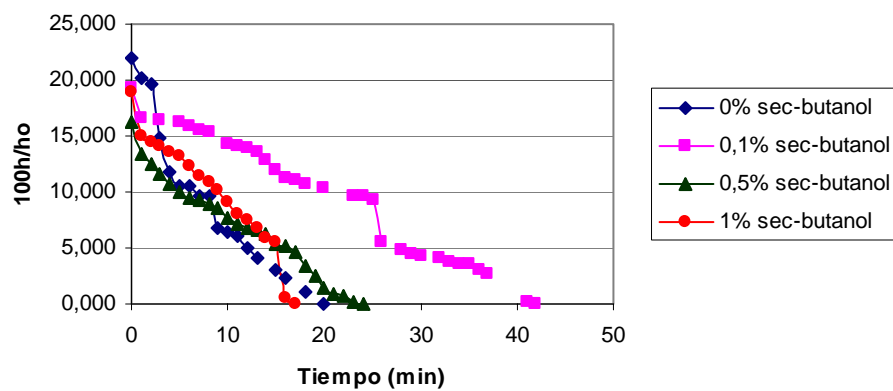


Figura 4.5. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de sec-butanol.

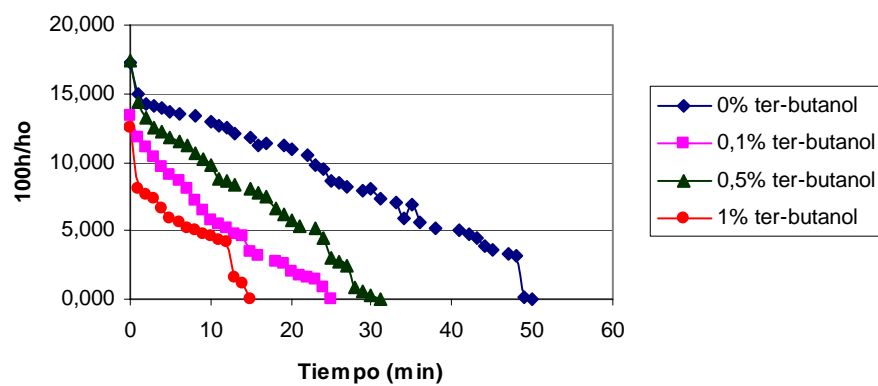


Figura 4.6. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de ter-butanol.

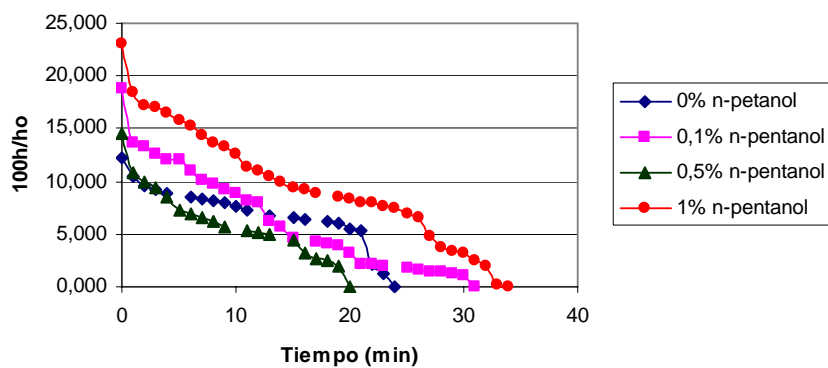


Figura 4.7. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-pentanol.

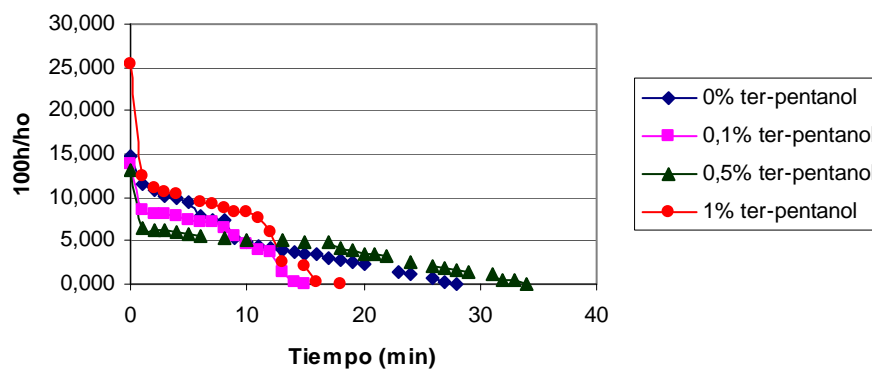


Figura 4.8. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de ter-pentanol.

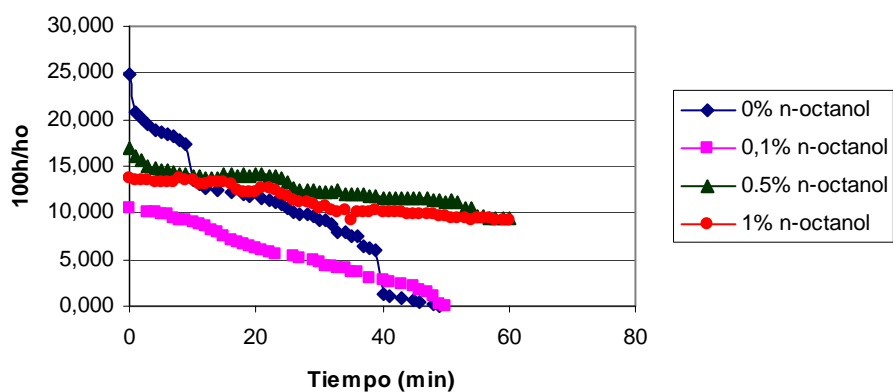


Figura 4.9. Colapso de la espuma A en función del tiempo, con adición de n-octanol.

