

00582

UNAM
POSGRADO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
QUIMICAS

ESTUDIO FISICOQUIMICO DE SOLUCIONES ACUOSAS DE
ALCANOLAMINAS CON LA ADICION DE TENSOACTIVOS
NO IONICOS

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS QUIMICAS
P R E S E N T A :
JACINTO AGUILA HERNANDEZ



TUTOR: DR. ARTURO TREJO

AÑO: 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTO ES UN EJEMPLO
DE LA BIBLIOTECA

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Mexicano del Petróleo por apoyarme económicamente con una beca FIES y una beca de tiempo completo para realizar estudios de posgrado y por darme todas las facilidades para efectuar este proyecto doctoral.

Al Dr. Arturo Trejo por todo su apoyo y valiosa asesoría para la realización de este proyecto doctoral.

Al Dr. Jesús Gracia Fadrique por su valiosa asesoría en la interpretación de los resultados de tensión superficial dinámica, asimismo, por su tiempo dedicado a la revisión y asesoría en los cálculos de los coeficientes de difusión y los módulos de elasticidad de Marangoni.

Al M. en C. Ascención Romero Martínez por apoyarme en los programas de cómputo.

A todos los compañeros del Área de Investigación en Termofísica del Programa de Ingeniería Molecular del Instituto Mexicano del Petróleo: Arturo Trejo, Florentino Murrieta Guevara, Blanca Estela García Flores, Ascención Romero Martínez, Rafael Eustaquio Rincón, Joel Reza González, María Esther Rebolledo Libreros, Verónica Uribe Vargas, Raúl Bocanegra Sánchez y Apolinar Jiménez Moreno.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Jacinto Águila
Hernández

FECHA: 11 Agosto 2004

FIRMA: [Firma]

DEDICATORIAS

A mis padres que me brindaron todo su amor.

A mi esposa y a mis hijos por su paciencia y frecuente apoyo en mis estudios para lograr este proyecto doctoral.

REALIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis fue realizada en el Laboratorio de Termodinámica del Área de Investigación en Termofísica del Programa de Ingeniería Molecular del Instituto Mexicano del Petróleo, bajo la dirección del Dr. Arturo Trejo.

	Página
Introducción	i
Resumen	iv
Objetivo	viii
Nomenclatura	ix
CAPÍTULO I. TERMODINÁMICA DE SUPERFICIES	1
I.1 Autoasociación de moléculas de tensoactivo	5
I.1-A Manifestación de la formación micelar	7
I.1-B Formación micelar	9
I.1-C Energía libre de micelización	11
I.1-D Espumación	11
I.1-E Tensión Superficial dinámica	17
I.2 Definición de la tensión superficial	20
I.3 Ecuación de Laplace y Young	21
I.4 Ecuación de Gibbs	25
I.5 Dependencia de la tensión superficial con la temperatura	27
I.6 Ecuaciones de estado superficiales	29
CAPÍTULO II. CINÉTICA DE ADSORCIÓN SUPERFICIAL	35
II.1 Cinética de adsorción superficial	35
II.2 Solución asintótica cuando $t \rightarrow 0$	39
II.3 Solución asintótica cuando $t \rightarrow \infty$	41
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	45
III.1 Antecedentes	45
III.2 Medición de la tensión superficial empleando el método de elevación capilar	48
III.3 Medición de la tensión superficial empleando el método de gota pendiente	50
III.4 Medición de la estabilidad de espuma	52
III.5 Medición de la densidad	58
CAPÍTULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES	61
IV.1 Aminas y tensoactivos: Propiedades y estructuras	61
IV.2 Tensión superficial de equilibrio de componentes puros: agua, MDEA y DEA	63
IV.3 Tensión superficial de equilibrio de sistemas binarios: DEA + agua y MDEA + agua	68
IV.4 Tensión superficial de equilibrio de sistemas ternarios: MDEA + DEA + agua; Span 20, Span 80, Brij 92 y Surfinol 485 + DEA acuosa al 20 % masa y Surfinol 485 + MDEA acuosa al 20 % masa	79
IV.5 Tensión superficial de equilibrio de sistemas multicomponentes:	90

	Brij 92, Tween 80, SurfínoI DF110-D, SurfínoI 485 y Ocenol + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua)	
IV.6	Índice de estabilidad y volumen de la espuma de sistemas binarios: DEA + agua y MDEA + agua	100
IV.7	Índice de estabilidad y volumen de la espuma de sistemas multicomponentes: Brij 92, SurfínoI DF110-D, SurfínoI 485 y Ocenol + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua)	105
IV.8	Cálculo de la concentración micelar crítica (cmc), concentración superficial de exceso máxima, Γ_{max} , área superficial mínima por molécula, A_{min} y la presión superficial a la concentración micelar crítica, Π_{cmc} de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45% masa de amina total y 55 % masa de agua)	117
IV.9	Cálculo de los parámetros de micelización (ΔG°_{mic} , ΔS°_{mic} y ΔH°_{mic}) para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y el Tween 80 + MDEA/DEA (45 % de amina total y 55 % masa de agua).	123
IV.10	Cálculo de los parámetros de adsorción (ΔG°_{ad} , ΔH°_{ad} y ΔS°_{ad}) para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y el Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua).	124
IV.11	Cálculo de la adsorción superficial de exceso Γ_i , el área superficial por molécula, A, y el módulo de elasticidad de Gibbs, ϵ , para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 en MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua)	128
IV.12	Cálculo del coeficiente de difusión de MDEA, DEA, Brij 92, Tween 80, SurfínoI DF110-D y SurfínoI 485 en agua, empleando la ecuación propuesta por Joos y Rillaerts (1981)	136
IV.13	Cálculo del coeficiente de difusión de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 en MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua) empleando la ecuación de Ward y Tordai (1964)	141
IV.14	Energía de activación de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 5 masa de agua)	148
IV.15	Tiempo de relajación de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 5 masa de agua) empleando la ecuación de Bleys y Joos, (1985)	150
IV.16	Tiempo de relajación micelar de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 5 masa de agua)	152
IV.17	Módulo de elasticidad de Marangoni, ϵ_m , derivado con datos de tensión superficial dinámica	158
IV.18	Módulo de elasticidad de Marangoni de seis sistemas binarios: DEA, MDEA, Brij 92, Tween 80, SurfínoI DF110-D y SurfínoI 485 en agua y de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 en MDEA/DEA (45% masa de amina total y 55 % masa de agua)	159

ÍNDICE

REFERENCIAS	181
APÉNDICE I. Tensión superficial dinámica de sistemas binarios	190
APÉNDICE II. Tensión superficial dinámica de sistemas multicomponentes	213
APÉNDICE III. Análisis de errores	280
APÉNDICE IV. Lista de figuras	283
APÉNDICE V. Lista de tablas	289

INTRODUCCIÓN

En las plantas endulzadoras de gases la espuma se presenta por el uso de soluciones acuosas de alcanolaminas (por su degradación) y por la presencia de hidrocarburos; por lo que su control es de suma importancia. Las espumas se generan principalmente en las torres absorbedoras porque tienen una relación directa con el diseño y operación en los procesos de endulzamiento. Por lo tanto, cuando no existe un buen control de la espuma, entonces se presentan serios problemas tales como “pérdida de la solución, y consecuentemente, una disminución de la eficiencia del proceso y la calidad del producto” (Mondragón-Garduño y Trejo, 1995).

Debe resaltarse que en este proyecto doctoral se estudiaron alcanolaminas de tercera generación, ya que inicialmente la tecnología para la eliminación de bióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S), denominados gases ácidos debido a que forman un ácido al disolverse en agua, utiliza soluciones acuosas de monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), N-metildietanolamina (MDEA) y 2-amino-2-metil-1-propanol (AMP) (Vázquez et al., 1997; Fathi y Baheri, 1995; Tontiwatwuthikul et al., 1992; Xu et al., 1996). La MDEA generalmente es selectiva para eliminar H_2S en presencia de CO_2 , ya que la DEA es un buen disolvente para eliminar CO_2 . Sin embargo, soluciones acuosas que contienen DEA y MDEA, son consideradas como excelentes disolventes para una absorción simultánea de CO_2 y H_2S en situaciones en donde una cantidad específica de CO_2 es eliminada (Rowley et al., 1993). Actualmente, el más importante desarrollo en la materia, a nivel industrial, incluye la utilización de formulaciones con dos o más aminas (Keh-Peng y Meng-Hui, 1992, Huang, 1992, Goldstein y Edelman, 1985, Thomas, 1988). El uso de aminas mezcladas en una formulación, proporciona una combinación de características de absorción tales como alta capacidad y alta velocidad de absorción del gas ácido preferencial, lo cual se traduce en una considerable mejora en los requerimientos de absorción y de ahorro de energía en el proceso de endulzamiento de las corrientes mencionadas. Por lo tanto, la purificación de corrientes gaseosas que contienen CO_2 y H_2S es un paso esencial en la refinación del petróleo y en la producción y aprovechamiento del gas natural y gas de síntesis (Trejo et al. 1999). Una de las áreas en evolución para el endulzamiento de las corrientes mencionadas es la correspondiente al desarrollo de nuevos

INTRODUCCIÓN

disolventes o mezclas de ellos. Estas nuevas formulaciones tienen como objetivos (Trejo et al.1999) disminuir el requerimiento de energía, incrementar la remoción de H₂S e influir en su mejor aprovechamiento y minimizar la formación de la espuma en la unidad de endulzamiento.

El objetivo principal de este proyecto de investigación es conocer las variables relevantes en la producción de espuma que se genera en las torres absorbedoras de las plantas de endulzamiento de corrientes gaseosas, por medio de la tensión superficial de equilibrio, la tensión superficial dinámica y el índice de estabilidad de espuma de soluciones acuosas de alcanolaminas con y sin tensoactivos no iónicos, en función de la concentración y la temperatura y derivar correlaciones coherentes entre propiedades fisicoquímicas que sean de interés para las industrias petrolera y petroquímica con la posibilidad de utilizar estos resultados en las plantas de endulzamiento de corrientes gaseosas.

La tensión superficial es una de las propiedades fisicoquímicas de gran interés, ya que esta propiedad juega un papel importante en la determinación del comportamiento de muchos sistemas, particularmente de aquellos que tienen una naturaleza coloidal, e.g., espumas, emulsiones, suspensiones, detergentes, soluciones, catálisis heterogénea, sistemas biológicos, etc (Alexander y Napper, 1971). Por otro lado, es importante mencionar que la estabilidad y el volumen de la espuma juegan un papel importante en los procesos de transferencia de masa y de calor y están relacionadas a la cinética de envejecimiento superficial de tensoactivos, en donde la cinética de envejecimiento superficial ha sido ampliamente estudiada por medio de la tensión superficial dinámica (Patist et al. 1998; Pinazo et al. 2001; Djuve et al. 2001; Patist et al. 2002; Huang et al. 1986; Zhang et al. 1999).

La estabilidad de espuma ha sido estudiada con aparatos y métodos estándares (ASTM, 1982), por lo tanto, los estudios experimentales para determinar la estabilidad de espuma de sistemas binarios o multicomponentes tiene una amplia importancia en diferentes áreas, tales como en la fabricación de azúcar a partir de remolacha, de tintas, de papel, de adhesivos, de aceites vegetales y animales, de anticongelantes para automóviles y

INTRODUCCIÓN

maquinaria industrial, fluidos para extintores, en la evaluación de jabones, detergentes y champúes empleados como artículos de limpieza, en la elaboración de cervezas, refrescos y vinos espumosos, en la evaluación de fungicidas, insecticidas, herbicidas; en la industria petrolera, en la evaluación de tensoactivos y anticorrosivos con propiedades desespumantes empleados en el tratamiento de aguas amargas, en las plantas de endulzamiento de gas natural, en la evaluación de fluidos de perforación, en los procesos de recuperación de sólidos por flotación, en los procesos de destilación, en la formulación de gasolinas para motores de automóvil, avión, etc. (Barigou, 2002; Kanicky et al. 2001; Pilon et al. 2001; Holt y McDaniel, 2002; Kittle 1989; Kuschnir et al. 1986; Clarkson et al. 1999).

Los agentes antiespumantes que se estudiaron en este proyecto doctoral como posibles candidatos para el control de la espuma, fueron tensoactivos no iónicos ya que proporcionan propiedades multifuncionales, tales como: reducir la tensión superficial y controlar la espuma, incluso humectación, dispersión y extracción de espuma, con efecto mínimo sobre la sensibilidad al agua, el agente activo no tiene carga iónica, así que no hay efectos eléctricos, e.g., no hay una fuerte adsorción sobre superficies cargadas; como ejemplo de estos tensoactivos se encuentra el monoglicerido de ácido graso de cadena larga, $\text{RCOOCH}_2\text{CHOHCH}_2\text{OH}$ y al alcohol etoxilado, $\text{RC}_6\text{H}_4(\text{OC}_2\text{H}_4)_x\text{OH}$, por mencionar algunos. Además, generalmente están disponibles al 100 % en su forma activa, libre de electrolitos, resisten al agua dura, a los cationes metálicos polivalentes, a la alta concentración de electrolitos, son solubles en agua y disolventes orgánicos incluyendo a los hidrocarburos.

De lo que preside, se puede establecer la necesidad de disponer de datos confiables de propiedades fisicoquímicas de fluidos y de métodos confiables de cálculo que puedan proporcionar dichos datos.

En este proyecto doctoral se determinó experimentalmente la tensión superficial de equilibrio, la tensión superficial dinámica y el índice de estabilidad de espuma de soluciones acuosas de alcanolaminas con y sin tensoactivos no iónicos, en función de la concentración y la temperatura. Para determinar los valores de tensión superficial de equilibrio, se emplearon dos métodos: el de elevación capilar y el de gota pendiente. Con éste último también se determinó la tensión superficial dinámica, y para determinar el índice de estabilidad de espuma se empleó el método neumático de flujo continuo de gas. El error experimental determinado para la tensión superficial de equilibrio que se obtiene con el método de elevación capilar es de $\pm 0.15 \text{ mN m}^{-1}$ y con el método de gota pendiente es de $\pm 0.50 \text{ mN m}^{-1}$ y para el índice de estabilidad de espuma es de $\pm 0.2 \text{ s}$. Ambos métodos (elevación capilar y gota pendiente) requieren de datos de densidad de componentes puros o mezclas para poder evaluar la tensión superficial de equilibrio y dinámica, cuyos valores de densidad deben estar evaluados a las mismas condiciones de temperatura y concentración a la cual fue determinada la tensión superficial, por lo que fue necesario determinar algunos valores, empleando el método del tubo vibrante cuyo error experimental relativo es de $\pm 0.0002 \text{ g cm}^{-3}$.

Empleando el método de elevación capilar se determinó la tensión superficial de equilibrio del sistema binario: dietanolamina (DEA) acuosa al 10, 20 y 30 % masa, en el intervalo de temperatura de 293.15 a 363.15 K y del sistema ternario DEA (20 % masa y 80 % masa de agua) + alcohol oleílico etoxilado[2OE] (Brij 92), a cinco concentraciones del tensoactivo y en el intervalo de temperatura de 323.15 a 343.15 K; mientras que con el método de gota pendiente, se determinó la tensión superficial de equilibrio de tres componentes puros: DEA, N-metildietanolamina (MDEA) y agua, en el intervalo de temperatura de 298.15 a 323.15 K, de dos sistemas binarios: DEA + agua y MDEA + agua, a cinco diferentes concentraciones y tres temperaturas 323.15, 333.15 y 343.15 K; de seis sistemas ternarios: MDEA/DEA (50 % masa total de aminos) + agua, a nueve relaciones diferentes de MDEA/DEA manteniendo el 50 % masa total de las dos aminos, en el intervalo de temperatura de 313.15 a 333.15 K, monolaurato de sorbitan (Span 20) + DEA al 20 % masa, monooleato de sorbitan (Span 80) + DEA al 20 % masa, a las temperaturas de 293.15 y 313.15 K, respectivamente; 2,4,7,9-tetrametil-5-decino-4,7-diol etoxilado[30OE]

RESUMEN

(Surfinol 485) + DEA al 20 % masa, Brij 92 + DEA al 20 % masa y Surfinol 485 + MDEA al 20 % masa, en el intervalo de temperatura de 323.15 a 343.15 K (para los tres sistemas); de cinco sistemas multicomponentes: Brij 92, monooleato de sorbitan etoxilado[20OE] (Tween 80), 2,5,8,11-tetrametil-6-dodecino-5,8-diol (Surfinol DF110-D), Surfinol 485 y alcohol oléico (Ocenol) + MDEA/DEA (45 % masa total de aminas y 55 % masa de agua), a diferentes concentraciones del tensoactivo, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K, respectivamente.

Asimismo, utilizando el método de gota pendiente, se determinó la tensión superficial dinámica de siete sistemas binarios: n-decanol + agua (sistema de referencia), a 295.15 K, a una concentración de 1.33×10^{-4} mol dm⁻³, DEA + agua y MDEA + agua, a cinco diferentes concentraciones y tres temperaturas (323.15, 333.15 y 343.15) K; Brij 92, Tween 80, Surfinol DF110-D y Surfinol 485 + agua, a las temperaturas de 313.15 K y 323.15 K y una concentración de 2.51×10^{-4} mol dm⁻³; de cinco sistemas multicomponentes Brij 92, Tween 80, Ocenol, Surfinol DF110-D y Surfinol 485 + MDEA/DEA (45 % masa total de aminas y 55 % masa de agua), a 313.15 y 323.15 K para cada sistema y diferentes concentraciones de cada tensoactivo.

Paralelamente, con el método neumático de flujo continuo de gas se determinó el índice de estabilidad de espuma y el volumen de la espuma de dos sistemas binarios: DEA, y MDEA + agua, a cinco diferentes concentraciones, en el intervalo de temperaturas de 313.15 a 343.15 K, respectivamente; y de cuatro sistemas multicomponentes Brij 92, Ocenol, Surfinol DF110-D y Surfinol 485 + MDEA/DEA (45 % masa total de aminas y 55 % masa de agua), a 313.15 y 323.15 K, respectivamente, y diferentes concentraciones de cada tensoactivo.

Con los valores experimentales de la tensión superficial dinámica del sistema binario n-decanol + agua, se derivó el coeficiente de difusión del n-decanol, utilizando el método de Ward y Tordai (tiempos cortos), generando un coeficiente de difusión de 6.58×10^{-6} cm²/s contra 6.56×10^{-6} cm²/s obtenido por Lin et. al. (1995). Con este resultado satisfactorio, se derivó el coeficiente de difusión de DEA, MDEA, Brij 92, Tween 80, Surfinol DF110-D y

del Surfínol 485, contenidos en agua. Por otro lado, utilizando el método de Ward y Tordai en su forma general, se derivó el coeficiente de difusión del Brij 92 y del Tween 80 presentes en MDEA/DEA (45 % masa total de aminos y 55 % masa de agua). Los valores del coeficiente de difusión que se presentan en este trabajo, indican que la cinética de envejecimiento superficial está controlada por la difusión (para los tensoactivos en agua) y por una barrera energética de adsorción para los tensoactivos Brij 92 y Tween 80 presentes en MDEA/DEA (45 % masa total de aminos y 55 % masa de agua).

Se propone una ecuación de estado tipo del Langmuir para representar la presión superficial dinámica en función del tiempo y con ella calcular la presión superficial de equilibrio. Posteriormente la presión superficial de equilibrio es ajustada en función de la concentración (empleando la ecuación de estado típica de Langmuir) para los sistemas binarios: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total + 55 % masa de agua), cuyos parámetros de ajuste fueron empleados para derivar el coeficiente de difusión y el módulo de elasticidad de Marangoni.

Derivando la ecuación de estado tipo Langmuir (propuesta en este trabajo), se calculó el módulo de elasticidad de Marangoni, el cual es capaz de explicar el comportamiento dinámico de los sistemas estudiados, generando una representación satisfactoria entre las propiedades superficiales y la estabilidad de espuma de las mezclas de tensoactivos, así como para las aminos.

Se calculó la adsorción superficial de exceso Γ_i , el área superficial por molécula, A , el módulo de elasticidad de Gibbs, ϵ , la concentración micelar crítica (CMC), la concentración superficial de exceso máxima, Γ_{max} , el área superficial mínima por molécula, A_{min} y la presión superficial a la concentración micelar crítica, Π_{cmc} para el sistema multicomponente: Brij 92 y el Tween 80 en MDEA/DEA (45 % masa total de aminos y 55 % masa de agua).

Se calcularon los parámetros de micelización (ΔG°_{mic} , ΔS°_{mic} y ΔH°_{mic}) los parámetros de adsorción (ΔG°_{ad} , ΔH°_{ad} y ΔS°_{ad}) y la energía de activación del sistema multicomponente: Brij 92 y el Tween 80 en MDEA/DEA (45 % masa total de aminos y 55 % masa de agua).

RESUMEN

Dado que las propiedades de superficie y de estabilidad de espuma del Brij 92 son similares al del Ocenol, se propone al Brij 92 como alternativa para el controlar de la espuma que ocurre durante la fraccionación o destilación de líquidos, en plantas de tratamiento de aguas amargas y/o en plantas endulzadoras de gases.

OBJETIVO

- El objetivo de este proyecto doctoral es conocer las variables relevantes en la producción de espuma que se genera en las torres absorbedoras de las plantas de endulzamiento de corrientes gaseosas, por medio de la tensión superficial de equilibrio, la tensión superficial dinámica y del índice de estabilidad de espuma de soluciones acuosas de alcanolaminas con y sin tensoactivos no iónicos etoxilados y no etoxilados, en función de la concentración y la temperatura.

Para logra este objetivo se consideran los siguientes alcances:

- ◆ Estudiar la cinética de envejecimiento superficial (modelos fisicoquímicos) de tensoactivos no iónicos etoxilados para explicar si la cinética está controlado por la difusión o por una barrera energética de adsorción.
- ◆ Estudiar el módulo de Marangoni para explicar el comportamiento de la espuma.
- ◆ Utilizar el método de elevación capilar para determinar la tensión superficial de equilibrio.
- ◆ Utilizar el método de gota pendiente para determinar la tensión superficial dinámica.
- ◆ Utilizar el método neumático de flujo continuo de gas para determinar la espuma.
- ◆ Estudiar los sistemas dietanolamina (DEA) y metildietanolamina (MDEA) en agua y tensoactivos no iónicos (alcohol oléico etoxilado [2OE] (Brij 92), monooleato de sorbitan etoxilado [20OE] (Tween 80), 2,4,7,9-tetrametil-5-decino-4,7-diol etoxilado [30OE] (Surfinol 485), 2,5,8,11-tetrametil-6-dodecino-5,8-diol (Surfinol DF110-D) y alcohol oléico (Ocenol)) en MDEA/DEA (45 % masa total de aminas y 55 % masa de agua).

A	Área superficial y/o Área transversal
a	Actividad del soluto
b	Tamaño de la gota
C_0	Concentración molar del soluto
C_s	Concentración del substrato
D	Coefficiente de difusión
ds	Diámetro ecuatorial
de	Diámetro máximo
h	Altura
f	Factor de expansión
G^s	Energía libre superficial
t	Tiempo
r	Radio del capilar
T	Temperatura
V, V	Volumen molar, Volumen de la gota a partir de un plano
U^s	Energía superficial total
S	Entropía y/o forma de la gota
k	Constante de Boltzmann
P	Presión
R	Constante universal de los gases y/o Radio máximo de curvatura
Ri	Radio principal de curvatura

Letras griegas

$\Gamma_2^{(1)}$	Concentración superficial de exceso
μ	Potencial químico
Π	Presión superficial
π	3.1416

NOMENCLATURA

τ	Tiempo menor o igual a t
ρ	Densidad
η	Viscosidad absoluta
$\gamma_{(eq)}$	Tensión superficial de equilibrio
$\gamma_{(t)}$	Tensión superficial dinámica
ϕ	Ángulo entre la normal y el eje de simetría
β	Forma de la gota (superficie)
Σ	Índice de estabilidad de espuma

I.1. Termodinámica de superficies

La ciencia de las superficies ha ido ganando un gran interés como una especialidad de la fisicoquímica. Muchas propiedades físicas, químicas y eléctricas de la materia, se encuentran en la frontera de las fases y son diferentes de aquellas que provienen del bulto. Estas diferencias en propiedades se deben principalmente a dos factores: (1) A que las moléculas localizadas en la superficie poseen mayor energía que aquellas que están en el bulto de la solución, y (2) A que en el caso de moléculas asimétricas, existe una fuerte tendencia a experimentar considerable orientación en la superficie (Rastogi, 1969).

Los fenómenos superficiales tienen un gran interés teórico y práctico. Estudiando estos fenómenos se puede juzgar acerca de la energía y naturaleza de las interacciones moleculares. Los fenómenos superficiales se observan en sustancias con superficies muy desarrolladas y se encuentran difundidas en la naturaleza, por ejemplo, en los suelos y en los tejidos animales y vegetales, y se aplican en los lubricantes sólidos, en los rellenos de las gomas, los pigmentos y muchas otras sustancias utilizadas en procesos de la química industrial (Guerasimov et. al., 1977).

La superficie de un líquido se comporta, bajo muchos aspectos, como si fuera una membrana elástica en estado de tensión, de modo que la superficie tiende a contraerse para que su área sea mínima. El trabajo necesario para aumentar en dA el área de la película superficial es $dW = -\gamma da$, donde γ es la tensión superficial de la película, el signo negativo en esta ecuación indica que la tensión superficial actúa en sentido opuesto a la presión de un gas (http://www.lfp.uba.ar/Julio_Gratton//termo/15.EfectosSup.pdf).

La energía superficial está representada por la relación de “Gibbis-Duhem”. Para ello, a continuación mostramos las expresiones tanto del potencial termodinámico de la energía interna, así como para la fase vapor, líquida y superficial.

Para un sistema de dos fases homogéneas α y β , las cuales contienen una capa superficial δ , la energía interna total se expresa por (Guggenheim, 1957; Aveyar y Hayden, 1972):

$$dU = dU^\alpha + dU^\beta + dU^\delta \quad (I.1)$$

La energía interna para un sistema diatérmico, elástico y permeable (Aveyar y Hayden, 1972), y donde los efectos superficiales son significativos está dada por:

$$dU = TdS - pdV + \gamma dA + \sum \mu_i dn_i \quad (I.2)$$

Por lo tanto, la energía interna para la fase vapor (α) y para la fase líquida (β) es:

$$dU^\alpha = TdS^\alpha - pdV^\alpha + \sum \mu_i dn_i^\alpha \quad (I.3)$$

$$dU^\beta = TdS^\beta - pdV^\beta + \sum \mu_i dn_i^\beta \quad (I.4)$$

Como no se sabe cuál es la expresión de la energía interna para la fase superficial, a continuación se deducirá (Aveyar y Hayden, 1972; Chatteraj y Birdi, 1984), así apoyándonos con el modelo de Gibbs ya que considera a la interfase con un volumen cero, y las otras propiedades termodinámicas distintas de cero, tenemos:

$$V = V^\alpha + V^\beta \quad (I.5)$$

$$U^\delta = U - U^\alpha - U^\beta \quad (I.6)$$

$$S^\delta = S - S^\alpha - S^\beta \quad (I.7)$$

$$n_i^\delta = n_i - n_i^\alpha - n_i^\beta \quad (I.8)$$

donde V representa el volumen, U representa a la energía interna, S a la entropía y n es el número de moles; el subíndice i se refiere al iésimo componente que participa en el sistema.

Dado que estas ecuaciones se pueden expresar en forma diferencial, entonces se tienen las siguientes ecuaciones:

$$dV = dV^\alpha + dV^\beta \quad (I.9)$$

$$dU^\delta = dU - dU^\alpha - dU^\beta \quad (I.10)$$

$$dS^\delta = dS - dS^\alpha - dS^\beta \quad (I.11)$$

$$dn_i^\delta = dn_i - dn_i^\alpha - dn_i^\beta \quad (I.12)$$

Considerando una expresión completa de la energía para la fase superficial, es necesario incluir todos los términos de las ecuaciones (I.2), (I.3) y (I.4) en la ecuación (I.10). Así la expresión para la energía superficial es:

$$dU^\delta = TdS - pdV + \gamma dA + \sum \mu_i dn_i - TdS^\alpha + pdV^\alpha - \sum \mu_i dn_i^\alpha - TdS^\beta + pdV^\beta - \sum \mu_i dn_i^\beta \quad (\text{I.13})$$

En la ecuación (I.13) se tiene que: la cantidad μ_i es el potencial químico del componente i ; T es la temperatura; P es la presión y V es el volumen.

Agrupando términos se tiene:

$$dU^\delta = T(dS - dS^\alpha - dS^\beta) - p(dV - dV^\alpha - dV^\beta) + \sum \mu_i (dn_i - dn_i^\alpha - dn_i^\beta) + \gamma dA \quad (\text{I.14})$$

De las ecuaciones (I.9), (I.11) y (I.12), se obtiene la siguiente ecuación:

$$dU^\delta = TdS^\delta + \gamma dA + \sum \mu_i dn_i^\delta \quad (\text{I.15})$$

Puesto que la ecuación diferencial de la ecuación (I.15) es exacta, esta ecuación se puede representar como:

$$U^\delta = TS^\delta + \gamma A + \sum \mu_i n_i^\delta \quad (\text{I.16})$$

Realizando las diferenciales en la ecuación (I.16), ésta toma la siguiente forma:

$$dU^\delta = TdS^\delta + S^\delta dT + \gamma dA + Ad\gamma + \sum (\mu_i dn_i^\delta + n_i^\delta d\mu_i) \quad (\text{I.17})$$

Finalmente, comparando la ecuación (I.15) con la ecuación (I.17), se tiene la siguiente ecuación:

$$S^\delta dT + Ad\gamma + \sum n_i^\delta d\mu_i = 0 \quad (\text{I.18})$$

La ecuación (I.18), es la ecuación de Gibbs-Duhem para la interfase. Para un proceso a temperatura constante, la ecuación (I.18) toma la siguiente forma (Guggenheim, 1957; Aveyar y Hayden, 1972):

$$Ad\gamma + \sum n_i^\delta d\mu_i = 0 \quad (\text{I.19})$$

Así, los potenciales químicos de entalpía (H), de la energía de Helmholtz (A) y de Gibbs (G) para la superficie son (Prausnitz et al., 2000; Aveyar y Hayden, 1972):

$$dH^\delta = TdS^\delta + v^\delta dP + \gamma dA + \sum \mu_i dn_i^\delta \quad (\text{I.20})$$

$$dA^\delta = -S^\delta dT - Pdv^\delta + \gamma dA + \sum \mu_i dn_i^\delta \quad (\text{I.21})$$

$$dG^\delta = -S^\delta dT + v^\delta dP + \gamma dA + \sum \mu_i dn_i^\delta \quad (\text{I.22})$$

Los potenciales que toman en cuenta el trabajo volumétrico PdV (U, A) tienen signo contrario al término de trabajo superficial; en cambio, los potenciales que consideran cambios de presión (H, G) participan en curvatura para las regiones superficiales. Por lo tanto, esto indica una competencia entre regiones volumétricas y superficiales entre el bulto y la superficie de las especies presentes (Aveyar y Hayden, 1972).

El reparto de especies entre regiones homogéneas e inhomogéneas está termodinámicamente establecido por la ecuación de Gibbs-Duhem, con la inclusión del término superficial que en el caso ideal toma la forma (Ronen, 1978):

$$\Gamma_i = - \frac{x_i}{RT} \left(\frac{d\gamma}{dx_i} \right)_T \quad (\text{I.23})$$

Ya que $-d\gamma = d\pi = \Gamma_i RT d \ln x_i$; donde Γ_i representa la concentración superficial en exceso con relación a la composición de bulto x_i . El signo resultante para Γ_i depende del comportamiento de la tensión superficial en relación a la composición de bulto x_i . Si al aumentar la composición de x_i disminuye la tensión superficial, entonces para el

componente i su preferencia es de adsorberse en la superficie, así que este compuesto se conoce como tensoactivo o material con actividad superficial (Ronen, 1978).

Por otra parte, dado que en este trabajo doctoral se estudiaron tensoactivos no iónicos, es necesario conocer y/o tener en cuenta aspectos tales como: la adsorción, la concentración micelar crítica, la espumación y la tensión superficial dinámica, mismas que se presentan a continuación:

I.2. Autoasociación de moléculas de tensoactivo

La adsorción de moléculas con actividad superficial del bulto a la superficie o interfase, está gobernada por una constante de velocidad de equilibrio y la adsorción ocurre a cualquier concentración. Si la concentración de un tensoactivo soluble en agua se incrementa gradualmente, la concentración superficial también se incrementa y alcanza un nivel máximo a una concentración específica en el bulto. Más allá de esta concentración, monómeros individuales de tensoactivos empiezan a agregarse con sus cabezas hidrofílicas apuntando hacia fuera de la solución y las colas hidrofóbicas apuntando hacia dentro del agua para minimizar la energía libre (maximizar la entropía) del sistema. La concentración a la cual estos agregados ocurren se conoce como “concentración micelar crítica” (CMC) y los agregados se llaman micelas. En general, las micelas son agregados esféricos de moléculas de tensoactivo de 4 a 10 nm de diámetro que están en equilibrio con sus respectivos monómeros en la fase bulto de la solución (figura 1.1) (Kanicky et al., 2001).

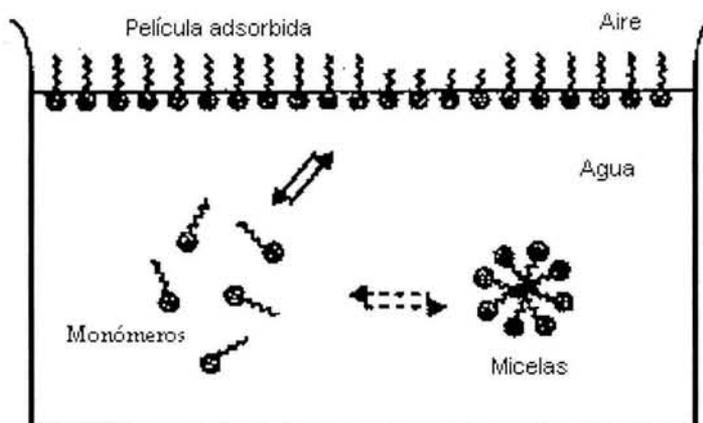


Figura 1.1. Representación esquemática de los tres ambientes (monómero, micela y película adsorbida) en el cual las moléculas del tensoactivo conviven en el agua arriba de la CMC.

La concentración micelar crítica depende de la estructura de las moléculas del tensoactivo, así como también de las condiciones fisicoquímicas tales como temperatura, pH y la composición iónica de la solución.

Cuando se incrementa la concentración total del tensoactivo, se pueden formar otras estructuras tales como cilindros, empaquetamientos hexagonales y estructuras lamelares, las cuales van a depender de la estructura del tensoactivo y de las condiciones fisicoquímicas (figura 1-2).

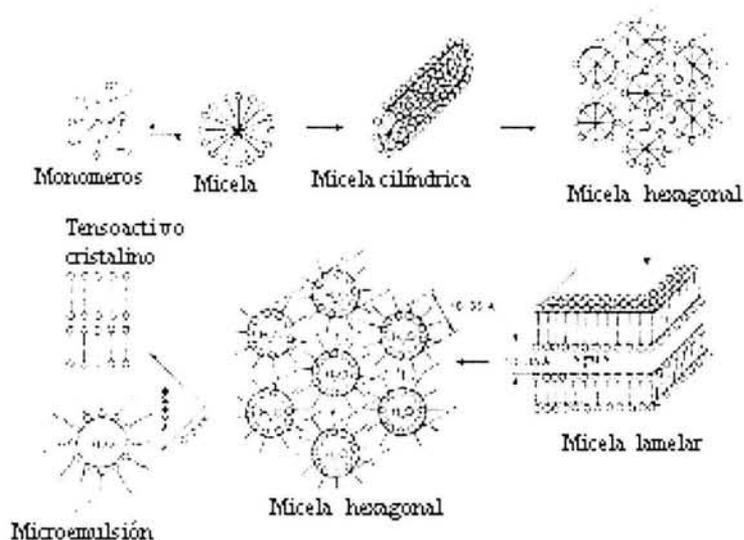


Figura 1.2. Formación de estructuras posibles en una solución de tensoactivo.

Si la fase bulto no es acuosa, se pueden formar micelas inversas con las cabezas polares apuntando hacia la parte interna del agua y las colas hidrofóbicas apuntando hacia a fuera (dentro del aceite).

Cuando una fase oleica está presente y en contacto con la fase acuosa, el coeficiente de reparto agua/aceite del tensoactivo, el grado de actividad superficial y la estructura molecular determinan si se forma una emulsión aceite en agua (o/w), una emulsión agua en aceite (w/o) o una estructura de cristal líquido (Kanicky et al, 2001).

Los agregados en los tensoactivos son sistemas dinámicos, donde la energía térmica y las fuerzas Coulombicas mantienen a los monómeros del tensoactivo y los agregados en movimiento. En los sistemas micelares existen, por ejemplo, dos tiempos característicos de

“relajamiento”, conocidos como τ_1 y τ_2 ; el primero corresponde a la velocidad a la cual un monómero entra y sale del agregado micelar (tiempo de relajación rápida y ocurre en microsegundos); el segundo corresponde a la velocidad de formación y rompimiento de una micela (tiempo de relajación lenta y ocurre de milisegundos a minutos) (Patist et al., 2001). Se ha demostrado que la cinética de micelización está afectada fuertemente por los fenómenos interfaciales tales como: el tipo de mojado, la espumabilidad, el tamaño de las gotas emulsionadas, la velocidad de solubilización del aceite y la detergencia (Kanicky et al., 2001).

El interés en el fenómeno de autoasociación de la especie con actividad superficial tiene aplicaciones sumamente importantes en química, bioquímica, química de polímeros, farmacéutica, recuperación de petróleo, procesamiento de minerales, cosméticos y en alimentos.