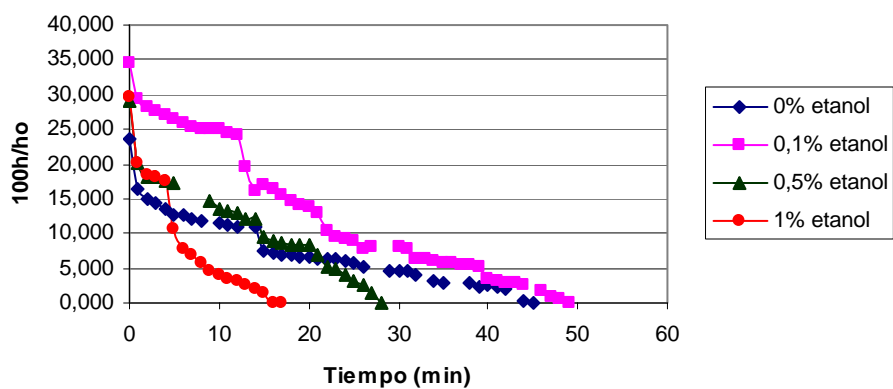


Figura 4.10. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de etanol.

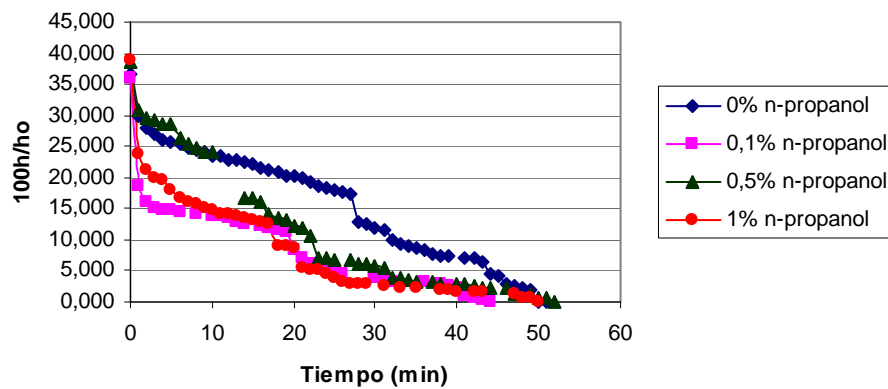


Figura 4.11. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-propanol.

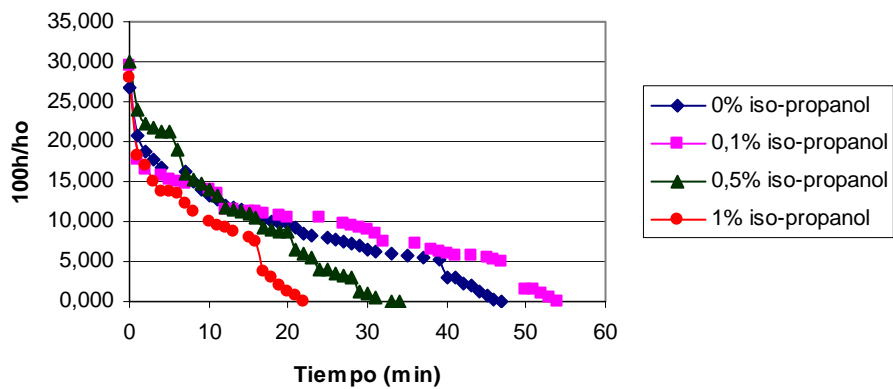


Figura 4.12. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de iso-propanol.

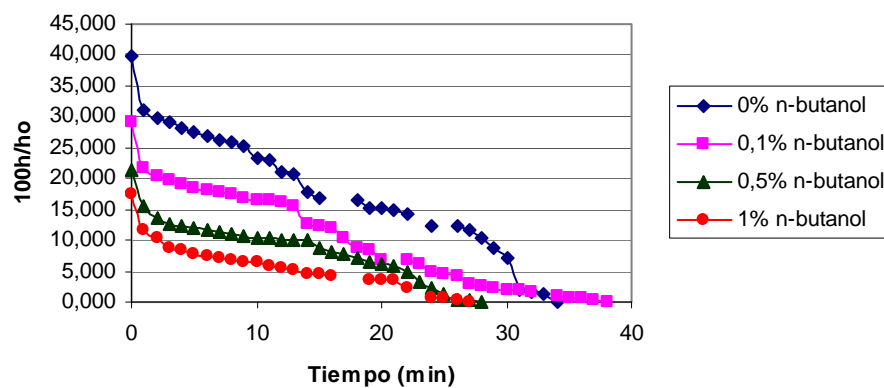


Figura 4.13. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-butanol.

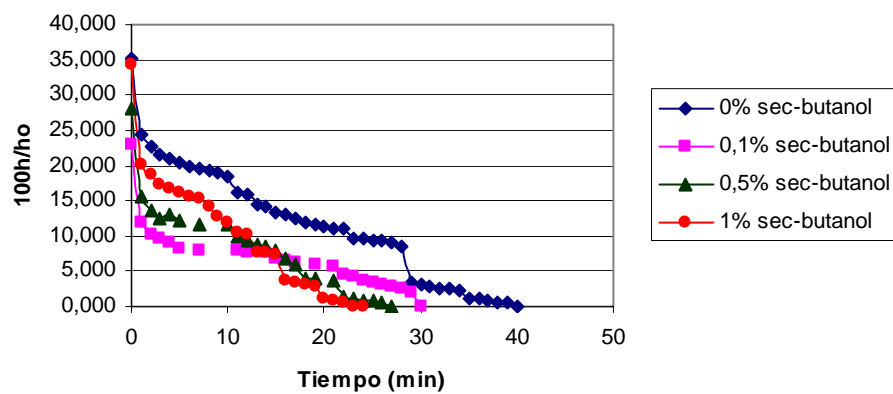


Figura 4.14. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de sec-butanol.