El empacamiento y estiramiento que desarrollan las moléculas en solución acuosa (o solución no acuosa) resulta de una mezcla compleja de efectos, que se indican a continuación (Myers, 1991):

- 1) De las interacciones atractivas y repulsivas de la porción hidrocarbonada de la molécula con el agua.
- 2) De la interacción atractiva entre la porción hidrocarbonada sobre las moléculas separadas.
- 3) De la solvatación de la cabeza hidrofílica con el agua.
- 4) De las interacciones entre las cabezas solvatadas (generalmente repulsiva) entre la cabeza hidrofílica y los contraiones (para el caso de materiales iónico).
- 5) De la geometría y el empacamiento derivados de la estructura molecular presente.

I.2-A. Manifestación de la formación micelar

Las propiedades de bulto, tales como la tensión superficial, la conductividad eléctrica o la dispersión de luz, como función de la concentración del tensoactivo generan curvas que normalmente exhiben cambios de pendientes a concentraciones bajas de tensoactivo (Figura 1.3). El cambio en la propiedad se puede interpretar como un cambio significativo en la naturaleza del soluto. Cuando se mide la conductividad (línea superior de la figura), el

rompimiento se puede asociar al incremento de la masa por unidad de carga de la especie conductora. Para una medición de dispersión de luz (línea ubicada en la parte inferior de la figura), el cambio de la turbidez de la solución indica la aparición de especies dispersas de un tamaño más grande que las del monómero. Al estudiar la tensión superficial, el cambio de la pendiente indica que la superficie se encuentra saturada con moléculas de tensioactivo. Estas propiedades, y muchas más, sirven para evidenciar la formación de agregados o micelas en soluciones de tensioactivos a concentraciones bien definidas.

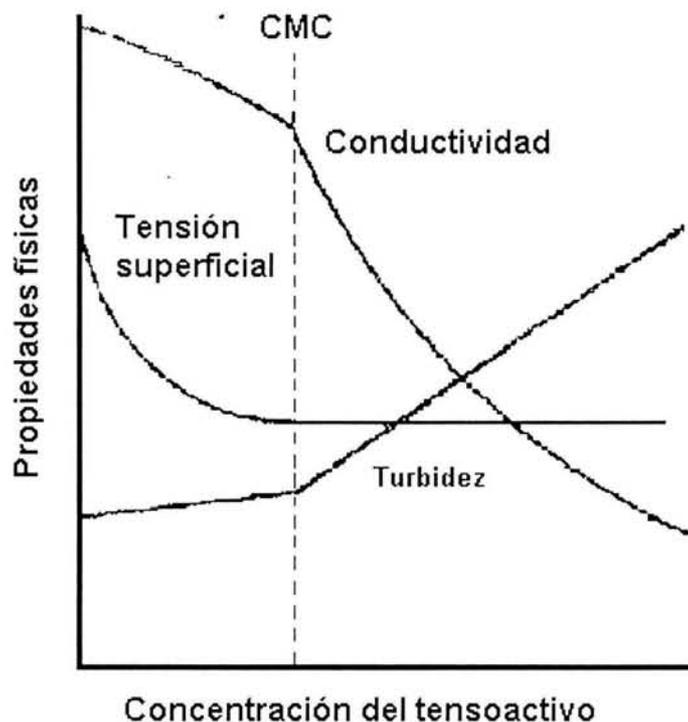


Figura 1.3. Propiedades físicas *versus* concentración

Actualmente, existen técnicas que proporcionan información acerca de la naturaleza microscópica de la asociación estructural. Sin embargo, las micelas no son especies estáticas porque hay un intercambio rápido de moléculas entre los agregados y la solución. Las estructuras micelares se muestran en figura 1.4 (Myers, 1991).

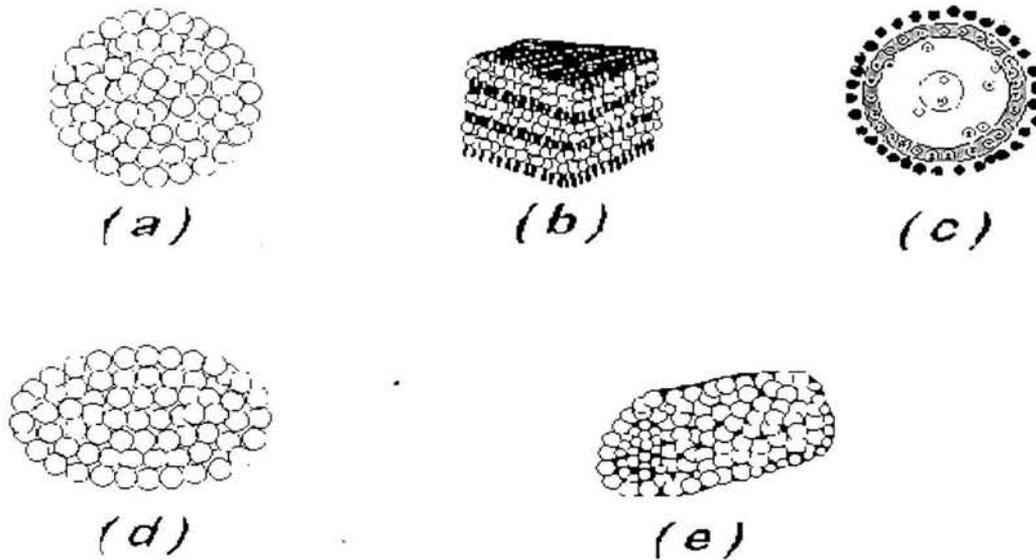


Figura 1.4. Formas de los agregados: esfera (a), hexagonal (b), inversa (c), disco (d) y elipse (e).

Cuando un material con actividad superficial (que contienen un grupo liofóbico junto con un grupo liofílico en la misma molécula) se disuelve en un disolvente, éstos distorsionan la estructura del disolvente, y por lo tanto, incrementan la energía del sistema. Estas moléculas se concentran en la superficie donde el grupo liofílico está lejos del disolvente, hace que la energía disminuya. Otra manera de disminuir la energía libre de la solución se logra distorsionando la estructura del disolvente, ya que las moléculas del tensoactivo se agregan dentro del cúmulo (micela) donde los grupos liofílicos se dirigen hacia el interior del cúmulo y los grupos liofóbicos se dirigen hacia el disolvente. La micelización es por lo tanto un mecanismo alternativo de adsorción en la interfase cuando los grupos liofóbicos no están en contacto con el disolvente. La concentración a la que ocurre la micelización dependerá del balance entre los factores que promueven la micelización y las que se oponen a ella (Rosen, 1978).

1.2-B. Formación micelar

La ley de acción de masas supone que existe un equilibrio entre los monómeros del tensoactivo y la micela. Para el caso de tensoactivos no iónicos, el equilibrio entre los monómeros y la micela está dado por la ecuación (Myers, 1991):



con una constante de equilibrio dada por:

$$K_m = \frac{[S_n]}{[S]^n} \quad (I.25)$$

donde S representa la concentración molar y n es el número de monómeros de la micela o número de agregación. La concentración micelar crítica ó CMC para un tensoactivo está sustentado y caracterizado por sus propiedades físicas y químicas del propio tensoactivo. Teóricamente se indica que la formación micelar es compleja y la forma de la CMC se puede explicar en términos de la ley de acción de masas. Entonces si C_t denota a la concentración total del tensoactivo en la solución, C_s la fracción del tensoactivo presente como molécula libre ($[S]/C_t$), y C_m representa el estado de agregación, la Ecn (I.25) se puede escribir como:

$$K_m = \frac{C_m}{[C_s]^n} \quad (I.26)$$

En el proceso de formación micelar, el número de moléculas de tensoactivo en la solución es igual al número de moléculas del tensoactivo presentes como moléculas libres, por lo tanto la concentración $C_m = C_s = 1/2C_{eq}$, y la ecuación (I.26) se convierte en:

$$K_m = \left(\frac{1}{2} C_{eq} \right)^{-(n-1)} \quad (I.27)$$

sustituyendo (I.27) en (I.26), se tiene:

$$\frac{C_m}{(C_s)^n} = \left(\frac{1}{2} C_{eq} \right)^{-(n-1)} \quad (I.28)$$

donde $C_t = C_s + C_m$, y reorganizando la ecuación (I.28), se obtiene:

$$\frac{C_m}{C_{eq}} = \frac{1}{2} \left(\frac{2C_s}{C_{eq}} \right)^n \quad (I.29)$$

La ecuación (I.29) indica que podemos observar una variación de la concentración de los primeros vecinos cuando $C_t = C_{eq}$ para un número de agregación dado, n . Para varios tensoactivos, el número de agregación está en el intervalo de 50 a 100.

I.2-C. Energía libre de micelización

De la ecuación (I.25), la energía libre estándar para la formación micelar por mol de la micela está dada por (Myers, 1991):

$$\Delta G_m = -RT \ln K_m = -RT \ln S_n + nRT \ln S \quad (I.30)$$

donde el cambio de energía libre estándar por mol del tensoactivo es:

$$\frac{\Delta G_m}{n} = - \left(\frac{RT}{n} \right) \ln S_n + RT \ln S \quad (I.31)$$

Cerca de la CMC, $S = S_n$, así que el término, $(RT/n)\ln S_n$, de ecuación (I.31) se puede despreciar, por lo tanto una expresión aproximada para la energía libre de micelización está dada por la ecuación siguiente:

$$\Delta G_m = RT \ln CMC \quad (I.32)$$

I.2-D. Espumación

Un líquido que produce espuma debe: (1) Ser capaz de expandir su área superficial, así como formar una membrana alrededor de las burbujas del gas, (2) Poseer la reología correcta y las propiedades de superficie para retardar la reducción de la lamela para que se unan las burbujas y (3) Ser capaz de retardar la difusión del gas atrapado en burbujas pequeñas, grandes o de la atmósfera que las rodea.

La espuma no ocurre en líquidos puros porque no cumple con los tres mecanismos arriba mencionados. Sin embargo, cuando están presentes tensoactivos o polímeros, los efectos reológicos y la adsorción en la interfase gas-líquido ayudan a retardar la pérdida de líquido en la lamela y en algunos casos producen sistemas más estables (Kanicky et al., 2001; Myers, 1991) (Figura 1.5).

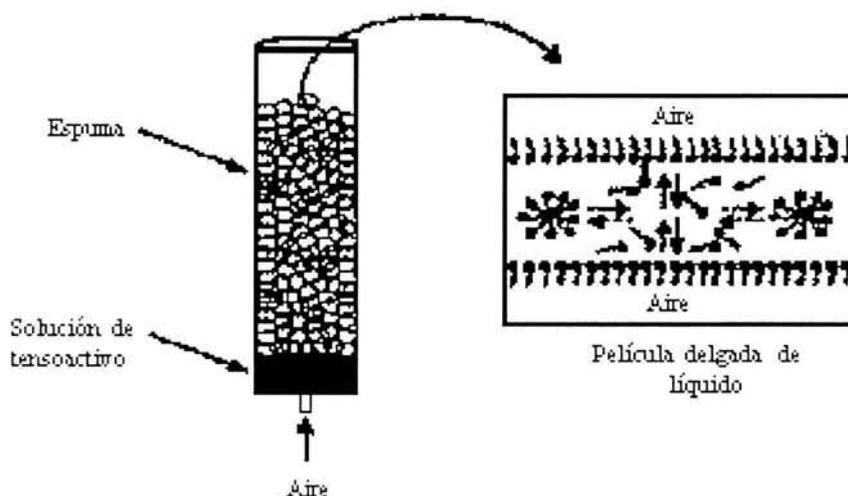


Figura 1.5. Representación esquemática de la adsorción de tensoactivos sobre una nueva interfase aire/agua durante la formación de la espuma como resultado de la formación de micelas (micelas estables implica un flujo menor de monómeros y un volumen bajo de espuma)

La teoría de la elasticidad de la película es una de las teorías relacionadas a la formación y persistencia de estas películas, ya que se deriva de un número de observaciones experimentales acerca de la tensión superficial de los líquidos, la cual está fundamentada por dos aspectos (Kanicky et al., 2001, Myers, 1991): Primero, de la ecuación de adsorción de Gibbs, la tensión superficial de un líquido disminuirá cuando aumenta la concentración del tensoactivo (suponiendo una adsorción positiva). Segundo, la tensión superficial dinámica de una superficie recientemente formada siempre es más grande que la del equilibrio; es decir, hay un requerimiento de tiempo finito durante el cual las moléculas del tensoactivo en la solución deben difundirse en la interfase para disminuir la tensión superficial (figura 1.6). El tiempo para alcanzar la tensión superficial de equilibrio debido a la difusión se conoce como efecto Marangoni. Los dos efectos de tensión superficial, uno

debido a la adsorción y el otro debido a la difusión, son complementarios y a veces se discuten de manera combinada conocido como efecto Gibbs-Marangoni.

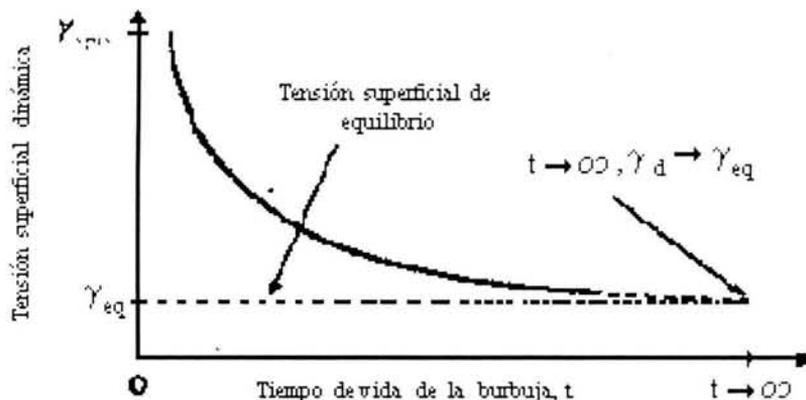


Figura 1.6. Tensión superficial dinámica de una interfase nueva como función del tiempo de vida de la burbuja.

El impacto fundamental de la concentración del tensoactivo y la velocidad de difusión en una película lamelar puede visualizarse como sigue (Kanicky et al., 2001, Myers, 1991) (Figura 1.7):

- (1) Cuando la película lamelar entre las burbujas adyacentes está comprimida como resultado de la gravedad, la agitación, el drenado u otra acción mecánica, la nueva superficie deberá formarse teniendo una concentración baja de tensoactivo, por tanto ocurrirá un incremento local en la tensión superficial.
- (2) Se producirá un gradiente de tensión superficial a lo largo de la película cuando el líquido fluye de las regiones de baja tensión superficial hacia la nueva superficie estirada, oponiéndose a la reducción de la película.
- (3) Se consideran acciones de estabilización adicionales como resultado de la difusión de la nueva molécula del tensoactivo en la superficie para presentar el transporte de disolventes asociado dentro del área superficial, otra vez oponiéndose al efecto de drenado.

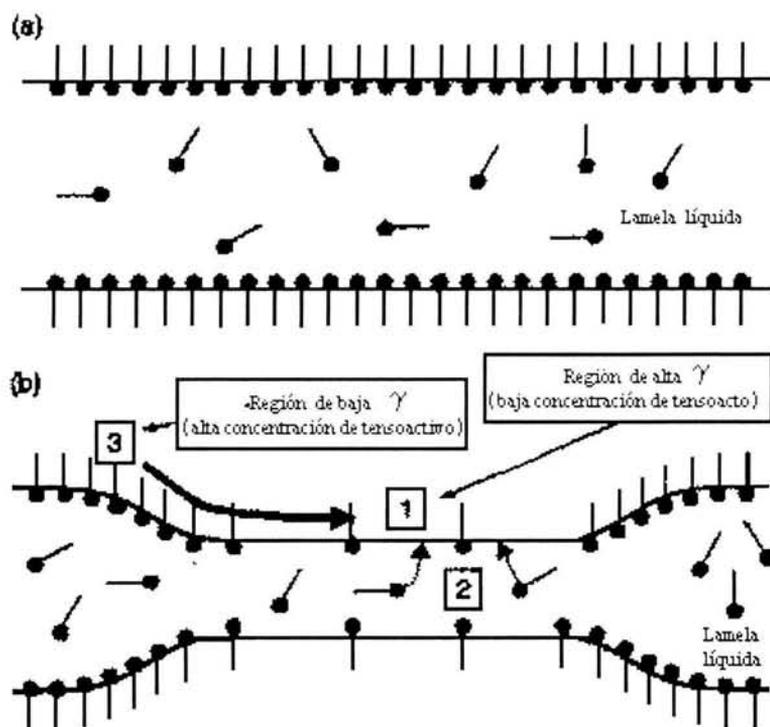


Figura 1.7. Representación esquemática de los efectos Gibbs–Marangoni. (a) película sin estiramiento (b) película estirada. Una película estirada contiene áreas localizadas de alta tensión superficial, γ [1]. El flujo de las moléculas del tensoactivo de la fase bulto [2] a la superficie (efecto Gibbs) y adelante de la interfase [3] (efecto Marangoni) de la película estirada.

El efecto Marangoni es importante en soluciones diluidas de tensoactivos y en un intervalo reducido de concentración. En ausencia de agitación externa, la cantidad de tensoactivo adsorbido en la nueva interfase se puede estimar con la ecuación siguiente (Myers, 1991):

$$n = 2 \left(\frac{D}{\Pi} \right)^{1/2} C t^{1/2} \left(\frac{N}{1000} \right) \quad (I.33)$$

donde: n es el número de moléculas por centímetro cuadrado, D es la constante de difusión de bulto en $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, C es la concentración del tensoactivo en mol l^{-1} , t es el tiempo en segundos, N es la constante de Avogadro y Π es igual a 3.1416.

El efecto Gibbs propone que la elevación de la tensión superficial ocurre cuando se extiende la película y cuando la concentración del tensoactivo disminuye en la fase bulto justo por abajo de la nueva interfase formada. Cuantitativamente, el efecto Gibbs se puede describir en términos del coeficiente de elasticidad superficial, ϵ , donde Gibbs lo define

como el cambio de la tensión superficial por el cambio infinitesimal del área superficial (Myers, 1991):

$$\varepsilon = 2A \left(\frac{\partial \gamma}{\partial A} \right) \quad (I.34)$$

Dado que, la adsorción superficial de equilibrio Γ es proporcional a $1/A$, la ecuación (I.31) se puede transformar en:

$$\varepsilon = -\frac{\partial \gamma}{\partial \ln \Gamma} = -\Gamma \frac{\partial \gamma}{\partial \Gamma} \quad (I.35)$$

Puesto que la elasticidad es la resistencia a la deformación de la película, un valor grande del coeficiente de elasticidad indica que la película tiene la habilidad de sufrir choques sin que se rompa. Como se mencionó anteriormente, cuando una película de un líquido puro es estirada, éste no presenta cambios significativos en la tensión superficial, por lo tanto, el valor del coeficiente de elasticidad es igual a cero. Ésta es la razón principal para indicar que los líquidos puros no hacen espuma. Si una película tiene un valor del coeficiente de elasticidad mayor de cero, quiere decir que el estiramiento de la película producirá un incremento local en la tensión superficial e inducirá flujo del substrato hacia el interior del área expandida y de esta manera podrá restaurar el espesor original de la lamela.

En tensoactivos, se pueden considerar dos procesos relacionados a los mecanismos de estabilización de espumas (ver figura 1.7):

- 1). El primero está relacionado a la velocidad de difusión superficial de las moléculas del tensoactivo de regiones de baja a alta tensión superficial.
- 2). El segundo está relacionado a la velocidad de adsorción del tensoactivo de la fase bulto hacia el interior de la superficie.

En ambos casos, un rápido arribo de moléculas de tensoactivo en la nueva superficie destruye el gradiente de tensión superficial y previene la acción de restaurar el proceso "Gibbs-Marrangoni".

El comportamiento esperado entre la tensión superficial, la viscosidad superficial y la estabilidad de espuma en varios sistemas formados por tensoactivos en agua es similar al representado en la figura 1.8 (Patist et al., 1998).

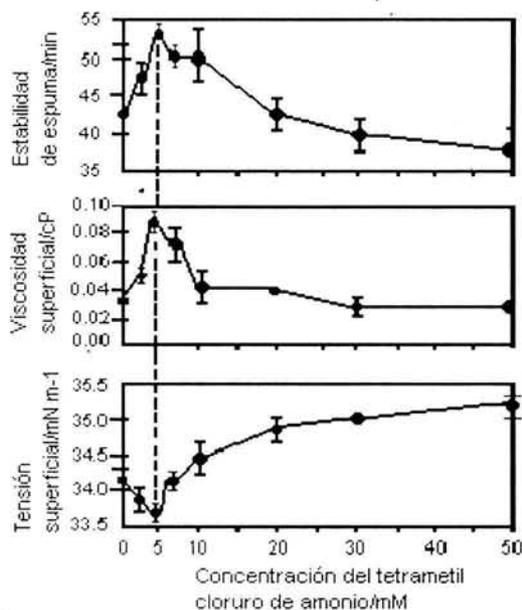


Figura 1.8. Efecto en las propiedades de superficie del tetrametil cloruro de amonio a una concentración de 150 mM de dodecil sulfato de sodio, a 298.15 K (Patist et al., 1998).

Algunos alcoholes etoxilados + agua o alcoxialcoholes conocidos también como éteres monoalquílicos de oligómeros del etilén-glicol cuya abreviatura es CmEn, poseen un comportamiento similar a los tensoactivos de cadena larga; es decir, muestran un mínimo en la tensión superficial y un máximo en la estabilidad de espuma (Trejo y Kronbery, 1977; Elizalde et al., 1988), Figuras 1.9 y 1.10.

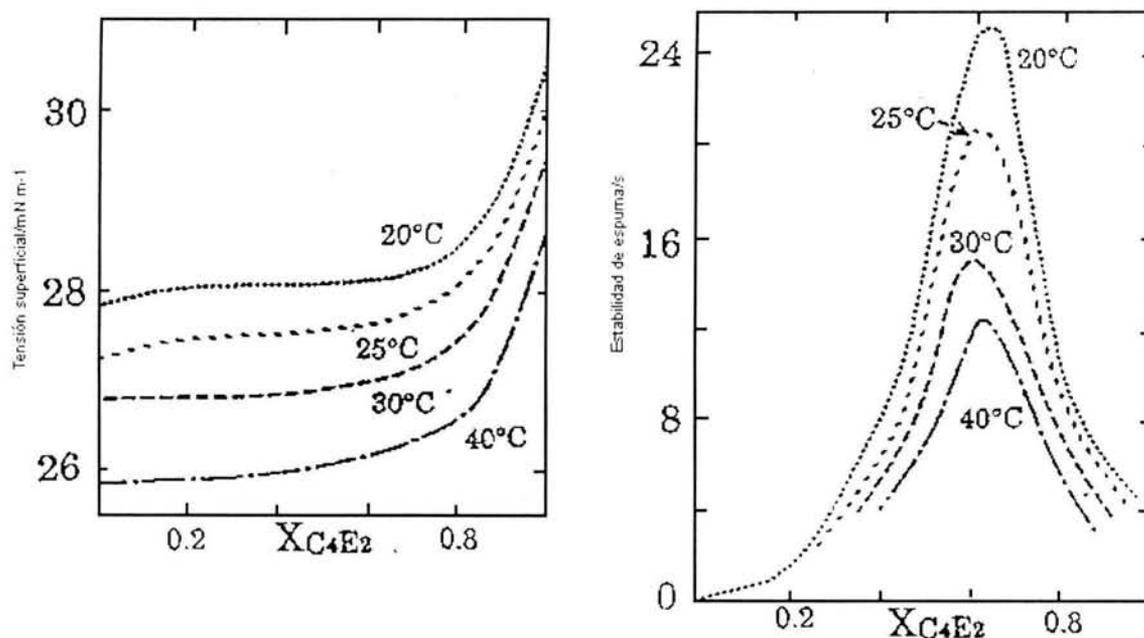


Figura 1.9. Resultados experimentales de tensión superficial y estabilidad de espuma para el sistema C4E2 + n-hexadecano, como función de la temperatura (Trejo y Kronbery, 1977).

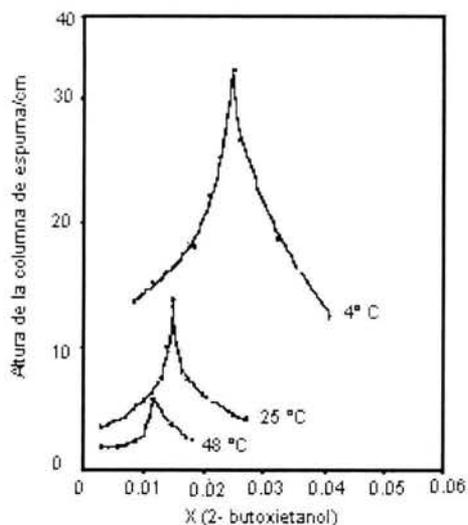


Figura 1.10. Altura de la columna cilíndrica de espuma del sistema 2-butanol + agua en función de la fracción mol del alcohol, a varias temperaturas (Elizalde et al., 1988).

I.2-E. Tensión Superficial dinámica

Para un líquido puro en equilibrio con su vapor, su adsorción y la orientación de sus moléculas en la superficie son completamente diferentes al de las moléculas de bulto (Figura 1.11). Cuando se forma una nueva superficie y para que las moléculas se difundan

en la superficie, se necesita una cantidad finita de tiempo y se requiere una fuerza, por el incremento de área, para alcanzar nuevamente el equilibrio. En este sentido y tal vez a corto tiempo, la medición de la tensión superficial del sistema debe ser diferente al del equilibrio. La medición de la tensión superficial de la nueva superficie se denomina "tensión superficial dinámica".

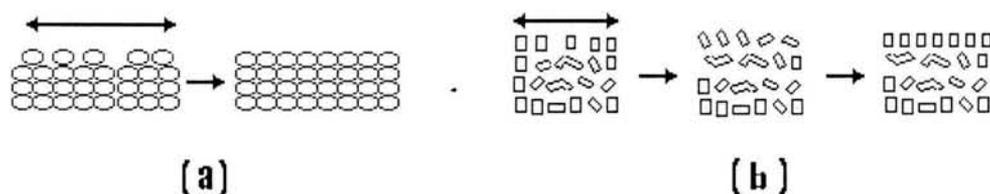


Figura 1.11. Tensión superficial dinámica de líquidos puros: (a) para un líquido no polar; los efectos de tensión superficial dinámica están controladas por la velocidad de difusión de las moléculas del bulbo a la nueva superficie; (b) en líquidos polares, la situación es más complicada por la orientación de las moléculas en la interfase.

Cualitativamente, se considera que el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio después de formar una nueva superficie está relacionado al tiempo de difusión de la nueva molécula hacia la superficie, conocida comúnmente como constante de difusión. Los tiempos de difusión usualmente están en el intervalo de $10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, los cuales se pueden convertir en milisegundos al alcanzar el equilibrio. La precisión de la medición de la tensión superficial en tiempos pequeños es difícil de obtener, así que aún hay un gran trabajo en relación a la termodinámica y a la cinética de tales superficies frescas.

Si está presente un soluto con actividad superficial, éste hace que la tensión superficial sea afectada experimentalmente, debido a la concentración del soluto y su orientación. Existen varias teorías relacionadas con procesos dinámicos de la adsorción en la superficie de moléculas frescas. Se puede considerar que la velocidad inicial de adsorción en la nueva superficie es aproximadamente igual a la velocidad de adsorción de las moléculas del componente puro. Por otro lado, cuando ocurre la adsorción superficial, la región de la solución por debajo de la superficie logra que la concentración del soluto disminuya, por lo tanto, la difusión es lenta hasta que más soluto se difunda en el bulbo (Figura 1.12). Obviamente, la velocidad del movimiento está relacionado con la constante de difusión del soluto, para una constante de difusión pequeña, para alcanzar el equilibrio se requiere un

tiempo grande. Tensoactivos de peso molecular grande producen valores grandes de tensión superficial de equilibrio, cuyos coeficientes de difusión se obtienen a concentraciones muy pequeñas.

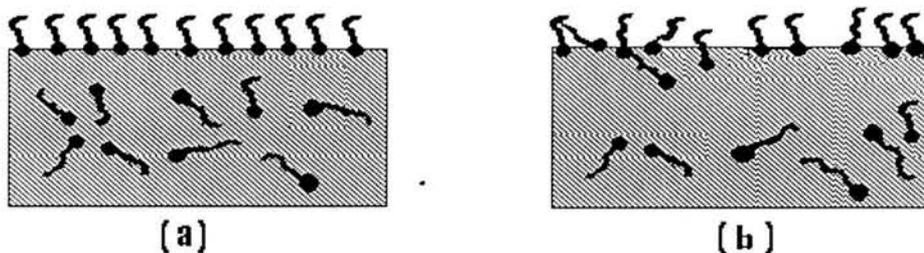


Figura 1.12. Efecto de la tensión superficial dinámica en una solución de tensoactivo: (a) una superficie en equilibrio; (b) cuando la superficie es alargada, se adicionan más moléculas de tensoactivo para difundirse en la nueva superficie, temporalmente reducen la concentración del tensoactivo por debajo de la superficie.

Una consideración adicional sobre tensión superficial dinámica puede surgir en términos de la orientación molecular en la superficie, por ejemplo, para una molécula simétrica la orientación no debe ser un problema; sin embargo, en muchos sistemas, especialmente para aquellos que son asimétricos (tanto la forma y la naturaleza química), tales moléculas como los alcoholes y otros materiales orgánicos con actividad superficial, la tensión superficial es función de la orientación de la molécula en la superficie. Para una solución acuosa con alcohol de cadena lineal, la tensión superficial de equilibrio resulta cuando las moléculas adsorbidas están orientadas con la cadena alquílica en la fase vapor y el grupo hidrofílico está en el agua (Figura 1.13). Para que ocurra tal orientación se requiere de algún tiempo finito, así que dos materiales con coeficientes de difusión de bulto esencialmente idénticos deberán exhibir distintos valores de tensión superficial dinámica debida a sus diferencias de velocidades de orientación. Se ha comprobado que en soluciones poliméricas, para que alcancen la tensión superficial de equilibrio se pueden tomar minutos, horas o en ocasiones hasta días, principalmente porque se necesita mucho tiempo para que la cadena se oriente y para que las moléculas se acomoden en la superficie.

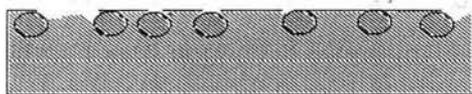


Figura 1.13. Moléculas polares en solución. Se orientan en la superficie y en la interfase para minimizar la energía interfacial total del sistema.

I.3. Definición de la tensión superficial

El objetivo de la ciencia de superficies e interfases es la descripción de los fenómenos interfaciales sobre la base de la estructura y las interacciones moleculares. En años recientes se ha realizado un espectacular avance en el entendimiento de las superficies e interfase fluidas, tanto desde un punto de vista estructural como de su comportamiento dinámico. Fenómenos como la adhesión, ó el mojado o la relación entre la estructura química y la actividad superficial, han sido estudiados durante años y lo son en la actualidad, como problemas de una amplia repercusión industrial y tecnológica. Desde el punto de vista experimental se han desarrollado una gran cantidad de técnicas experimentales que permiten abordar distintos aspectos de las superficies e interfases. Un estudio termodinámico de una superficie, interfase o monocapa, pasa por la determinación de la tensión superficial en función de la concentración (superficial o de volumen), la temperatura y, en algunos casos, la presión.

Una molécula en el interior de un líquido está sometida a la acción de fuerzas atractivas de cohesión (fuerzas débiles de van der Waals) en todas las direcciones, siendo la resultante de todas ellas una fuerza nula. Si la molécula está situada en la superficie del líquido, está sometida a la acción de fuerzas de cohesión que no están balanceadas cuya resultante es una fuerza perpendicular a la superficie dirigida hacia el interior del líquido. Por lo tanto, las moléculas de la superficie tienen más energía que las moléculas interiores y tienden a irse al seno del líquido; logrando que la superficie se contraiga o se reduzca formando una tensión en la superficie y ocupe el área más pequeña. Así, es necesario consumir cierto trabajo para mover las moléculas hacia la superficie venciendo la resistencia de éstas fuerzas. La tensión superficial se define como el trabajo que debe realizarse para llevar moléculas en número suficiente desde el bulto hasta la superficie para crear una nueva superficie (<http://depa.pquim.unam.mx/~tunda/gralitensoactivos.html>). Para dos líquidos inmiscibles, se aplica una situación similar, excepto que en ellos no es obvio tener una interfase curva. Un desequilibrio de fuerzas intermoleculares resulta en una tensión interfacial, y la interfase adopta una configuración que minimiza la energía libre interfacial.

Termodinámicamente, la tensión superficial tiene unidades de energía por unidad de área; esto indica que el área expandida de la superficie requieren una energía para incrementar el área superficial isotérmicamente en un metro cuadrado. Físicamente, la tensión superficial se conoce como la suma de las fuerzas de contracción que actúan paralelamente a la superficie o interfase. Esto último define a la tensión superficial o tensión interfacial (γ), como la fuerza de contracción por unidad de longitud (l) alrededor de la superficie.

Existen varios métodos experimentales para determinar la tensión superficial o interfacial. Algunos métodos son el del anillo de Du Nouy, el de plato de Wilhelmy, el de peso o volumen de la gota, el de gota pendiente y el de presión máxima de burbuja. En todos los casos, cuando la solución es de un sistema binario, se observan cambios apreciables en función del tiempo en la superficie o interfase.

I.4. Ecuación de Laplace y Young

Para un sistema de dos fases, líquido (β) y vapor (α), que se encuentran en equilibrio, las dos fases se conservan homogéneas en el conjunto de las propiedades (U , S , V , n , etc.) de las fases involucradas; (β) y (α) no cambian hasta el momento en que se encuentran con una superficie de separación o interfase. Puesto que la región interfacial de una interfase no tiene límites definidos, es conveniente definir una superficie de separación arbitraria, como se muestra en la Figura 1.14 (http://index_surf_chem.html). El espesor de la interfase abarca unas cuantas moléculas, es una zona de transición y no es homogénea; en esta región la concentración varía desde aquella que corresponde a la fase líquida hasta la que caracteriza a la fase vapor. En la Figura 1.14 el recorrido empieza en el cero del eje z , la concentración de la fase líquida está comprendida entre cero y z , el perfil de concentraciones de la interfase entre z_1 y z_2 , y la concentración de la fase vapor está comprendida desde z_2 en adelante (Souchay, 1972).

Por otra parte, manejando las propiedades extensivas para las fases (β) y (α) como (G , U , S , n , etc.) correspondientes al seno de las fases, éstas permanecen uniformes mientras no se llegue a la superficie de separación (Aveyar y Hayden, 1972; Tovar, 1987), pero considerando al sistema como un todo, los valores de estas propiedades difieren por un

exceso, debido a la región superficial, por tal razón se puede escribir las siguientes relaciones:

$$V = V^\beta + V^\alpha \tag{I.36}$$

$$U = U^\beta + U^\alpha + U^\delta \tag{I.37}$$

$$S = S^\beta + S^\alpha + S^\delta \tag{I.38}$$

$$n_i = n_i^\beta + n_i^\alpha + n_i^\delta \tag{I.39}$$

Donde V representa el volumen, U representa a la energía interna, S a la entropía y n es el número de moles; el subíndice i se refiere al iésimo componente que participa en el sistema. Los superíndices β , α , y δ representan a la fase líquida, la fase vapor y a la superficie, respectivamente.

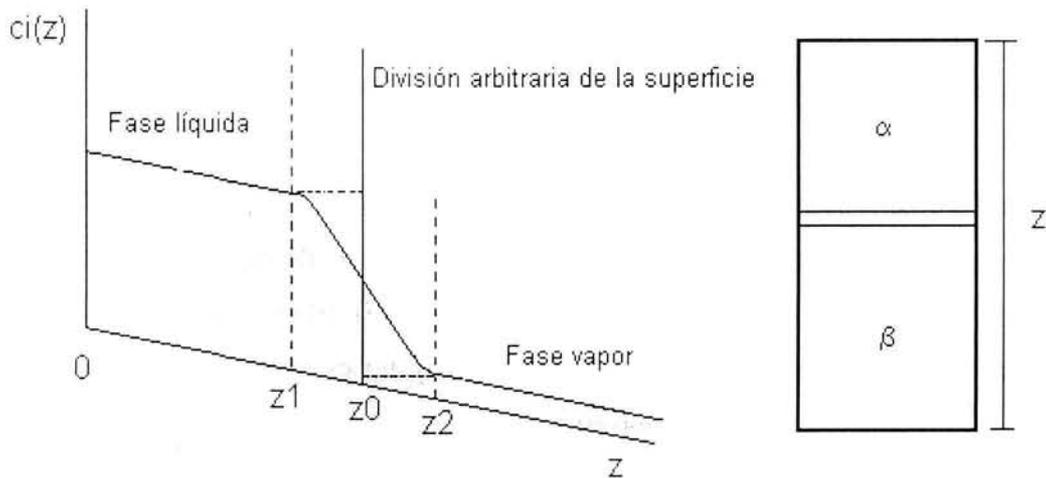


Figura 1.14. Variación de la concentración del componente i con la coordenada z.

Considerando a la superficie fija, con fronteras definidas, como se muestra en la Figura 1.14 y volumen constante. Para un grupo de variaciones sujetas al equilibrio, se tiene que:

$$dU^\delta + dU^\beta + dU^\alpha = 0 \tag{I.40}$$

$$dS^\delta + dS^\beta + dS^\alpha = 0 \tag{I.41}$$

$$dn_i^\delta + dn_i^\beta + dn_i^\alpha = 0 \tag{I.42}$$

Ahora bien, considerando una expresión completa de la energía superficial, es necesario incluir todos los términos que contribuyen en este aspecto y para ello es importante introducir las variaciones de área, dA , y las variaciones en la forma de la superficie, mediante la variación en sus curvaturas, principalmente dc_1 y dc_2 , ya que se ha considerado hasta el momento la superficie, δ , fija y con fronteras definidas. Así la expresión de energía completa es:

$$dU = TdS + \sum_i \mu_i dn_i - P^\beta dV^\beta - P^\alpha dV^\alpha + \gamma dA + C_1 dc_1 + C_2 dc_2 \quad (\text{I.43})$$

En la ecuación (I.43) se tiene que la cantidad μ_i es el potencial químico del componente i ; T es la temperatura; P es la presión; V es el volumen; C_1 y C_2 son constantes y c_1 y c_2 indican las curvaturas, recíprocos de los radios de curvaturas, (Adamson, 1967). Los dos últimos términos de la ecuación (I.43) pueden escribirse como $\frac{1}{2}(C_1 + C_2)d(c_1 + c_2) + \frac{1}{2}(C_1 - C_2)d(c_1 - c_2)$. Este término junto con la cantidad dA , dan el efecto de variación en el área y curvatura de la superficie, puesto que el efecto deberá ser independiente del cambio de localización elegida para una superficie de separación.