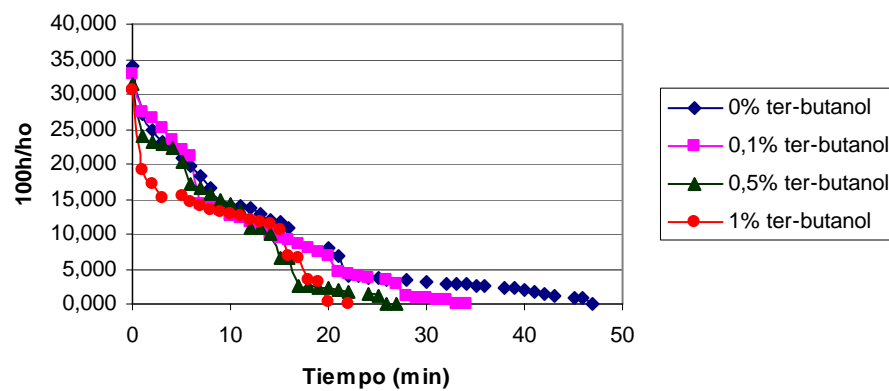


Figura 4.15. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de ter-butanol.

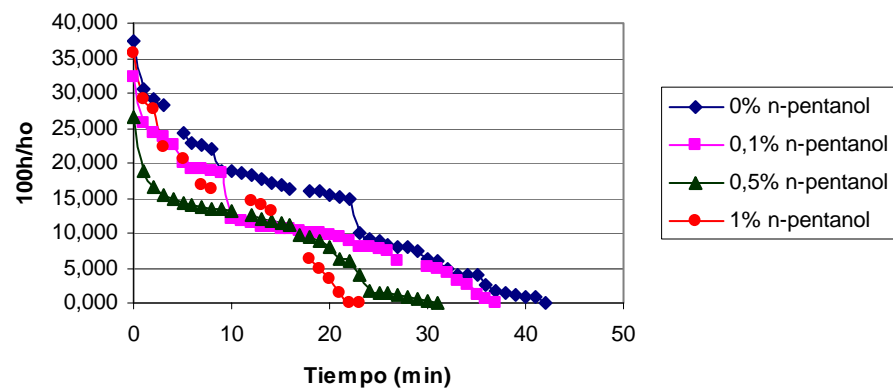
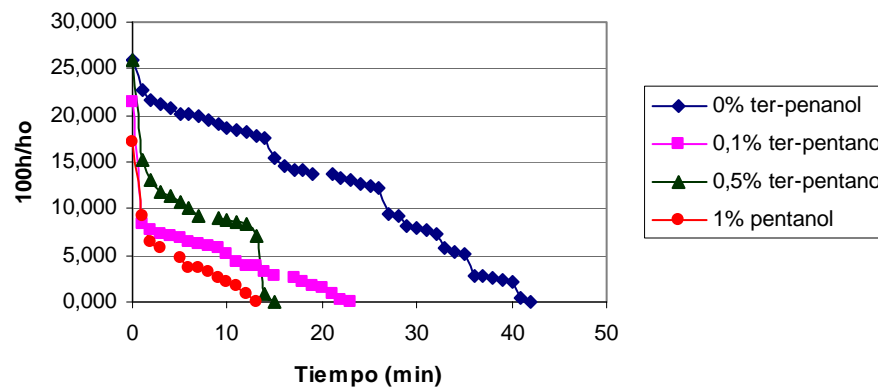
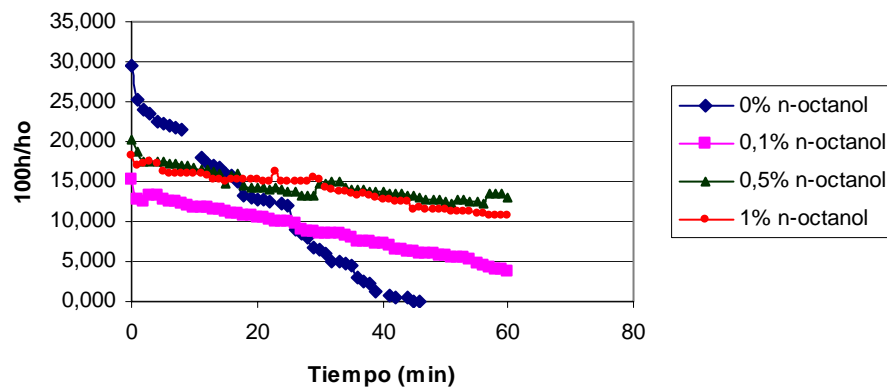


Figura 4.16. Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-pentanol.



**Figura 4.17.** Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de ter-pentanol.



**Figura 4.18.** Colapso de la espuma B en función del tiempo, con adición de n-octanol.

Para la espuma A la presencia del etanol (figura 4.1) hizo que la vida de las espumas aumentara de 35 hasta 38 minutos para la espuma con 0,1% v/v de etanol y a 45 minutos para las otras dos espumas, estas dos últimas tuvieron un comportamiento muy similar, por ende la diferencia en la cantidad de etanol no afectó el colapso, este alcohol disminuyó la cantidad de drenaje de líquido en la columna de espuma haciéndola más estable. Para esa misma espuma con presencia de n-propanol (figura 4.2) el comportamiento fue todo lo contrario, en las 3 espumas donde se tenía la

presencia del alcohol, se obtuvieron colapsos más rápidos que sin el alcohol, en este caso la cantidad del aditivo no afectó el tiempo de colapso de la espuma, este se mantuvo en los 30 minutos, y el comportamiento de la curvas fueron similares a excepción de la espumas con 1% v/v de n-propanol; este alcohol adelgaza el grosor de la capa de líquido que recubre las burbujas que conforman la espuma, lo que hace que se acorte la vida de ésta.

Para la espuma A con presencia de iso-propanol (figura 4.3), se observa que todas las espumas donde actúa el alcohol presentan un colapso más rápido que en las espumas sin la presencia del iso-propanol, a diferencia del n-propanol (figura 4.2) aquí la adición de más alcohol hizo que aumentara la vida de la espuma sin llegar al mismo valor que tenía sin la presencia de este alcohol.

Cuando a la espuma A se le adiciona n-butanol (figura 4.4) o sec-butanol (figura 4.5), se observó una similitud entre los efectos de estos dos alcoholes, ambos inicialmente aumentaron la vida de la espuma para luego progresivamente ir disminuyéndola, a medida de que se le añadía más cantidad de alcohol. La diferencia que presentaron estos alcoholes radicó en que con el sec-butanol la vida de la espuma con 1% v/v del alcohol fue menor que la espuma sin la presencia de éste, mientras que para las espumas con 0,5 y 1% v/v de n-butanol se obtuvieron colapsos muy rápidos comparado con los otros (espuma sin alcohol y con 0,1% v/v), entre ellas la espuma con 1% v/v del alcohol presentó el colapso más rápido de todas las espumas con 10 min. Estos alcoholes en baja proporción hacen que la espuma sea más compacta y tenga mayor vida, al irse agregando más cantidad de alcohol producen un efecto contrario; con el n-butanol se acentúa más este efecto de reducción de la vida de la espuma.

Para la espuma A con ter-butanol (figura 4.6) y ter-pentanol (figura 4.8) se observa el mismo efecto, teniendo al principio un colapso más rápido (0,1% v/v de alcohol) luego un aumento (0,5% v/v del alcohol) y finalmente una disminución (1% v/v), pero se observó que para el ter-butanol todas las espumas tuvieron una vida menor (25, 30 y 15 minutos, respectivamente) que la espuma sin alcohol (50

minutos); mientras que para el ter-pentanol la vida de la espuma con 0,5% v/v de alcohol tuvo una estabilidad mayor (35 minutos) que la espuma sin alcohol (23 minutos).

Con el n-pentanol en la espuma A (figura 4.7) se observó un comportamiento totalmente análogo al descrito para el ter-butanol y el ter-pentanol, este alcohol aumentó inicialmente la vida de la espuma (0,1% v/v con 32 minutos), luego la disminuyó (0,5% v/v con 20 minutos) para luego volver a aumentarla (1% v/v con 34 minutos) respecto a la espuma sin alcohol (23 minutos).

Para la espuma B, con la adición de etanol (figura 4.10) e iso-propanol (figura 4.12) se observó el mismo comportamiento para ambos alcoholes, similar al efecto del n-butanol y sec-butanol para la espuma A (figura 4.6 y 4.7), en donde inicialmente el alcohol aumentaba la vida de la espuma y luego progresivamente la disminuía; a diferencia de los alcoholes para la espuma A, en la espuma B ambos alcoholes en sus concentraciones de 0,5% y 1% v/v presentaron espumas de vida menor a la espuma B sin presencia de los alcoholes.

Para la espuma B con presencia de n-propanol (figura 4.11) se observó un comportamiento particular en donde inicialmente hay un colapso más rápido (0,1% v/v con 45 minutos), para luego aumentar y mantenerse (0,5 y 1% v/v con 51 minutos), el aumento del colapso hizo que se igualara la vida que la espuma tenía inicialmente sin alcohol. Por otro lado, para esa misma espuma con presencia de n-butanol (figura 4.13), se observó inicialmente un aumento en la vida de la espuma (0,1% v/v con 38 minutos), para luego disminuir y mantenerse en 28 minutos, este alcohol no varió en mucha proporción el colapso de la espuma.

Para la presencia de sec-butanol (figura 4.14), ter-butanol (figura 4.15), n-pentanol (figura 4.16) y ter-pentanol (figura 4.17) en la espuma B, se observó una similitud entre el comportamiento de estos alcoholes, los 4 disminuyeron la estabilidad de la espuma progresivamente al añadirse más cantidad de alcohol. En donde mejor se observó este comportamiento fue en la espuma con presencia de ter-butanol y ter-pentanol (figura 4.15 y 4.17), reduciendo en gran proporción la vida de

la espuma; en el caso del ter-pentanol, se obtuvo un colapso más rápido de la espuma B con 15 minutos. Estos 4 alcoholes presentan un efecto de disminución de la capa de líquido que separa sus burbujas, aumentando el drenaje de líquido.

Para ambas espumas A y B, en presencia de n-octanol (figura 4.9 y 4.18 respectivamente), se observó un comportamiento similar, pero diferente al resto de los alcoholes. El n-octanol a medida de que se iba añadiendo aumentaba la vida de la espumas de forma considerable, trayendo como consecuencia perduración de la espuma al cabo del tiempo de escaneo (las espumas con n-octanol tuvieron una vida mayor a 1 hora), este alcohol es muy aceitoso lo que lo hace más afín al surfactante dando muy poca elasticidad a la espuma formada, esto trae como consecuencia que haya una mayor cantidad de alcohol en la capa superficial a comparación de los demás alcoholes así como una mejor cohesión del lado del grupo hidrófilo, finalmente haciendo que la espuma sea muy estable en comparación con las otras medidas y que esta estabilidad vaya aumentando en proporción con el aumento de la concentración del octanol

### **4.3 DESARROLLO DE MODELOS DE CORRELACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DEL COLAPSO DE UNA ESPUMA POR ACCIÓN DE UN ALCOHOL**

El tipo de ajuste responde a la siguiente ecuación ecuación polinomial:

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + a_7x^7 + a_8x^8 + a_9x^9 \quad (\text{Ec.4.1})$$

donde:  $Y = 100h/h_0$ , siendo  $h$  la altura de la columna en mm y  $h_0$  la altura inicial de la solución antes del espumeo, en mm;  $X$ = tiempo en minutos;  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$  son los coeficientes polinomiales.