Se puede imponer una condición sobre las constantes C_1 y C_2 de manera que $C_1 = -C_2$. Esta condición particular de la superficie de separación es llamada la superficie de tensión.

Para el caso donde la curvatura es pequeña, comparada con el espesor de la región superficial, se tiene que $d(c_1 - c_2) = 0$ (tal es el caso de una superficie plana o superficie esférica), por tanto la ecuación (I.43) se reduce a:

$$dU = TdS + \sum_i \mu_i dn_i - P^\beta dV^\beta - P^\alpha dV^\alpha + \gamma dA \quad (\text{I.44})$$

Dado que:

$$G = U - TS + P^\beta V^\beta + P^\alpha V^\alpha \quad (\text{I.45})$$

donde G es la energía libre de Gibbs, por lo que, diferenciando la ecuación (I.45), tenemos:

$$dG = -SdT + \sum_i \mu_i dn_i + V^\beta dP^\beta + V^\alpha dP^\alpha + \gamma dA \quad (\text{I.46})$$

La ecuación (I.46) tiene una similitud con la ecuación (I.44). Termodinámicamente, en el equilibrio la energía debe tender a un mínimo, porque para valores constantes de S y n_i , a una temperatura dada, se tiene que:

$$-P^\beta dV^\beta - P^\alpha dV^\alpha + \gamma dA = 0 \quad (\text{I.47})$$

Considerando que no hay cambio de volumen total en el sistema:

$$dV = 0 = dV^\beta + dV^\alpha \quad (\text{I.48})$$

La ecuación (I.48) es una condición del trabajo realizado, ya que no hay cambio en el volumen total de la muestra. Así, de la ecuación (I.48) se tiene que $-dV^\beta = dV^\alpha$, por tanto la ecuación (I.47) se puede escribir como:

$$(P^\beta - P^\alpha)dV^\beta = \gamma dA \quad (\text{I.49})$$

La ecuación (I.49) es la que se aplicará para el caso de dos fases en una membrana sin rigidez y con una tensión uniforme en todas direcciones, por lo que Gibbs asigna a γ la nominación de “tensión superficial” (Adamson, 1967).

Si la región superficie es desplazada por una distancia normal dt se tiene que:

$$dA = (c_1 + c_2)Adt \quad (\text{I.50})$$

donde A es el área de la región superficial, y dado que

$$dV^\beta = Adt = -dV^\alpha \quad (\text{I.51})$$

Por lo que de las ecuaciones (I.49) y (I.50) resulta lo siguiente:

$$(P^\beta - P^\alpha)Adt = \gamma(c_1 + c_2)Adt \quad (I.52)$$

bien:

$$\Delta P = \gamma(c_1 + c_2) \quad (I.53)$$

La ecuación (I.53) representa a la ecuación fundamental de Young y Laplace para fenómenos de capilaridad, donde la curvatura máxima es:

$c_i = \frac{1}{R_i}$; R_i representa el radio máximo de curvatura. Entonces la ecuación (I.53) puede quedar de igual forma definida como:

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (I.54)$$

Para superficies planas $R_1 = R_2 = R$, entonces la ecuación (I.54) se reduce a:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (I.55)$$

I.5. Ecuación de Gibbs

La ecuación de adsorción de Gibbs, en su forma general esta dada por (Gibbs, 1928):

$$d\gamma = -\sum \Gamma_i d\mu_i \quad (I.56)$$

donde $d\gamma$ es el cambio en la tensión superficial del disolvente, Γ_i es la concentración de exceso superficial para cualquier componente del sistema y $d\mu_i$ es el cambio del potencial químico de cualquier componente del sistema (Rosen, 1978).

Si se consideran dos componentes formando el sistema (soluto 1 y disolvente 2) y a una temperatura constante, la ecuación (I.56) se reduce a:

$$d\gamma = -\Gamma_1 d\mu_1 - \Gamma_2 d\mu_2 \quad (I.57)$$

Puesto que Γ_1 y Γ_2 se definen mediante un cambio arbitrario de la superficie de separación, es posible elegir la superficie de manera que $\Gamma_1 = 0$; ésto es, una zona tal donde la concentración en exceso de la superficie sea cero con respecto al seno del líquido (Adamson, 1967).

Donde $\Gamma_2^{(1)}$ es la concentración superficial en exceso, bajo esta condición, de la ecuación (I.57) se tiene entonces que:

$$\Gamma_2^{(1)} = - \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \mu_2} \right)_T \quad (I.58)$$

o

$$\Gamma_2^{(1)} = - \left(\frac{a}{RT} \right) \left(\frac{d\gamma}{da} \right) \quad (I.59)$$

donde "a" representa la actividad del soluto y el superíndice 1 sobre Γ significa que el plano de separación superficial fue cambiado de manera que $\Gamma_1^{(1)} = 0$. Si $d\gamma/da$ es negativo, entonces $\Gamma_2^{(1)}$ es positivo, por lo tanto hay un exceso de soluto en la interfase. Esta es la situación común que se presenta con las substancias de superficie activa. Si se acumulan en la interfase, disminuyen la tensión superficial.

En el equilibrio, los potenciales químicos del soluto en el seno del líquido y en la fase superficial son iguales:

$$\mu_2 = \mu_2^\delta \quad (I.60)$$

Para una solución

$$\mu_2 = \mu_2^0 + RT \ln a_2 \quad (I.61)$$

donde a_2 es la actividad del soluto.

En la ecuación (I.57), con $\Gamma_2^{(1)}$ la concentración superficial en exceso, se puede describir como:

$$d\gamma = -\Gamma_2^{(1)} d\mu_2 \quad (I.62)$$

De (I.62) y (I.61) se tiene:

$$\Gamma_2^{(1)} = - \frac{1}{RT} \left[\frac{\partial \gamma}{\partial \ln a_2} \right]_{T,P} \quad (I.63)$$

o

$$\Gamma_2^{(1)} = - \frac{a_2}{RT} \left[\frac{\partial \gamma}{\partial a_2} \right]_{T,P} \approx - \frac{C_2}{RT} \left[\frac{\partial \gamma}{\partial C_2} \right]_{T,P} \quad (I.64)$$

donde la ecuación (I.64) se conoce como la isoterma de adsorción de Gibbs. De aquí se puede observar que un soluto que disminuye la tensión superficial (superficialmente activa), se encuentra en exceso en la superficie; ésto es, $\Gamma > 0$, mientras que un soluto que eleva la tensión superficial es menos abundante en la superficie que en el seno de la solución $\Gamma < 0$ (Rosen, 1978).

I.6. Dependencia de la tensión superficial con la temperatura

En el presente trabajo se realizaron mediciones de tensión superficial a distintas temperaturas. Es de mucha importancia conocer la dependencia de esta propiedad cuando existe cambio en la temperatura, para lo cual se considera un sistema hipotético, que consiste de un recipiente, el cual se encuentra lleno con un líquido con una cubierta deslizable; el material de la cubierta es tal que la tensión superficial entre ésta y el líquido es cero. Si la cubierta se desliza una cierta superficie dA , el trabajo requerido para ésto es γdA . Este trabajo es reversible a temperatura y presión constante y está dado por el incremento en la energía libre del sistema, donde se puede relacionar de la siguiente manera:

$$dG = \gamma dA \quad (I.65)$$

Considerando una energía libre total, es necesario reafirmar que se trata de la energía libre molar (o potencial químico) por el número total de moles del líquido. Esta ecuación puede quedar finalmente como:

$$G^\delta = \gamma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,P,n} \quad (I.66)$$

donde G^δ representa esa energía libre total.

Por otro lado, como se está considerando un proceso reversible, se puede asociar la entropía superficial a este fenómeno, para lo cual se tiene que (Smith et al., 1997):

$$dq = TdS = TS^\delta dA \quad (I.67)$$

donde S^δ es la entropía superficial por unidad de superficie.

De la relación de Maxwell (Smith et al., 1997), se puede escribir:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -S \quad (I.68)$$

Relacionando esta ecuación con la superficie se tiene:

$$\left(\frac{\partial G^\delta}{\partial T} \right)_p = -S^\delta \quad (I.69)$$

Comparando esta ecuación con la ecuación (I.65) se tiene:

$$\left(\frac{d\gamma}{dT} \right)_p = -S^\delta \quad (I.70)$$

Recurriendo a la relación de entalpía (Smith et al., 1997), y relacionándola a la superficie se tiene:

$$H^\delta = G^\delta + TS^\delta \quad (I.71)$$

Con frecuencia se puede hacer una muy buena aproximación de la entalpía superficial, H^δ , y la energía superficial, U^δ . Así la ecuación (I.70) se puede escribir como:

$$U^\delta = G^\delta + TS^\delta \quad (1.72)$$

o bien relacionando esta ecuación con la ecuación (I.66) y (I.70) se obtiene:

$$U^\delta = \gamma - T \frac{d\gamma}{dT} \quad (1.73)$$

donde U^δ es la energía superficial total y es generalmente más grande que la energía libre superficial G^δ , y brinda más información que la anterior, para comprender modelos moleculares.

I.7. Ecuaciones de estado superficiales

El tratamiento teórico de la tensión superficial de sistemas binarios no es aún completo en el momento actual. Cuando los componentes del sistema binario son no polares, ha sido posible obtener valores calculados de la tensión superficial a partir de valores experimentales de los componentes puros, suponiendo que tanto las fases de bulto líquida y vapor así como la interfase de los componentes y del sistema binario se comportan de acuerdo a una solución regular. Para el sistema donde uno de los componentes posee un momento dipolar permanente, ha sido común emplear métodos empíricos o semiempíricos para describir la tensión superficial. Por otra parte, considerando que la isoterma de adsorción es la forma en que los desarrollos teóricos de las interfases se llevan a cabo (Adamson, 1967), se incluye una breve revisión de algunas teorías a continuación. Las teorías de adsorción consideran una gran variedad de aproximaciones, ya que los sistemas estudiados son muy diferentes entre sí, algunos de estos desarrollos incluyen la mecánica estadística de Fowler y Guggenheim (1952), Englert y Prigogine (1958) y Eckert y Prausnitz (1964), los métodos fenomenológicos de la termodinámica revisados por Erikson (1965) y un gran número de métodos semiempíricos que toman en cuenta a las isotermas de adsorción de Freundlich (1922), Langmuir (1917), etc.

En general, la mejor concordancia entre el cálculo y el experimento para la tensión superficial se obtiene por medio del modelo de soluciones regulares (i.e. para sistema con moléculas no polares); es decir, para sistemas en los cuales la tensión superficial de los

componentes puros es similar y la adsorción de cada una de las interfases pueda ser comparable (Hildebrand y Scott, 1964). Getzen (1971) propone un método de cálculo el cual es bueno para sistemas que exhiben comportamiento no ideal en la región superficial, y ha determinado el coeficiente de actividad superficial para la constante de adsorción bulbo-superficie y las áreas parciales molares.

Puesto que no existe aún una teoría completamente satisfactoria para la interfase líquido-vapor de mezclas, los métodos semiempíricos continúan siendo utilizados ampliamente. A este respecto, la ecuación de estado propuesta por Langmuir (1917), ha sido utilizada en este trabajo con la finalidad de analizar los resultados experimentales de la tensión superficial de equilibrio de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 MDEA/DEA (45 % masa total de aminas y 55 % masa de agua), a varias concentraciones de tensoactivo, a 313.15 y 323.15 K, respectivamente, cuyos parámetros de ajuste fueron empleados para derivar el coeficiente de difusión de ambos tensoactivos.

Modelo

La bien conocida isoterma de Langmuir (1917), que representa isotermas del tipo I (ver Figura 1.15), fue modificada con la finalidad de incluir no sólo la adsorción límite identificada por monocapas moleculares adsorbidas en la interfase, sino también la formación de multicapas moleculares. Fue así que se propuso una ecuación con mejores características para interpretar las isotermas de adsorción por Brunauer, Emmett y Teller, mejor conocida como ecuación BET, (1938), ya que considera la adsorción de multicapas moleculares (aproximadamente 100 Å de profundidad), es decir, es una extensión del modelo de Langmuir para la adsorción de gases (Gracia-Fadrique, 1999).

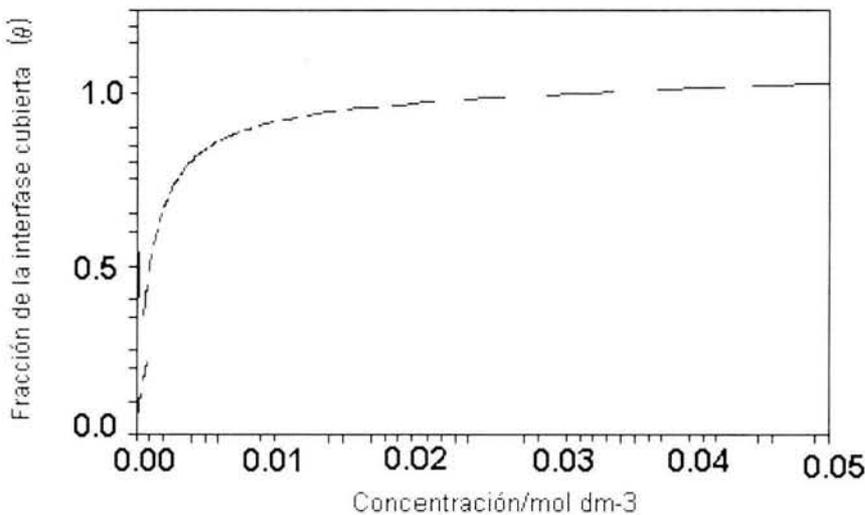


Figura 1.15. Figura esquemática de la isoterma de Langmuir

La ecuación de Langmuir puede expresarse de la manera siguiente (Langmuir, 1917):

$$\theta = \frac{\beta x}{1 + \beta x} \quad (\text{I.74})$$

donde θ es la fracción de la interfase cubierta por el componente con actividad superficial mayor, β es la constante de la Ley de Henry para superficies (i.e. en dos dimensiones) que cuantifica el efecto hidrófobo y x la concentración de bulto.

Por otro lado, la ecuación de BET (1938) no solo representa la forma general de una isoterma, si no también produce valores del calor de adsorción de la primera capa y el volumen del gas para formar monocapas moleculares de los adsorbentes. Esta ecuación se utilizó como un método general para obtener valores de áreas superficiales a partir de datos de adsorción para cualquier sistema con un comportamiento en sus isotermas del tipo II (ver Figura 1.16). La ecuación BET tiene la forma siguiente:

$$\frac{p}{v(p_0 - p)} = \frac{1}{v_m c} + \frac{c-1}{v_m c} \frac{p}{p_0} \quad (\text{I.75})$$

Donde v es el volumen del gas, p es la presión, p_0 es la presión de saturación y c y v_m son constantes. La constante v_m se obtiene de la pendiente y c se obtiene de la intersección

al graficar $\frac{p}{p_0} v(p_0 - p)$ versus $\frac{p}{p_0}$ que muestra una línea recta, cuya intersección es igual a $\frac{1}{v_m c}$ con pendiente igual a $\frac{(c-1)}{v_m c}$. Esta ecuación fue empleada por BET para estudiar la adsorción del nitrógeno a 90.1 K sobre una gran variedad de adsorbentes. Así, en 1999 Gracia-Fadrique modifica la ecuación de BET para utilizarla en la adsorción de líquidos, la cual la expresa como:

$$\theta = \frac{\beta x}{(1-x)(1-x+\beta x)} \quad (I.76)$$

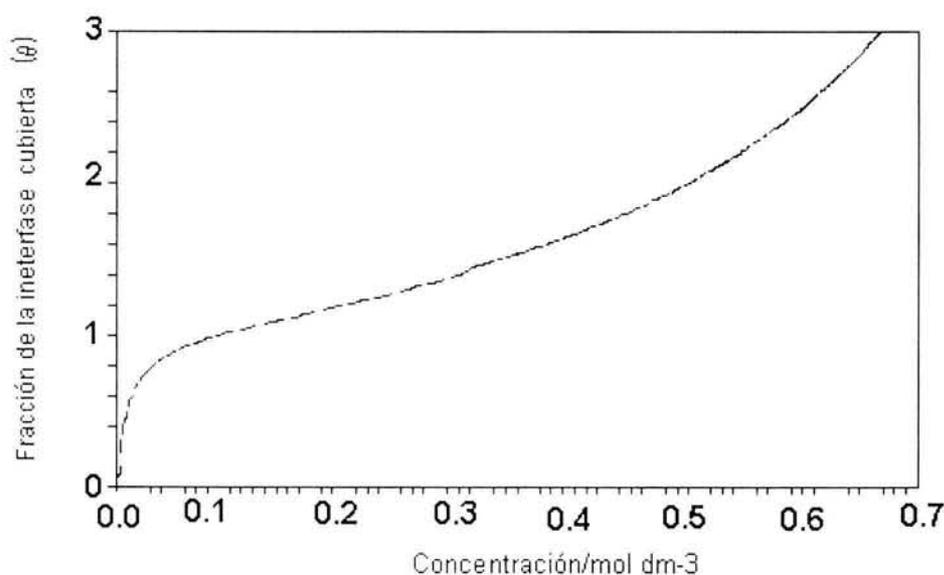


Figura 1.16. Figura esquemática de la isoterma de Brunauer, Emmett y Teller (BET)

Ecuación de estado

Se ha demostrado que el fenómeno de capilaridad (o actividad superficial) está íntimamente relacionado con los diagramas de fases, especialmente a concentración y temperatura cercana a la temperatura crítica (Ross y Townsend, 1981). La actividad superficial se mide cuantitativamente con la concentración superficial de exceso del soluto, el cual, para una solución binaria, está dada por la isoterma de adsorción de Gibbs. Considerando la superficie o isoterma de Gibbs, el exceso superficial del componente i por unidad de área (Γ_s) con respecto del componente j (i.e. $\Gamma_j=0$) en un sistema binario, o en ocasiones también llamado concentración en la superficie o adsorción relativa, está dado por la

siguiente relación, considerando que la actividad del componente i se mide por medio de la concentración:

$$\Gamma_i = - \frac{x_i}{RT} \left(\frac{d\gamma}{dx_i} \right) \quad (I.77)$$

donde γ es la tensión superficial de la mezcla a una concentración dada, R es la constante universal de los gases y T es la temperatura.