En las tablas 4.7 a 4.10 se reportan los valores de los nueve coeficientes de la ecuación polinomial, así como el valor del coeficiente de correlación ( $r^2$ ), el cual es, en general, mayor al 95 %, significando que el 95 % de los datos se ajustan al modelo. Se tiene como valor mínimo  $r^2 = 93,8$  correspondiente a 0,1% v/v de n-butanol en la espuma A, y como valor máximo 99,1 el cual pertenece a 1% de ter-pentanol en la espuma B.

**Tabla 4.7 Primeros 5 coeficientes polinomiales para la espuma A.**

Alcohol	Concentración	a0	a1	a2	a3	a4
Etanol	0%	13,39989	-3,68543	1,23077	-0,21107	0,02011
	0,10%	14,24476	-2,46873	0,52936	-0,06604	0,00583
	0,50%	20,87604	-3,82158	1,02693	-0,16315	0,01541
	1%	21,07969	-5,62086	2,0483	-0,39003	0,04067
n-propanol	0%	16,05297	-1,37824	0,42435	-0,09765	0,01149
	0,10%	18,48827	-4,81008	2,28213	-0,54644	0,06818
	0,50%	17,98331	-4,40141	2,0142	-0,42826	0,04652
	1%	7,02878	-1,90398	1,13353	-0,34558	0,05483
i-propanol	0%	19,57986	-5,45414	1,8914	-0,329	0,0312
	0,10%	15,7673	-6,2598	3,73549	-1,34073	0,21211
	0,50%	16,13121	-2,878	0,74221	-0,10871	0,00989
	1%	12,53717	-2,45868	2,06463	-0,82683	0,16955
n-butanol	0%	7,97255	9,51327	-5,19119	1,22719	-0,15243
	0,10%	12,60287	-2,34155	1,05712	-0,23276	0,02708
	0,50%	15,94273	-13,17048	10,21667	-4,10103	0,92679
	1%	7,88066	-18,49627	36,73238	-33,40011	16,38123
s-butanol	0%	21,8031	-1,61138	1,97402	-1,93745	0,65642
	0,10%	19,05281	-2,56275	0,73214	-0,08499	0,00277
	0,50%	16,14279	-3,69491	1,50407	-0,43783	0,07977
	1%	18,95561	-5,22905	1,09128	0,75029	-0,45594
t-butanol	0%	17,06927	-2,35566	0,67933	-0,10346	0,00885

	0,10%	13,34364	-1,98069	0,56604	-0,11135	0,0113
	0,50%	17,49168	-4,43485	1,68476	-0,35192	0,04146
	1%	3,32345	-3,01864	2,98648	-1,51885	0,43366
n-pentanol	0%	12,26615	-2,16005	0,40059	0,03769	-0,02682
	0,10%	18,58693	-6,46953	2,77073	-0,62937	0,08086
	0,50%	14,61981	-7,38105	5,26964	-2,07058	0,45426
	1%	22,86134	-5,90186	2,31387	-0,48556	0,05701
t-pentanol	0%	14,82446	-5,02598	2,30322	-0,5485	0,06952
	0,10%	13,91601	-12,3073	10,74601	-4,89872	1,28098
	0,50%	12,92055	-8,78125	3,99157	-0,88842	0,1097
	1%	25,36203	-22,4407	12,81387	-3,45045	0,43972
n-octanol	0%	24,86772	-5,65515	2,19417	-0,4137	0,04065
	0,10%	10,54024	0,04882	-0,10412	0,02313	-0,00266
	0,50%	16,84349	-0,69377	0,03856	0,00287	-4,28E-04
	1%	13,68054	-0,29722	0,11248	-0,01886	0,00165

**Tabla 4.8 Últimos 5 coeficientes polinomiales y coeficiente de correlación para la espuma A.**

Alcohol	a5	a6	a7	a8	a9	Coficiente de Correlación
Etanol	- 0,00114	3,94E- 05	- 8,16E-07	9,33E- 09	- 4,56E-11	0,99527
	-4,06E- 04	2,00E- 05	- 6,07E-07	9,89E- 09	- 6,58E-11	0,98733
	-8,93E- 04	3,18E- 05	- 6,78E-07	7,91E- 09	- 3,89E-11	0,99406
	-	8,98E-	-	2,22E-	-	0,99098

	0,00247	05	1,92E-06	08	1,07E-10	
n-propanol	-7,59E-04	2,96E-05	-	8,33E-09	-	0,99528
	-	2,09E-04	-	7,42E-08	-	0,99595
	0,00488	04	5,32E-06	08	4,38E-10	
	-	9,72E-05	-	1,47E-08	-	0,99642
	0,00282	05	1,80E-06	08	2,09E-11	
	-	2,67E-04	-	1,45E-07	-	0,99668
	0,00497	04	8,45E-06	07	1,04E-09	
i-propanol	-	5,83E-05	-	1,29E-08	-	0,98893
	0,00174	05	1,17E-06	08	6,01E-11	
	-	-	2,49E-04	-1,24E-05	2,27E-07	0,99406
	0,00796	0,00178	04	05	07	
	-5,74E-04	2,08E-05	-	5,18E-09	-	0,98328
	-	0,00138	-	1,29E-06	-	0,98116
	0,01982	05	5,70E-05	06	1,22E-08	
n-butanol	0,01071	-4,37E-04	1,01E-05	-1,21E-07	5,57E-10	0,93813
	-0,0018	6,94E-05	-	1,76E-08	-	0,99744
	-	0,00994	-	1,20E-05	-	0,99198
	0,12384	04	4,70E-04	05	1,29E-07	
	-	0,81048	-	0,00457	-	0,98409
	4,69878	05	0,08258	08	1,06E-04	
s-butanol	-	0,01034	-	1,55E-05	-	0,9858
	0,11036	04	5,49E-04	05	1,80E-07	
	1,93E-04	-1,98E-05	6,96E-07	-1,12E-08	7,01E-11	0,98606
	-	6,38E-04	-	6,17E-04	-	0,99813