El interés en el tema de las ecuaciones de estado de dos dimensiones está relacionado con la adsorción de películas en la superficie de sólidos o líquidos, lo que se estudia por medio de la disminución de la tensión superficial del adsorbente, por lo que es común emplear como variable a la presión superficial ($\pi = \gamma_0 - \gamma$), donde γ_0 es la tensión superficial del adsorbente y γ es la tensión superficial de la mezcla de concentración conocida, por lo que en la ecuación de la isoterma de Gibbs se tiene ahora que la adsorción de exceso o relativa es:

$$\Gamma_i = \frac{x_i}{RT} \left(\frac{d\pi}{dx_i} \right) \quad (I.78)$$

Ya que $-d\gamma = d\pi = \Gamma_i RT d \ln x$. Esto indica claramente que la ecuación de Gibbs proporciona una conexión entre las isotermas de adsorción y las ecuaciones de estado de dos dimensiones.

Puesto que θ en la ecuación (I.74) es la fracción de la interfase cubierta por el componente con actividad superficial mayor (i), se puede entonces derivar un valor de θ a partir del cociente de la cantidad de materia (moles) del componente con actividad superficial mayor en la interfase y de la cantidad total de materia (moles) que se encuentran en la interfase o bien por medio del cociente de la adsorción relativa Γ_i y la adsorción de saturación Γ_s , como sigue:

$$\theta = \frac{\Gamma_i}{\Gamma_s} \quad (I.79)$$

por lo que, igualando la isoterma de adsorción de Langmuir (ecuación I.74) con la isoterma de adsorción de Gibbs (ecuación I.78), se tiene (Gracia-Fadrique, 1999):

$$\frac{\beta x}{1 + \beta x} = \frac{x}{\Gamma_s RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right) \quad (\text{I.80})$$

y para la isoterma de adsorción de BET se tiene (Gracia-Fadrique, 1999):

$$\frac{\beta x}{(1-x)(1-x+\beta x)} = \frac{x}{\Gamma_s RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right) \quad (\text{I.81})$$

Despejando la presión superficial π e integrando (Gracia-Fadrique, 1999), se obtiene la ecuación deseada para el análisis de los datos experimentales de tensión superficial de los sistemas estudiados en este proyecto doctoral, en función de concentración y la temperatura:

$$\pi = \Gamma_s RT \ln[1 + \beta x] \quad (\text{I.82})$$

Aplicando el mismo método descrito a la isoterma de BET, se tiene:

$$\pi = \Gamma_s RT \ln \left[1 + \beta \frac{x}{1-x} \right] \quad (\text{I.83})$$

Aquí concluye el capítulo I, donde se presentaron las bases teóricas referente a la química de superficies y las ecuaciones de estado que se utilizan para correlacionar el comportamiento experimental de la tensión superficial de equilibrio y se describe la información relacionada a la tensión superficial dinámica. Esta última, es importante, ya que tiene una relación directa con la estabilidad de espuma, se puede derivar el modulo de elasticidad de Marangoni y calcular valores del coeficiente de difusión de los tensoactivos estudiados en este trabajo doctoral. Así, en el capítulo II se presenta la ecuación para calcular el coeficiente de difusión.

II.1. Cinética de adsorción superficial.

Desde Dupré y Rayleigh se conoce que la tensión superficial de una superficie recién formada es mayor que la tensión superficial en el equilibrio. Los datos recientes sugieren que soluciones de tensoactivos inician su decaimiento en tensión a tiempo cero con la tensión superficial del disolvente puro, hasta adquirir después, valores de equilibrio (Gracia-Fadrique, 1979). Estos cambios en tensión superficial pueden ocurrir en fracciones de segundo o períodos de días.

Son pocos los resultados en este tema y el fenómeno aún no está bien comprendido. El modelo de mayor aceptación señala que las moléculas en la solución se difunden primero hacia la superficie para después lograr la adsorción una vez vencida la barrera energética necesaria para anclarse en la interfase (ver Figura 2.1 propuesta por Borwankar y Wasan, 1983). En analogía a los procesos catalíticos se postula que el proceso de baja velocidad dominará el efecto cinético global.

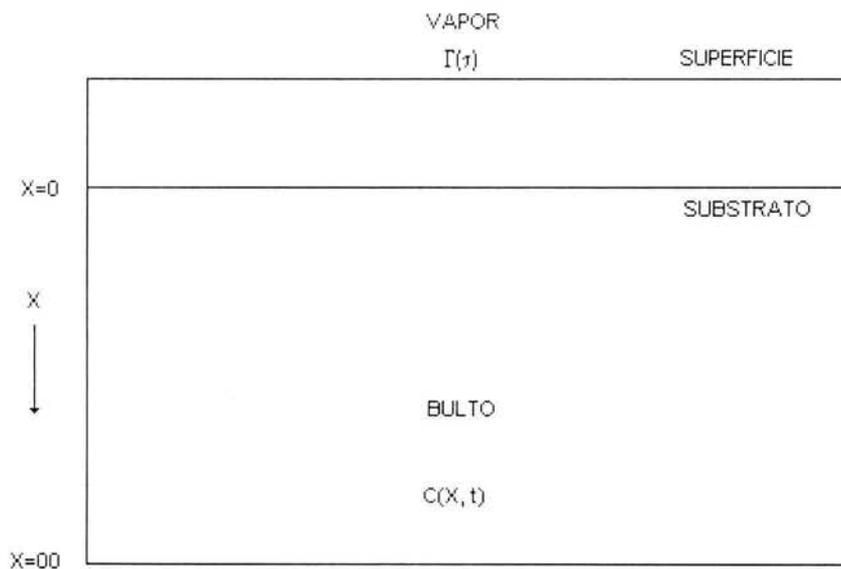


Figura 2.1. Diagrama esquemático del sistema difusivo

La prueba de la hipótesis para el caso difusional propuesta por Ward y Tordai (1946) ha confirmado ser el caso de algunos sistemas. El modelo propone que la difusión desde el

bulto al sustrato (capa adyacente a la superficie) se puede representar por la segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (\text{II.1})$$

donde la posición “z” es la distancia normal a la superficie y D el coeficiente de difusión del soluto en el disolvente y t el tiempo.

Las condiciones iniciales son:

$$C = C_{eq} \quad t = 0, z > 0 \quad (\text{II.2})$$

$$C = C_s \quad t = 0, z = 0 \quad (\text{II.3})$$

C_{eq} es la concentración molar del soluto en el seno de la solución y C_s es la concentración del sustrato.

La segunda condición fue dada por Tsonopoulos et al. (1971). Ward y Tordai consideran para esta segunda condición que:

$$C = 0 \quad t = 0, z = 0 \quad (\text{II.4})$$

lo que significa que la superficie se encuentra limpia en el momento instantáneo de su formación.

Las condiciones a la frontera para el proceso son:

$$C = C_s(t) \quad z = 0 \quad \forall t \quad (\text{II.5})$$

$$C = C_{eq} \quad ; \quad Z \rightarrow 0 \quad \forall t \quad (\text{II.6})$$

Indicando que la concentración en el sustrato es una función del tiempo y la concentración en el seno de la solución se mantiene constante.

La solución de la ecuación (II.1), expresada en términos de la adsorción y con las condiciones señaladas, es:

$$\Gamma - \Gamma^0_{t=0} = 2 \left(\frac{D_{12}t}{\Pi} \right)^{1/2} \left[c_{eq} t^{1/2} - \int_0^{t/2} c_s(\tau) d(t-\tau)^{1/2} \right] \quad (II.7)$$

donde τ es todo tiempo menor o igual a t y Π es igual a 3.1416.

Para el caso de envejecimiento lento se establece que:

$$\Gamma^0 = 0, \quad t=0 \quad (II.8)$$

y la expresión (II.7) se reduce al modelo de Ward y Tordai (1946), superficie limpia a un tiempo cero. Esto significa que la gota no está contaminada con el tensoactivo por lo que a este tiempo la tensión superficial es la del agua o de la mezcla de aminas que se estén estudiando.

La comprobación experimental del modelo difusivo necesita una solución de concentración uniforme, donde al instante se debe producir una superficie solución/aire-vapor saturado. En este instante la concentración del soluto en la superficie, es igual a la concentración del bulto. Las moléculas en la solución se desplazan en todas direcciones, pero el flujo resultante se dará en dirección a la superficie, bajo la condición de que el soluto presente valores positivos para la adsorción.

Al principio, la superficie se encuentra prácticamente limpia en su totalidad de moléculas de soluto, de tal manera que una molécula de soluto que llega a la superficie encontrará, al inicio del fenómeno, una gran cantidad de espacios vacíos para efectuar la adsorción (Gracia-Fadrique, 1979).

La hipótesis es que la difusión es el mecanismo limitante en la cinética de adsorción superficial. Esta proposición incluye la información de la inexistencia de una barrera energética a la adsorción, o que las moléculas localizadas en el sustrato no encuentran resistencia, o casi nula, en comparación con la difusión, para pasar del sustrato a la

superficie donde se adsorben. Si esto sucede así, tanto la superficie como el sustrato prácticamente están en equilibrio para cualquier tiempo (Gracia-Fadrique, 1979).

El término que contiene la integral en la ecuación (II.7), fue introducido por Ward y Tordai para considerar la posibilidad de difusión desde el sustrato al seno del líquido o contra difusión.

Ward y Tordai demostraron que si los tiempos son pequeños y la concentración del sustrato se omite, entonces la concentración superficial Γ (moles/cm²) a un tiempo t , la ecuación (II.7) se reduce a:

$$\Gamma = 2c_{eq} \left(\frac{D_{12}t}{\Pi} \right)^{1/2} \quad (II.9)$$

donde Γ seguirá un comportamiento lineal con respecto a la raíz cuadrada del tiempo.

Una manera de corroborar que la contradifusión no está presente en el proceso de adsorción, es sacar el cociente entre el valor del coeficiente de difusión determinado con un método directo, por ejemplo, dispersión de luz dinámica (D) y el obtenido con valores de tensión superficial dinámica (D_{12}), o sea, $D/D_{12} \approx 1$. Esto indica que la adsorción, del soluto-disolvente en la interfase está libre de barreras energéticas y que el proceso está controlado por la difusión (Rulison y Lochhead, 1995).

Con las ecuaciones (II.7) y (II.9) se puede calcular Γ conociendo D_{12} o viceversa. La ecuación (II.7) no se puede resolver explícitamente porque el término bajo la integral debe resolverse gráfica o numéricamente, en donde τ representa el tiempo fijado para calcular la adsorción o el coeficiente de difusión en un cierto intervalo (Gracia-Fadrique, 1979).

La condición más importante que propone el modelo de difusión controlante, es que deba existir un equilibrio instantáneo entre superficie y sustrato, el cual ayuda a calcular la concentración del sustrato " C_s " en cualquier tiempo mediante la isoterma de adsorción de Gibbs. Así, midiendo la tensión superficial a diferentes tiempos, desde su formación hasta el momento que la difusión cese, se obtienen los valores correspondientes al equilibrio en

una concentración conocida. Para diferentes concentraciones de un mismo soluto y conociendo los valores de tensión superficial en el equilibrio, se puede calcular la pendiente y calcular la adsorción. La relación entre tensión superficial dinámica y la concentración en el sustrato para el fenómeno dinámico, se puede estimar a partir de los valores en equilibrio (Gracia-Fadrique, 1979).

Si el coeficiente de difusión calculado con el modelo de Ward y Tordai, resulta cercano o igual al coeficiente de difusión convencional (determinado con un método directo), el modelo es satisfactorio. Si el coeficiente de difusión es muy pequeño comparado con el valor convencional, entonces quedará eliminado el mecanismo difusivo, por lo que entonces, el proceso estará controlado por una barrera energética (Gracia-Fadrique, 1979).

Desde hace dos décadas se han desarrollado aspectos importantes del estudio teórico y experimental del fenómeno de la cinética de adsorción de tensoactivos en la interfase líquida (Kretzschmar y Miller, 1991; Miller y Kretzschmar, 1991; Fainerman, 1984). El alma del método teórico para analizar procesos no estacionarios sobre superficies recién formadas (tanto superficies deformadas y no deformadas) es la ecuación clásica de Ward y Tordai (1946), la cual, para el caso general, sólo sigue una solución numérica. Joos y colaboradores (van den Bogaert y Joos, 1979; Rillaerts y Joos, 1982) fueron los primeros en resolver una solución asintótica, derivada por Hansen (1964) de la ecuación de Ward y Tordai para la región de tiempos largos.

La ecuación asintótica de Joos y Hansen da una buena descripción de los resultados experimentales de varios tensoactivos (van Hunsel y Joos, 1987; van Hunsel y Joos, 1989). A continuación, se presentan las soluciones asintóticas para el caso de la adsorción de tensoactivos en superficies recién formadas, las cuales nos ayudan a calcular el coeficiente de difusión, tanto para tiempos largos ($t \rightarrow \infty$) como para tiempos cortos ($t \rightarrow 0$).

II.2. Solución asintótica cuando $t \rightarrow 0$.

De la ecuación (II.7), se puede omitir la segunda parte de la ecuación (contradifusión); esto es posible porque el mecanismo de transferencia de masa está controlado por la difusión, por lo que tenemos la expresión (II.9):

$$\Gamma = 2C_{eq} \left(\frac{D_{12}t}{\Pi} \right)^{1/2} \quad (\text{II.10})$$

Para el caso de una capa superficial ideal, la tensión superficial de la solución cuando $\gamma \rightarrow \gamma_0$ (donde γ_0 es la tensión superficial del disolvente), se puede describir mediante la siguiente expresión.

$$\gamma = \gamma_0 - RT\Gamma_t \quad (\text{II.11})$$

La ecuación (II.11) se obtiene de la isoterma de Gibbs expresando la adsorción de exceso o relativa de la siguiente forma:

$$\Gamma_i = \frac{x_i}{RT} \left(\frac{d\pi}{dx_i} \right) \quad (\text{II.12})$$

Cuando se grafica la presión superficial en función del logaritmo de la concentración se tiene un comportamiento lineal, esto significa que su comportamiento es el de un gas ideal; entonces, la presión superficial es igual a $\pi = mx_i$, donde m es la pendiente de la regresión lineal, por lo tanto la ecuación (II.12) se convierte en:

$$\Gamma_i = \frac{x_i}{RT} m = \frac{\pi}{RT} = \frac{1}{a} \quad (\text{II.13})$$

donde a es el área superficial.

Sustituyendo la ecuación (II.9) en la ecuación (II.11), se tiene:

$$\gamma_{t \rightarrow 0} = \gamma_0 - 2RTC_{eq} \left(\frac{D_{12}t}{\Pi} \right)^{1/2} \quad (\text{II.14})$$

Derivando la ecuación (II.14) con respecto a $t^{1/2}$, esta ecuación será:

$$\left(\frac{d\gamma}{dt^{1/2}} \right)_{t \rightarrow 0} = -2RTC_{eq} \left(\frac{D_{12}}{\Pi} \right)^{1/2} \quad (\text{II.15})$$

Así, para el mecanismo de adsorción que está controlado por la difusión sobre una superficie limpia, los valores experimentales de tensión superficial de la solución tienen una dependencia lineal sobre $t^{1/2}$. En consecuencia, por medio de la ecuación (II.15) es posible obtener valores del coeficiente de difusión (Fainerman et al., 1994).

Otra ecuación asintótica (tiempos cortos) que se empleó en este trabajo es la que proponen Joos y Rillaerts (1981). En condiciones dinámicas, $\pi = \gamma_0 - \gamma$, y dado que $\pi A = RT$, donde $A = 1/\Gamma$, se tiene:

$$\Gamma_t = \frac{\pi}{RT} \quad (\text{II.16})$$

Sustituyendo la ecuación (II.16) en la ecuación (II.9), se obtiene:

$$\pi = 2RTC_{eq} \left(\frac{D_{12}t}{\Pi} \right)^{1/2} \quad (\text{II.17})$$

Graficando la presión superficial en función de la concentración de bulo por la raíz cuadrada del tiempo ($C \times t^{1/2}$), se obtiene una línea recta cuya pendiente es:

$$\frac{d\pi}{dt^{1/2} C_{eq}} = 2RT \left(\frac{D_{12}}{\Pi} \right)^{1/2} \quad (\text{II.18})$$

II.3. Solución asintótica cuando $t \rightarrow \infty$

Como $t \rightarrow \infty$, en este caso $C_s \rightarrow C$, se tiene:

$$\Delta C_{t \rightarrow \infty} = \Delta C^s = C - C_s = \Gamma_t \left(\frac{\Pi}{2D_{12}t} \right)^{1/2} \quad (\text{II.19})$$

Si el proceso de adsorción está controlado por la difusión, este cambio en la concentración del sustrato ΔC^s corresponde a un cambio en la tensión superficial (Joos et al., 1991).

$$\gamma - \gamma_e = \frac{d\gamma}{dC} \Delta C^s \quad (\text{II.20})$$

donde $\Delta C^s = C - C_s$

Como $\Delta C \rightarrow 0$, se puede usar la ecuación de Gibbs, la cual es comúnmente usada para tensoactivos no iónicos (Rosen, 1978).

$$d\gamma = -RT\Gamma d \ln C = -RT\Gamma \frac{1}{C} dC \quad (\text{II.21})$$

y

$$\frac{d\gamma}{dC} = - \frac{RT\Gamma}{C} \quad (\text{II.22})$$

Por lo tanto, sustituyendo las ecuaciones (II.19) y (II.22) en la ecuación (II.20) se tiene:

$$\gamma = \gamma_e + \frac{RT\Gamma^2}{2C_{eq}} \left(\frac{\Pi}{D_{12}t} \right)^{1/2} \quad (\text{II.23})$$

donde γ es la tensión superficial dinámica, γ_e es la tensión superficial de equilibrio, R es la constante de los gases y T es la temperatura. La ecuación (II.23) se debe escribir de la forma.

$$\left(\frac{d\gamma}{dt^{-1/2}} \right) = \frac{RT\Gamma^2}{2C_{eq}} \left(\frac{\Pi}{D_{12}} \right)^{1/2} \quad (\text{II.24})$$

Esta ecuación indica que los resultados experimentales de tensión superficial dinámica de una solución de tensoactivo no iónico describen una dependencia lineal sobre $t^{-1/2}$. Así, por medio de la ecuación (II.24) es posible obtener valores del coeficiente de difusión (Fainerman et al., 1994).

La expresión que se presenta en la ecuación (II.7), permite calcular el coeficiente de difusión, D_{12} . Un resultado para el alcohol isoamílico en agua, a 293.15 K, obtenido por Ward y Tordai fue de $1.41 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ y el obtenido por Thovert (1914) fue de $7.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ (método directo). El coeficiente de difusión obtenido por Ward y Tordai es 56 veces más pequeño que el de Thovert, por lo que concluyen que el proceso difusivo no es el controlante, sino que es la adsorción la que controla el proceso.

Garfías-Ayala (1964) determinó el coeficiente de difusión empleando la ecuación de Ward y Todai, obteniendo el valor de $8.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ para el n-decanol en agua, a 293.15 K a una concentración de bulto de $6.33 \times 10^{-8} \text{ mol}/\text{cm}^3$. Gracia-Fadrique (1979) también determinó el coeficiente de difusión empleando la ecuación de Ward y Tordai, el valor obtenido fue de $8.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ para el n-decanol en agua, a una concentración de bulto de $6.33 \times 10^{-8} \text{ mol}/\text{cm}^3$ y 293.15 K.