	0,00907	04	2,69E-05	07	5,93E-09	
	0,10356	0,01236	8,19E-04	-2,85E-05	4,06E-07	0,99375
t-butanol	-4,53E-04	1,42E-05	-	2,72E-09	-	0,99077
	-5,70E-04	9,59E-06	3,06E-07	-1,49E-08	1,69E-10	0,9968
	-	1,27E-04	-	4,65E-08	-	0,99544
	0,00293	0,00777	3,28E-06	1,67E-05	2,40E-07	0,98573
	0,00452	-3,87E-04	1,85E-05	-4,64E-07	4,80E-09	0,98503
n-pentanol	-0,0063	3,04E-04	-	1,43E-07	-	0,99203
	-	0,00473	-	5,91E-06	-	0,99717
	0,05934	1,79E-04	-	7,16E-08	-	0,99569
	-	0,00405	4,80E-06	8,79E-08	4,54E-10	0,99464
	-	2,28E-04	-	8,79E-08	-	0,99464
t-pentanol	0,00512	0,01942	-	3,47E-05	-	0,99455
	-	3,57E-04	-	1,37E-07	-	0,98152
	0,20193	0,00804	9,47E-06	0,00111	8,41E-10	0,98152
	-	-0,0018	2,38E-04	-1,02E-05	1,58E-07	0,98711
	-	7,67E-05	-	1,62E-08	-	0,9867
n-octanol	0,00229	1,51E-06	-	1,62E-08	7,29E-11	0,9867
	1,67E-	-5,95E-	1,21E-	-1,31E-	5,84E-	0,99893

	04	06	07	09	12	
	2,09E-05	-5,50E-07	8,47E-09	-7,34E-11	2,79E-13	0,98532
	-8,39E-05	2,51E-06	-4,37E-08	4,07E-10	1,57E-12	0,9792

**Tabla 4.9 Primeros 5 coeficientes polinomiales para la espuma B.**

Alcohol	Concentración	a0	a1	a2	a3	a4
Etanol	0%	22,81308	-6,27735	1,51613	-0,17997	0,01105
	0,10%	34,43659	-5,81001	1,68337	-0,24168	0,01865
	0,50%	29,11992	-14,71755	7,64763	-2,04292	0,30856
	1%	29,57047	-20,2188	14,54286	-4,87705	0,79003
n-propanol	0%	36,24828	-7,40123	2,12719	-0,32023	0,02688
	0,10%	34,8971	-18,68138	6,32684	-1,06708	0,10171
	0,50%	37,70277	-6,80132	1,86921	-0,26429	0,02004
	1%	36,71187	-11,97921	2,97351	-0,39796	0,03145
i-propanol	0%	26,49964	-7,09392	2,17684	-0,35521	0,03218
	0,10%	28,38761	-11,14637	3,34753	-0,48411	0,03803
	0,50%	29,92242	-8,99304	4,10698	-0,96871	0,12173
	1%	27,89595	-14,6461	7,43872	-2,1409	0,37173
n-butanol	0%	39,43486	-10,17434	3,63462	-0,67016	0,06947
	0,10%	28,62006	-7,40573	2,1699	-0,33546	0,03055
	0,50%	21,51779	-9,40367	4,32581	-1,09977	0,16262
	1%	17,31343	-8,39128	3,82906	-1,02138	0,16212
s-butanol	0%	34,36777	-11,11137	3,42102	-0,52489	0,04416
	0,10%	22,70892	-15,94178	7,53609	-1,84914	0,25832
	0,50%	27,91311	-18,95253	9,26006	-2,33018	0,33653

	1%	34,22215	-21,98168	11,46003	-3,12314	0,49106
t-butanol	0%	33,25618	-6,00855	1,40051	-0,22578	0,02191
	0,10%	32,69816	-7,65571	3,81919	-1,0558	0,14912
	0,50%	31,4215	-13,00795	8,03707	-2,47229	0,4042
	1%	30,33706	-16,8965	7,8839	-1,91019	0,26244
n-pentanol	0%	37,07532	-7,68261	2,68217	-0,55514	0,06284
	0,10%	32,20465	-8,25705	3,02395	-0,58367	0,05914
	0,50%	26,28202	-9,76538	3,48599	-0,67312	0,07585
	1%	35,64487	-7,11228	1,41616	-0,06668	-0,0408
t-pentanol	0%	25,72876	-3,1109	0,65789	-0,0565	3,16E-04
	0,10%	21,27592	-21,92925	13,09279	-3,9726	0,68788
	0,50%	25,81841	-16,36259	6,87343	-0,56045	-0,44835
	1%	17,123	-11,18735	2,81518	0,99021	-0,77881
n-octanol	0%	29,51591	-5,42598	1,75888	-0,29308	0,02633
	0,10%	14,5434	-1,03231	0,21981	-0,02563	0,00165
	0,50%	20,20117	-1,83671	0,42624	-0,04847	0,00292
	1%	18,07663	-0,69915	0,16049	-0,0239	0,00194