Otra expresión que permite calcular el coeficiente de difusión, D_{12} , es la ecuación (II.9). Un resultado obtenido por Rulison y Lochhead (1995) para el tensoactivo no iónico (C12E4) en ciclohexano/agua, a 293.15 K, fue de $8.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ contra $8.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ (obtenido por dispersión de luz dinámica). El cociente obtenido entre $D_{12}/D_{lit} = 0.97$, quienes concluyen que la cinética de envejecimiento superficial del tensoactivo C12E4 en la interfase ciclohexano/agua está controlado por la difusión.

Las ecuaciones (II.18 y II.24), tiempos cortos y largos, respectivamente, permiten calcular el coeficiente de difusión, D_{12} . Eastoe et al. (1997), muestran resultados para tensoactivos no iónicos del alcohol oleílico etoxilado (CiEj) ($i = 10$ y 12 y $j = 4, 5, 6, 7$ y 8) en agua, a 298.15 K. Por ejemplo, para el CiEj ($i=10$ y $j=4$), a una concentración de $10.0 \times 10^{-6} \text{ mol}/\text{cm}^3$ el coeficiente de difusión fue de $4.59 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. Estos autores proponen que, para determinar el coeficiente de difusión a tiempos cortos se debe hacer lo siguiente: (a) para obtener la pendiente se ajustan los valores de la tensión superficial dinámica en función de $t^{1/2}$ empleando mínimos cuadrados (sólo la parte lineal), cuya intersección es la tensión superficial del agua y (b) sustituyendo el valor de la pendiente, término izquierdo de la ecuación (II.18), despejan y calculan el coeficiente de difusión, D_{12} . El cociente obtenido entre D_{12}/D_{lit} está en el intervalo de 0.8 y 1.2. Estos autores indican que la cinética de

envejecimiento superficial de los tensoactivo CiEj en la interfase está controlado por la difusión. Y para determinar el coeficiente de difusión a tiempos largos, el ajuste se hace entre los valores de tensión superficial dinámica en función de $t^{-1/2}$, cuya intersección es la tensión superficial de equilibrio. El cociente obtenido entre D_{12}/D_{lit} está en el intervalo de 0.30 y 0.002, cuyo error experimental es del 10 % con respecto al valor de la literatura (obtenido por resonancia magnética nuclear).

III.1. Antecedentes

En este capítulo se describen las metodologías para determinar la tensión superficial y la estabilidad de espuma. Los métodos para determinar la tensión superficial presentan validez a partir de la década de los 20s; como es el caso del método de capilaridad propuesto por Sugden (1921).

El método del anillo de Du-Nuoy y la placa de Wilhelmy (Harkins y Jordan 1928), permiten determinaciones rápidas. Miden la fuerza necesaria para desprender el anillo o placa de la superficie del líquido. En modificaciones posteriores hasta llegar a la instrumentación electrónica y a la sofisticación de los materiales sólidos destinados al contacto con el líquido, no se ha logrado rebasar el límite de precisión de 0.1 %. El método de volumen promedio de la gota, considera la fuerza media que una gota requiere para que por su propio peso, se desprenda de un capilar de diámetro conocido.

El método del anillo de Du-Nuoy, la placa de Wilhelmy y del volumen promedio de la gota, requieren de correcciones si se desea obtener valores absolutos; las correcciones son el resultado del análisis dimensional que agrupa algunas de las variables que participan en el fenómeno. El fundamento teórico se reduce a un balance local de fuerza, en la región donde el fluido toca la pared sólida. La teoría en cada caso, no presenta avances importantes y nuevamente, se conserva la suposición de mojado total. Estos sistemas son de tipo dinámico y por tanto demandan cuidados adicionales con relación a la velocidad con que efectúa la determinación ya que las fluctuaciones de tipo cinética ocupan un lugar importante en la suma de fuentes de error. Todo acto de medición implica perturbar el sistema bajo observación; en el caso de los métodos dinámicos la perturbación es significativa tratándose de la obtención de valores de equilibrio, en especial cuando la viscosidad del líquido aumenta con relación a los valores del agua.

El método de capilaridad (Sugden, 1921; Adam, 1941) se desarrolla estáticamente para determinar las propiedades de equilibrio de las superficies. Se basa en la observación del comportamiento del sistema bajo estudio en un tubo capilar. Es una de las técnicas más ampliamente utilizadas, donde se determina la altura alcanzada por el menisco líquido-gas o líquido-líquido o la presión hidrostática dentro de un tubo capilar con respecto al nivel original del sistema que se estudia. Cuando el tubo capilar y el sistema líquido-gas o

líquido-líquido se encuentran dentro de un tubo sellado y resistente a la presión se pueden hacer mediciones cercanas a la temperatura crítica gas-líquido del componente líquido más volátil. Este método no requiere de un elevado costo para construir el equipo necesario (Águila-Hernández et al., 1995; Águila-Hernández y Trejo, 1995). Este método se utilizó en el presente trabajo para determinar experimentalmente la tensión superficial estática del sistema formado por dietanolamina + agua y del alcohol oleílico etoxilado (2OE) + dietanolamina (20 % w y 80 % de agua), a diferentes concentraciones y temperaturas.

El método de gota pendiente (Andreas et al., 1938) resuelve los problemas de desprendimiento de la superficie y en general los efectos de perturbación son mínimos, requiere de pequeños volúmenes de líquido, no depende del ángulo de contacto, es especialmente adecuada para medir el comportamiento dinámico de las superficies, el apoyo de cálculo numérico incrementa su capacidad y las mediciones dimensionales, control de vibración externa y resolución de imagen incrementan la precisión del método (Patterson and Ross, 1979). Para ello, se forma una gota del líquido en la boquilla de un capilar y se registra el perfil, y a partir de las dimensiones de la gota, se estima la tensión superficial o interfacial.

El método de gota pendiente, está fundamentado en el tamaño y forma que adquieren las superficies bajo campos externos. En ausencia de campos externos, especialmente el gravitatorio, todo volumen de líquido minimiza su energía con un mínimo de área y adquiere la forma esférica. En presencia de gravedad las superficies fluidas adquieren formas y curvaturas distintas a la condición esférica. Ya que la diferencia de presión en una superficie con curvatura diferente a cero está asociada a la tensión superficial y a los dos radios principales de curvatura, entonces es factible recurrir a mediciones de curvatura para evaluar la tensión superficial. De esta alternativa se derivan todos los métodos de medición inspirados en el perfil que forma la superficie. En este grupo interviene de manera no rigurosa el método del capilar y el de gota o burbuja estática. El método de gota pendiente es el que más se acerca a los requisitos teóricos de la ecuación de curvatura y dentro de esta familia de métodos, es el que sobresale en precisión y exactitud. Por tal razón, es el que se utiliza en este trabajo para determinar la tensión superficial estática y dinámica de casi todos los sistemas presentados aquí.

La técnica de gota pendiente, originalmente diseñada por Andreas et al. (1938) consiste en el registro fotográfico o proyección ampliada del perfil de una gota de líquido en contacto con su vapor o aire saturado de vapor. Sobre el registro de la imagen se miden los diámetros, uno máximo y otro a una distancia igual desde su ápice; la relación de estos dos diámetros es la de un parámetro original “beta” de la ecuación diferencial de Young-Laplace. El diseño original permitió a los autores reproducir por primera ocasión la tensión superficial dinámica en soluciones acuosas de oleato y estearato de sodio e identificar los valores al equilibrio en tiempos cercanos a los 4000 s.

La medición de la tensión superficial dinámica dependerá de cada sistema bajo estudio (ver Figura 3.1), el cual se debe seleccionar de acuerdo a las necesidades del laboratorio o investigación (www.Kruss.info/Mainframe_e.html; <http://www.firsttenangstroms.com>).

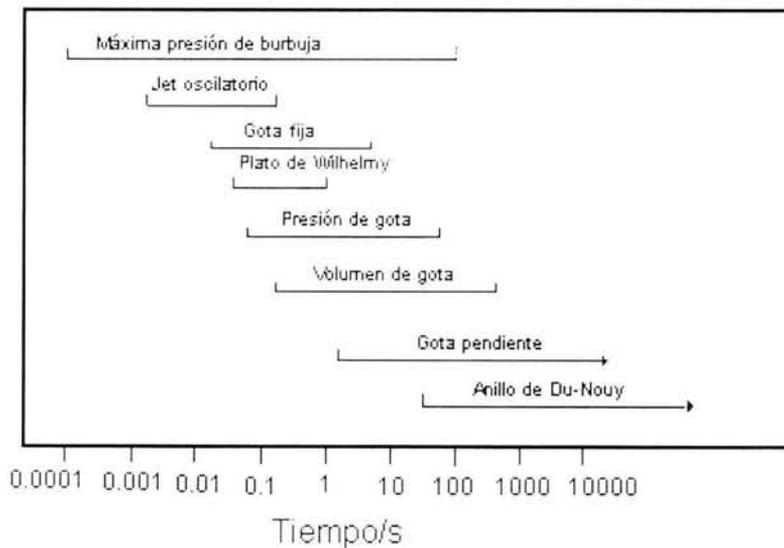


Figura 3.1. Intervalos de tiempo para cada método experimental

III.2. Medición de la tensión superficial empleando el método de elevación capilar

La Figura 3.2 es una vista frontal del tensiómetro capilar, cuyas diversas partes serán descritas a continuación:

Los tubos capilares de sección transversal constante y de dimensiones internas diferentes entre sí son identificados con los números 1, 2 y 3. Los capilares se encuentran posicionados verticalmente y unidos al resto del aparato con tubo de vidrio Pyrex. La muestra líquida que se desee estudiar se almacena inicialmente en el bulbo identificado con el número 4, cuya capacidad es de 6 cm^3 . Para realizar las mediciones de tensión superficial la muestra se transfiere al bulbo identificado con el número 5 y con la ayuda del pistón identificado con el número 6 y de la válvula de teflón número 7 es posible mover el nivel del líquido en los tres tubos capilares para asegurar el mojado del vidrio y establecer la altura adecuada de los meniscos en los tubos capilares. La válvula de teflón identificada con el número 9 y la junta de vidrio esmerilada identificada con el número 8 se utilizan para eliminar el aire que se encuentra en el tensiómetro al colocar la muestra líquida en el bulbo número 4.

Para la determinación de la tensión superficial bajo condiciones cerradas del tensiómetro, para que exista equilibrio entre la muestra líquida y su vapor, es conveniente efectuar el desgasado de la muestra líquida. En este caso particular el desgasado es sumamente importante, ya que cualquier sustancia líquida contiene gases disueltos, como lo es simplemente el aire del medio ambiente, y dado que la tensión superficial es una propiedad de límite de fases, se debe tener cuidado para sólo estudiar a la sustancia líquida de interés. El desgasificado se llevó a cabo por ciclos de congelación, evacuación y fusión, empleando un sistema de vacío que se conecta en la válvula número 7 (Águila-Hernández, 1987, Águila-Hernández y Trejo 2002). Por otra parte, si la determinación de tensión superficial se desea efectuar con el tensiómetro abierto a la atmósfera, para que la muestra líquida esté en contacto con el aire, el procedimiento de desgasado no se lleva a cabo y la sustancia líquida podrá depositarse directamente dentro del tensiómetro.

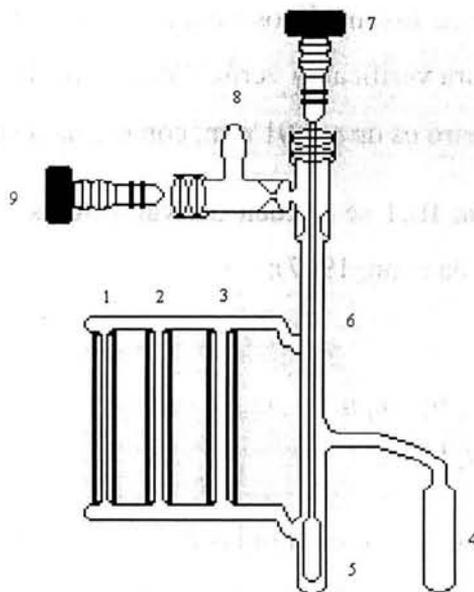


Figura 3.2. Tensiómetro de tubos capilares

De manera paralela a la preparación de la muestra líquida dentro del tensiómetro, se pone a funcionar todo el equipo que constituye el sistema térmico, para fijar la temperatura de medición de la tensión superficial y lograr la estabilidad térmica del tensiómetro y la muestra, antes de iniciar las mediciones de la altura relativa de los meniscos. En cada medición de estas alturas se obtienen tres pares de diferencias de altura de los meniscos, por lo que con sólo tres o cuatro juegos de mediciones se obtienen valores reproducibles y constantes que darán excelentes datos de la tensión superficial, a una temperatura constante dada. Este procedimiento se repite para cada nueva temperatura a la que se desee realizar determinaciones de la tensión superficial. Es importante mencionar que no es necesario cambiar la muestra para realizar mediciones a diferentes temperaturas. Esto significa una gran ventaja en cuanto ahorro de muestra y de tiempo. Por otra parte, para obtener resultados de tensión superficial de gran exactitud, fue necesario implementar un método que asegure que la muestra líquida moje las paredes de los capilares. De aquí que el presente tensiómetro incluya como parte importante un pistón de vidrio adaptado a una válvula roscada. Esto permite que el nivel de la muestra en los capilares pueda moverse hacia arriba o hacia abajo, asegurando el mojado de los capilares y por lo tanto cumpliendo estrictamente con los principios del método de medición empleado para la construcción del tensiómetro (Águila-Hernández, 1987; Águila-Hernández et al., 1995).

La medición de la altura de los meniscos líquido - vapor se realizó con un catetómetro, el cual también se utilizó para verificar la verticalidad de los tubos capilares en el tensiómetro. La exactitud del catetómetro es de ± 0.01 mm, con escala de acero inoxidable.

Por medio de la ecuación III.1 se pueden derivar valores de la tensión superficial, a una temperatura constante (Adamson, 1967):

$$\gamma_{ij} = \frac{r_i r_j g \Delta \rho (3 \Delta h_{ij} - (r_i - r_j))}{6(r_j - r_i)} \quad (\text{III.1})$$

donde r_i es el radio del capilar i, r_j es el radio del capilar j, $\Delta \rho$ es la diferencia de densidades entre el líquido bajo estudio y el aire, Δh_{ij} es la diferencia de alturas entre un par de capilares y g es la aceleración de la gravedad. En este caso sólo es necesario determinar Δh_{ij} ya que todos los demás valores se conocen.

III.3. Medición de la tensión superficial empleando el método de gota pendiente

Para la determinación de la tensión superficial de equilibrio o dinámica, se utilizó un sistema dinámico de ángulo de contacto marca FTA200 (Woodward, 1995). Este aparato captura la imagen empleando un sistema de vídeo en forma automática y posteriormente procesa la imagen con la ayuda de un software. Este aparato se muestra en la Figura 3.3.

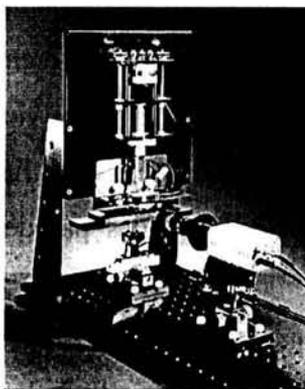


Figura 3.3. Sistema dinámico de ángulo de contacto FTA200.

El procedimiento de este equipo comercial se describe a continuación: el volumen para formar una gota es 1-15 microlitros, por lo tanto, se toma 1 cm^3 de la muestra bajo estudio

y se coloca en una jeringa de 3 cm^3 (previamente colocada la aguja dispensadora), enseguida se pone la jeringa con la muestra en la plataforma del sistema de ángulo de contacto FTA200. Este aparato emplea una bomba de alta precisión, la cual se opera con un motor, para mover el émbolo de la jeringa para alimentar las gotas bajo estudio. Las mediciones se hacen observando la forma de la gota, la cual revela la información del mismo fluido bajo estudio. Una vez observada la gota experimentalmente, la imagen se captura con la computadora y se almacena en su memoria, la cual se verá como se muestra en la Figura 3.4.

Las jeringas empleadas en la determinación de la tensión superficial de cada una de las muestras estudiadas en este trabajo fueron de plástico. Las agujas empleadas fueron proporcionadas por el proveedor con diámetro de 1.829 cm , cuya boquilla no termina en punta. Finalmente la celda para controlar la temperatura tiene un diseño especial que evita la evaporación de las mezclas bajo estudio.

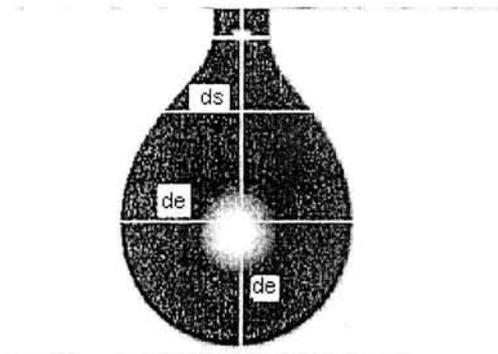


Figura 3.4. Captura de la imagen.

Para procesar las imágenes el sistema FTA200 se emplea el siguiente procedimiento: forma un juego de curvas analíticas que describen la gota y posteriormente resuelve las expresiones de los datos deseados con la ayuda del software en forma automática. Después de que la imagen ha sido analizada el software proporciona el valor de la tensión superficial. Puede medir la tensión superficial por el método de gota fija o por el método de gota pendiente. En este trabajo se utilizó el método de gota pendiente.

Para medir la tensión superficial empleando el método de gota pendiente el software resuelve la ecuación de Young-Laplace; también conocida como la ecuación de capilaridad (Adamson, 1967), la cual describe la forma de la gota bajo condiciones de equilibrio. La figura 3.5 muestra la gota pendiente.

Para medir la tensión superficial a temperatura constante, fue necesario calibrar el aparato empleando agua desionizada en el intervalo de temperatura de 20 a 50 °C y MDEA a las temperaturas de 60 y 70°C. Esto se hace en cada cambio de temperatura.

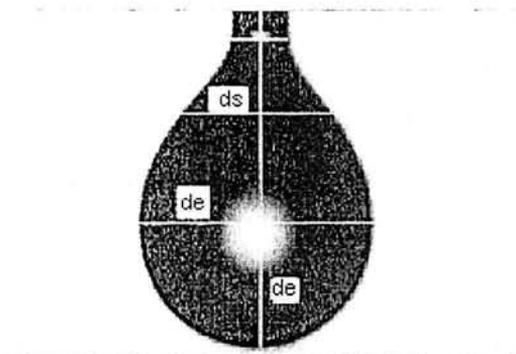


Figura 3.5. Dimensiones de la gota.