**Tabla 4.10 Últimos 5 coeficientes polinomiales y coeficientes de correlación para la espuma B.**

Alcohol	Concentración	a5	a6	a7	a8	a9	Coefficiente de Correlación
Etanol	0%	- 3,58E-04	5, 27E-06	9,3 9E-10	- 9,31E-10	7,6 4E-12	0,98507
	0,10%	- 8,63E-04	2, 49E-05	- 4,38E-07	4,3 2E-09	- 1,82E-11	0,99106
	0,50%	- 0,02803	0, 00156	- 5,18E-05	9,4 4E-07	- 7,26E-09	0,99412
	1%	- 0,06064	0, 00115	1,3 2E-04	- 8,69E-06	1,5 9E-07	0,98859

n- propanol	0%	- 0,00133	3, 95E-05	- 6,90E-07	6,5 5E-09	- 2,60E-11	0,99552
	0,10%	- 5,82E-03	2, 03E-04	- 4,24E-06	4,8 2E-08	- 2,31E-10	0,98245
	0,50%	- 8,97E-04	2, 45E-05	- 4,03E-07	3,6 5E-09	- 1,40E-11	0,99329
	1%	- 0,00155	4, 80E-05	- 9,00E-07	9,3 2E-09	- 4,07E-11	0,98129
i- propanol	0%	- 0,00173	5, 61E-05	- 1,08E-06	1,1 4E-08	- 5,08E-11	0,9969
	0,10%	- 0,00175	4, 84E-05	- 7,94E-07	7,1 1E-09	- 2,67E-11	0,98292
	0,50%	- 0,00886	3, 87E-04	- 1,00E-05	1,4 1E-07	- 8,42E-10	0,99525
	1%	- 0,04092	0, 00287	- 1,24E-04	2,9 9E-06	- 3,07E-08	0,98957
n- butanol	0%	- 0,00439	1, 72E-04	- 4,10E-06	5,3 5E-08	- 2,92E-10	0,99208
	0,10%	- 0,00178	6, 69E-05	- 1,57E-06	2,0 6E-08	- 1,16E-10	0,99363
	0,50%	- 0,01455	7, 97E-04	- 2,60E-05	4,6 6E-07	- 3,50E-09	0,99816
	1%	- 0,01573	9, 36E-04	- 3,32E-05	6,4 4E-07	- 5,23E-09	0,99709
s- butanol	0%	- 0,0022	6, 75E-05	- 1,26E-06	1,3 2E-08	- 6,07E-11	0,98892
	0,10%	- 0,02168	0, 00111	- 3,41E-05	5,7 5E-07	- 4,09E-09	0,98901
	0,50%	- 0,02953	0, 0016	- 5,22E-05	9,4 0E-07	- 7,18E-09	0,99147

	1%	- 0,04721	0, 00281	- 1,01E-04	2,0 2E-06	- 1,71E-08	0,99221
t- butanol	0%	- 0,00129	4, 62E-05	- 9,78E-07	1,1 2E-08	- 5,35E-11	0,99417
	0,10%	- 0,01186	5, 57E-04	- 1,53E-05	2,2 8E-07	- 1,43E-09	0,9915
	0,50%	- 0,03814	0, 00214	- 7,09E-05	1,2 7E-06	- 9,57E-09	0,99413
	1%	- 0,02161	0, 00109	- 3,2845E-05	5,4 8E-07	- 3,88E-09	0,98806
n- pentanol	0%	- 0,00409	1, 58E-04	- 3,57E-06	4,3 5E-08	- 2,22E-10	0,9927
	0,10%	- 0,0034	1, 15E-04	- 2,24E-06	2,2 9E-08	- 9,21E-11	0,98592
	0,50%	- 0,00525	2, 28E-04	- 6,08E-06	9,2 0E-08	- 6,05E-10	0,99519
	1%	0,0 095	- 9,27E-04	4,7 0E-05	- 1,21E-06	1,2 6E-08	0,99326
t- pentanol	0%	2,3 7E-04	- 1,58E-05	4,6 0E-07	- 6,48E-09	3,6 1E-11	0,99247
	0,10%	- 0,07208	0, 00464	- 1,80E-04	3,8 2E-06	- 3,44E-08	0,99087
	0,50%	0,1 6024	- 0,02419	0,0 0192	- 7,88E-05	1,3 1E-06	0,99527
	1%	0,2 0413	- 0,02823	0,0 0219	- 9,08E-05	1,5 6E-06	0,99906
n- octanol	0%	- 0,00138	4, 40E-05	- 8,31E-07	8,6 0E-09	- 3,76E-11	0,99482
	0,10%	-	1,	-	1,5	-	0,99078

		6,32E-05	46E-06	2,01E-08	0E-10	4,67E-13	
	0,50%	- 1,02E-04	2, 17E-06	- 2,80E-08	2,0 4E-10	- 6,48E-13	0,95425
	1%	- 8,88E-05	2, 37E-06	- 3,68E-08	3,0 7E-10	- 1,07E-12	0,97921

#### 4.4. CONCLUSIONES

Los alcoholes aumentaron la tensión superficial de la solución de agua y surfactante a espumar, así como disminuyeron la densidad de ésta. Por ejemplo, para la espuma B sin alcohol, la tensión fue 35,5 dinas/cm y la densidad de 1,00128 g/ml; adicionando 1% de ter-pentanol, la tensión disminuyó a 33,7 dinas/cm y la densidad a 0,99893 g/ml.

La espuma con mayor concentración de surfactante (0,0205 g/dl para la espuma B) produjo una columna de espuma más alta (21,9 mm) respecto a la espuma A con 0,019 g/dl de surfactante (9 mm).

Los alcoholes que produjeron espumas de colapso más rápido fueron 1% v/v de n-butanol para la espuma A (10 minutos) y 1% v/v ter-pentanol para la espuma B (15 minutos).

El n-octanol es el alcohol que produjo una columna de espuma menor y más estable para ambas concentraciones de surfactante (5,7 mm para espuma A y 7,7 mm para espuma B, ambas con 1% v/v de n-octanol), comportándose como un buen desespumante.

Las curvas de estabilidad se ajustaron a un modelo tipo polinomial de noveno orden, con coeficientes de correlación superior a 97%.

#### **4.5. RECOMENDACIONES**

Realizar una medición preliminar de la estabilidad de las espumas para determinar exactamente el tiempo de duración de los escaneos en el equipo de medición Turbiscan.

Observar la influencia de los alcoholes hexanol y heptanol en la espumabilidad y estabilidad de las espumas acuosas formuladas.

#### 4.6. BIBLIOGRAFÍA

1. Lachaise, J., García, A., Marion, G. y Salager, J.L., A New Reflectometry Method To Measure A Liquid Foam Stability, *J. Dispersion and Technology*, 11 (4), 409-430 (1990).
2. Iglesias, E., Anderez, J., Forgiarini, A., Salager, J.L., A new method to estimate the foamability of short-life foams, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 98, 167-174 (1995).
3. Langevin, D., Foams, Foam Films and Monolayers, *Adsorption and Aggregation of Surfactants in Solution*, Marcel Dekker, USA (2003).
4. Rouimi, S., Schorsch, C., Valetini, C. y Vaslin, S., Foam stability and interfacial properties of milk protein–surfactant systems, *Food Hydrocolloids*, (19): 467–478, (2005).
5. Salager, J.L., “Surfactantes, Tipos y Usos”, Cuaderno FIRP N°261. Escuela de Ing. Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (2002).
6. Prud’homme, R.K. y Khan, S.A., “Foams Theory, Measurements, and Applications”, Surfactants Series, Vol. 57, USA (1995).
7. Salager, J. L., Andérez, J. M., Forgiarini, A., “Influencia de la formulación sobre las espumas”, Cuaderno FIRP N°263, Escuela de Ing. Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (1999).
8. Ross, S., *Ind. Eng. Chem.*, 61 (10): 48-57 (1969).
9. Walstra, P., “In Foams: Physics, Chemistry and Structure” A.J. Wilson Editorial, Springer Verlag, New York, USA, 1-16 (1989).
10. Belandria V., “Estabilización de espumas no acuosas en presencia de sólidos finos”. Tesis de Grado. Lab. FIRP, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela (2001).
11. Ross, S. y Cutillas, M. J., *J. Phys. Chem*, 59:863 (1955).
12. Durian, D. J., D. A., Weitz, y Pine, D. J., *Science*, 252:686 (1991).



13. Lachaise, J., J. *Dispersion, Science Technology* 11:409 (1990).
14. Rosenholm J.B., Hakala M.R., and P. Stenius, *Mol. Cryst. Liquid.* 45:285 (1978).
15. Formulation, User Manual Turbiscan Classic MA 2000.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	<b>“Estudio de la influencia de los alcoholes en la espumabilidad y estabilidad de espumas acuosas mediante el método de dispersión de luz”</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

AUTOR (ES):

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CVLAC / E MAIL</b>
<b>Rodríguez Cedeño Adolfo Antonio</b>	CVLAC: 17.973.315 EMAIL: <b>rodriguez.a86@gmail.com</b>

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

**Alcoholes**

**Espumas**

**Turbiscan**

**Surfactante**

**Espumabilidad**

**Colapso**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias	Ingeniería Química

**RESUMEN (ABSTRACT):**

En el presente trabajo, se estudió el efecto de los alcoholes en la espumabilidad y estabilidad de espumas acuosas, utilizando la tecnología de transmisión y retrodispersión de luz mediante el Turbiscan Classic MA 2000 como método novedoso para esta aplicación. La metodología empleada consistió en preparar soluciones de agua destilada y surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio, midiendo la densidad y tensión superficial de las mismas, para luego espumarlas y medir la espumabilidad y colapso de las espumas bajo la influencia de alcoholes, utilizando el Turbiscan; luego a partir de los datos generados por el software del equipo se obtuvieron correlaciones empíricas referentes al colapso de las espumas. Los resultados indican que el alcohol n-butanol para la espuma A y el ter-pentanol para la espuma B (ambos en espumas con 1%v/v del alcohol) son los mejores inhibidores de espumas, colapsando la columna de espuma en 10 y 15 minutos respectivamente; y que el alcohol n-octanol sirve como aditivo para formar espumas de menor altura (reduce la altura de las espumas entre 50 y 70%), pero de muy alta estabilidad (mayor de 1 h).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
<b>Marfisi, Shirley</b>	ROL	CA	AS(X)	TU	JU
	CVLAC:	V-10.307.828			
	E_MAIL	shirleymarfisi@yahool.com			
	E_MAIL				
<b>Álvarez, Lucas</b>	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:	V- 4.077.552			
	E_MAIL	lalvarezm57@gmail.com			
	E_MAIL				
<b>Cova, Alexis</b>	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:	V-11.905.328			
	E_MAIL	alexiscovab@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	V-			
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	04	13
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
<b>Tesis.influencia_alcoholes_espumas.doc</b>	<b>Aplicación/msword</b>

**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: \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

TEMPORAL: \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

**Ingeniero Químico**

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

**Pregrado**

ÁREA DE ESTUDIO:

**Departamento de Ingeniería Química**

INSTITUCIÓN:

**Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

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

---

**Adolfo A. Rodríguez C.**  
**AUTOR**

---

**Prof. Shirley Marfisi**  
**TUTOR**

---

**Prof. Lucas Álvarez**  
**JURADO**

---

**Prof. Alexis Cova**  
**JURADO**

**Prof. Yraima Salas**  

---

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**