Por medio de la ecuación III.2 se pueden derivar valores de la tensión superficial, a una temperatura constante (Andreas et al., 1938):

$$\gamma = \frac{\Delta\rho g (d_c)^2}{H} \quad (\text{III.2})$$

donde $\Delta\rho$ es la diferencia de densidades entre el líquido bajo estudio y el aire, g es la aceleración de la gravedad, d_c es el diámetro máximo de la burbuja y $1/H$ es el factor de forma que se obtiene de tablas por medio de $S=ds/de$.

III.4. Medición de la estabilidad de espuma

El concepto de espuma que se emplea en este trabajo, de acuerdo con el criterio de Bikerman (1973), está relacionado con un sistema coloidal en donde la fase continua es un líquido, mientras que la fase dispersa es un gas. Su formación depende del sistema en observación y de las condiciones de medición como flujo, temperatura y presión.

Para realizar estudios experimentales en laboratorios de investigación y de aplicación industrial, existen en el mercado aparatos y métodos estándares para determinar el volumen y la estabilidad de espuma, sin embargo, estos aparatos no proporcionan valores altamente confiables. Algunas de las variantes de estos métodos son:

Método de la licuadora (ASTM, 1982). En este método el sistema bajo estudio se coloca dentro de un recipiente de geometría conocida. Para generar la espuma se emplea una propela, que se mueve por un motor eléctrico. La velocidad del motor es controlada por un autotransformador de corriente variable. En este caso el volumen de la espuma depende en gran medida de la forma y tamaño de la propela empleada. En este aparato no hay manera de alimentar una corriente de gas y no tiene control de temperatura.

Método de la botella (ASTM, 1982). En este método, el sistema bajo estudio también se coloca en un recipiente cerrado de geometría conocida. Este recipiente es agitado manual o automáticamente en pocos segundos, posteriormente se mide la altura de la espuma. Como en el primer caso, no se puede alimentar un gas y no se puede controlar la temperatura.

Debido a lo anterior es que se desarrolló el equipo y método para medir el volumen de espuma generada por la dispersión de un gas puro o mezcla de ellos en el seno de una mezcla que está en estado líquido y adicionalmente la medición de la estabilidad de espuma (Águila-Hernández y Trejo, 2002).

Una prueba típica (dinámica), para generar la espuma se logra burbujeando un gas en el seno de un líquido a través de un orificio poroso que contiene la solución de prueba. Para determinar el volumen de la espuma se debe mantener la espuma en estado estable bajo un flujo de gas constante y a las condiciones de temperatura constante y a la presión de saturación (Bikerman, 1973; Ross y Townsend, 1981). Este método es el que se utiliza en el presente trabajo y se describe a continuación:

La estabilidad de espuma es medida empleando un espumómetro, el cual se basó para su construcción en el método neumático propuesto por Bikerman (1973); Oh y Shah (1991), por ser éste uno de los más confiables y que consiste en determinar el volumen de espuma que se genera cuando un gas es burbujeado en el seno de un líquido a un gasto fijo y a las

condiciones de temperatura constante y a la presión de saturación. Los parámetros importantes para el diseño del espumómetro son los siguientes:

- Tubo de vidrio de área transversal constante conocido con gran precisión.
- Altura adecuada para medir la interfase líquido/gas de las muestras que se estudien.
- Serpentin para mantener el gas a la misma temperatura del sistema.
- Chaqueta térmica para mantener la temperatura constante.
- Trampa de condensación.

Un diagrama esquemático del diseño del espumómetro se puede observar en la Figura 3.6, y está formado por las siguientes partes (Águila-Hernández y Trejo, 2002): El tubo de vidrio (llamado tubo de espumación) identificado con el número 1, se encuentra posicionado verticalmente y soldado en él una placa de vidrio poroso del número 4, identificada con el número 2, colocada al inicio del tubo de espumación con el propósito de contener al sistema bajo estudio y de dispersar eficientemente el gas en el seno del sistema. En la parte inferior del tubo de espumación se encuentra soldado un serpentín, identificado con el número 3, para calentar el gas utilizado en el estudio del volumen y la estabilidad de espuma de los sistemas que se estudien. El tubo de espumación y el serpentín, se encuentran soldados a una chaqueta de vidrio, identificada con el número 4, que cubre totalmente al serpentín de precalentamiento, identificado con el número 3, y al tubo de espumación, identificado con el número 1, y es concéntrica con el propósito de que circule entre ellos un fluido que puede ser agua para el intervalo de temperatura de 20 a 50 °C o aceite de silicón para el intervalo de temperatura de 60 a 120 °C, para tener un control preciso de temperatura.

El espumómetro está acondicionado con las siguientes partes: en la parte inferior y en la parte superior izquierda, números 5 y 6, respectivamente, tiene soldadas juntas de vidrio con rosca del número 18 para colocar los sensores de temperatura; en la parte inferior y superior izquierda, identificados con los números 7 y 8 tiene soldadas olivas para conectar las mangueras del baño recirculador; en la parte inferior derecha, identificada con el número 9 tiene soldada una oliva para conectar la entrada del gas de trabajo; en la parte

superior tiene una junta de vidrio con rosca del número 18, identificado con el número 10, que sirve para adicionar el sistema bajo estudio; en la parte superior derecha tiene soldada una unión hembra 14/23 de vidrio, identificada con el número 11 para conectar una trampa de condensación, identificada con el número 12, con el propósito de condensar los vapores arrastrados del sistema bajo estudio, que tiene soldada una válvula de vidrio de dos vías, identificada con el número 13, con la finalidad de conectar una línea que conduce el gas al quemador.

Además, cuenta con un cilindro para almacenar el gas identificado con el número 14 o este cilindro se puede sustituir por una salida que proporcione gas en línea, con un regulador de presión modelo 12240, marca Matheson, con entrada de 200 libras y salida de 100 libras en su salida, identificado con el número 15. Una válvula micrométrica de acero inoxidable, identificada con el número 16, para regular el flujo del gas. Un indicador de presión, marca ISCA DE Wit, de 25 libras de capacidad, identificado con el número 17 para cuantificar el gas de salida. Un flujómetro, marca Cole Parmer, de teflón, identificado con el número 18, para fijar la presión de trabajo, y está conectado directamente al espumómetro. Un baño recirculador, marca Haake modelo A80, identificado con el número 19, que está conectado al espumómetro por medio de las olivas 7 y 8. Un termómetro digital, Systemtechnik serie 1220, identificado con el número 20, que indica la temperatura de trabajo en el espumómetro por medio de los sensores de resistencia de platino tipo aguja, identificados con los números 5 y 6. Un catetómetro marca Gaertner, identificado con el número 21 para determinar las alturas de la placa de vidrio poroso (h_0), identificada con el número 2 de la figura 3.6, la altura del sistema antes de inyectar el gas (h_1), la altura de la espuma cuando se ha alcanzado el equilibrio líquido/gas (h_f) y la verticalidad del tubo de espumación, identificado con el número 1.

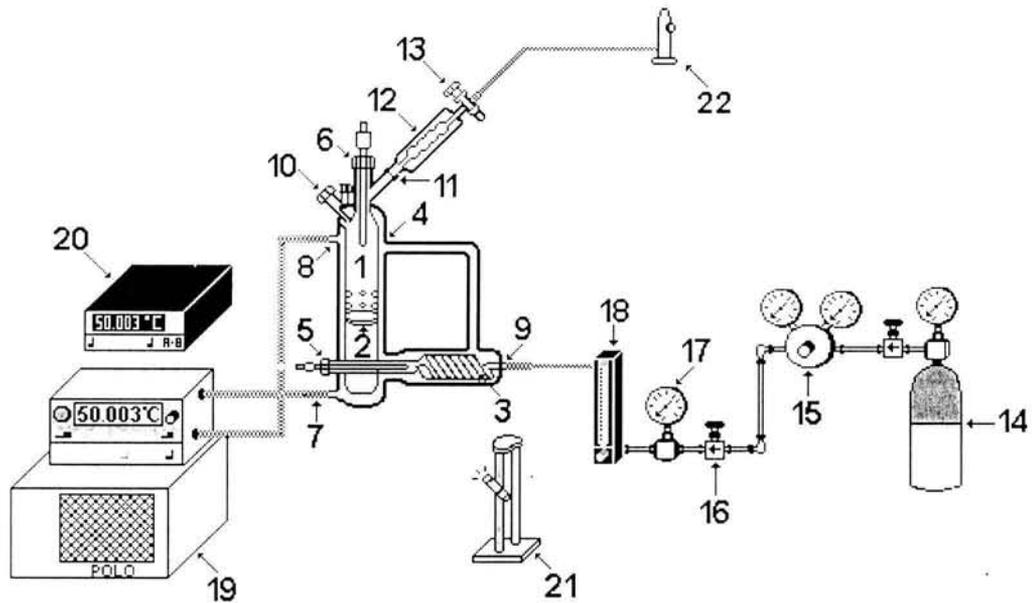


Figura 3.6. Equipo para analizar la estabilidad de espuma.

Cuando el gas es inyectado al sistema a un flujo constante, la altura, h , de la espuma empieza a aumentar con una velocidad lineal constante, pero luego la velocidad disminuye gradualmente y después de un tiempo se alcanza una altura constante h_0 , el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el equilibrio es variable y depende del sistema. Esta altura h_0 , dada en cm es, en cierto intervalo de velocidad, proporcional a la velocidad lineal del gas u , en $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

En un tubo de área transversal constante, A , una altura de espuma h_0 constante implica un volumen constante de espuma, v_0 ,

$$v_0 = Ah_0 \tag{III.3}$$

Dado que en este dispositivo se requiere de un flujo de gas constante, se considera que una velocidad lineal del gas “ u ”, dada en cm/s , significa un coeficiente de volumen del gas, así que:

$$\frac{V}{t} = uA \tag{III.4}$$

donde el coeficiente es un flujo de gas, dado en $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$. Con la altura de la columna de líquido y con la velocidad de gas que pasa por el sistema, se tiene:

$$\Sigma = \frac{v_0 t}{V} = \frac{A h_0 t}{V} = \frac{h_0}{u} \quad (\text{III.5})$$

donde Σ es el índice de estabilidad de espuma, en segundos. Mientras h_0/u es invariable, también $v_0 t/V$ lo es. Se observa que $v_0 t/V$ no varía con el diámetro del tubo utilizado para medir. Σ es la aproximación más cercana con la que se puede calcular la estabilidad de espuma. Es independiente de la velocidad de flujo del gas y de la cantidad de muestra utilizada.

En este trabajo, la estabilidad de espuma se calculó (tomando las variables experimentales) por medio de la siguiente relación:

$$\Sigma = A(h_f - h_i)/F \quad (\text{III.6})$$

donde Σ es la estabilidad de espuma en s, A representa el área de la sección transversal del tubo de espumación, que es una constante del equipo, en cm^2 , h_f es la altura de la espuma alcanzada por el sistema gas-líquido una vez alcanzado el equilibrio térmico, en cm, h_i es la altura inicial de la muestra líquida, tomando como referencia la posición de la placa porosa que son medidas con un catetómetro, en cm y F es el flujo del gas, en cm^3/s . En la figura 3.7 (a) se muestra el experimento antes de inyectar el gas y en la figura 3.7 (b) se muestra el experimento después que ha alcanzado el equilibrio térmico.

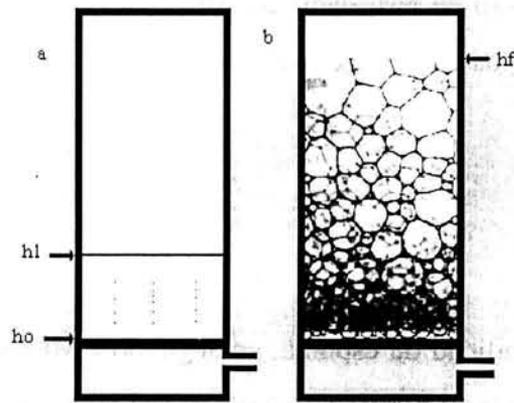


Figura 3.7. Formación de espuma.

El volumen de la espuma generado en el proceso se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_e = F \Sigma \quad (\text{III.7})$$

de aquí y con el volumen del líquido empleado (V_1) se calcula el factor de expansión:

$$f = V_e / V_1 \quad (\text{III.8})$$

que es un criterio para determinar si el sistema espuma o sólo dispersa el gas, de acuerdo con la siguiente regla:

$f = \leq 0.1$	sistema que sólo dispersa el gas
$f = \geq 0.9$	sistema que forma espuma
$0.1 < f < 0.9$	zona de transición

III.5. Medición de la densidad

Para conocer los valores de tensión superficial tanto de equilibrio como dinámico de las ecuaciones III.1 y III.3 debemos contar con valores de sus respectivas densidades. Para ello fue necesario utilizar el siguiente equipo el cual se describe a continuación.

El dispositivo experimental para determinar la densidad está formado por un densímetro de tubo vibrante (marca Sodev, modelo O3D), un medidor de periodos, un baño recirculador (marca Haake, modelo A80) para controlar la temperatura en ± 0.005 K, y un termómetro

digital (marca Hewlett-Packard, con sensor de cuarzo). Este equipo se muestra esquemáticamente en la Figura 3.8.

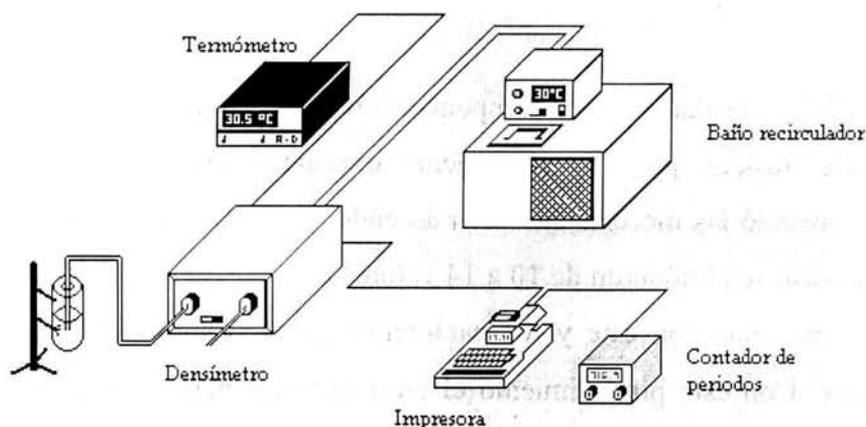


Figura 3.8. Diagrama esquemático del densímetro sistema Picker.

El principio de operación del densímetro es el siguiente (Kratky et al., 1973): la densidad es directamente proporcional al período de oscilación de un tubo que contiene la muestra a ser investigada (Murrieta-Guevara y Trejo, 1984; Águila-Hernández et al., 2001).

El funcionamiento del densímetro se describe a continuación: el microprocesador inicializa el tiempo de medición basado en el sensor de períodos, la señal del densímetro primero se normaliza a niveles lógicos por medio de un circuito. La frecuencia de esta señal es dividida entre 10 antes de llegar al contador universal. La medición es ejecutada por el contador de tiempo y entonces aparece en pantalla un periodo promedio, el punto decimal de la medición es determinado por un microprocesador y es función del número de lecturas promedio de períodos, dependiendo de este número aparecerán 3 o 4 decimales.

Previo a la medición de la densidad es necesario calibrar el densímetro empleando dos sustancias cuya densidad sea conocida con gran exactitud, ya que la ecuación que relaciona a los valores del período de vibración con la densidad incluye dos parámetros característicos del aparato a una temperatura dada. La ecuación que relaciona el periodo con la densidad es la siguiente:

$$\rho = A + B \tau^2 \quad (\text{III.9})$$

donde, ρ es la densidad, A y B son parámetros a determinar en una calibración y τ es el periodo.

La medición de la densidad para los componentes puros y las mezclas estudiadas se realizó de la siguiente manera: primero se alimento nitrógeno seco a la celda de medición, enseguida; se inyectó las mezclas en orden ascendente en concentración y se finalizó con agua. En cada caso se obtuvieron de 10 a 14 valores del periodo con la finalidad de obtener un promedio, para que con éste y los parámetros de la calibración derivar la densidad correspondiente. Con este procedimiento el error experimental obtenido fue de $\pm 0.0002 \text{ g/cm}^3$.

IV.1. Aminas y tensoactivos: Propiedades y estructuras

La calidad de los resultados obtenidos en cualquier experimento depende principalmente de dos factores a saber alta precisión en el equipo auxiliar y la pureza de las sustancias utilizadas. Por esto es importante emplear sustancias de alta pureza y equipos precisos. La limpieza del tensiómetro de tubos capilares es muy importante, ya que su material de construcción es vidrio Pyrex, por lo que, se debe lavar cada vez que se desea medir la tensión superficial de una sustancia ya sea pura o mezcla. Para este caso, se utilizó mezcla crómica, se lavó con agua bidestilada y se secó en una estufa a 100°C.

Las especificaciones de las sustancias utilizadas en este trabajo son: la muestra de dietanlomaina (DEA) fue obtenida por la compañía J.T. Baker con una pureza mayor del 99.9 %, la N-metildietanolamina (MDEA) fue suministrada por la compañía Aldrich con pureza indicada del 99 %; el agua fue bidestilada y desionizada; el 1-decanol fue obtenido de la compañía Aldrich con pureza reportada de 98 %, el alcohol oléico etoxilado (2OE) cuyo nombre comercial es "Brij 92" fue obtenido de la compañía Aldrich con una pureza reportada mayor al 98 %, el 2,5,8,11-tetrametil-6-dodecino-5,8 diol, el 2,4,7,9-tetrametil-5-decino-4,7-diol etoxilado (30OE), el monolaurato de sorbitan y el monooleato de sorbitan, cuyos nombres comerciales son "Surfinol DF110-D", "surfinol 485", "Span 20" y "Span 80" respectivamente, fueron proporcionados por Air Products; el monooleato de sorbitan etoxilado (20OE), cuyo nombre comercial es "Tuween 80" fue proporcionado por Drogas Tacuba S.A de C.V., y el alcohol oléico, cuyo nombre comercial es "ocenol" fue proporcionado por el área de productos químicos del Instituto Mexicano del Petróleo.

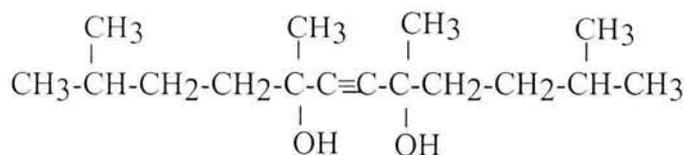
Las alcanolaminas estudiadas fueron además purificadas de la siguiente manera: se destilaron bajo condiciones de atmósfera reducida, con flujo de nitrógeno, en una columna empacada de vidrio de 70 cm de altura y desecados con malla molecular colocada en el recipiente donde se recibe el producto. Además, se obtuvieron cromatogramas de cada una de las aminas mediante un cromatógrafo de gases (marca Varian, serie 3400), el cual utiliza un detector de conductividad térmica. En los cromatogramas obtenidos se observa solamente un pico, lo cual indica la ausencia de impurezas. Por otro lado, el 1-decanol y los tensoactivos no iónicos fueron utilizados sin previa purificación.

La Tabla 4.1 muestra las estructuras químicas y la Tabla 4.1a muestra algunas de sus propiedades físicas de las sustancias estudiadas en este trabajo.

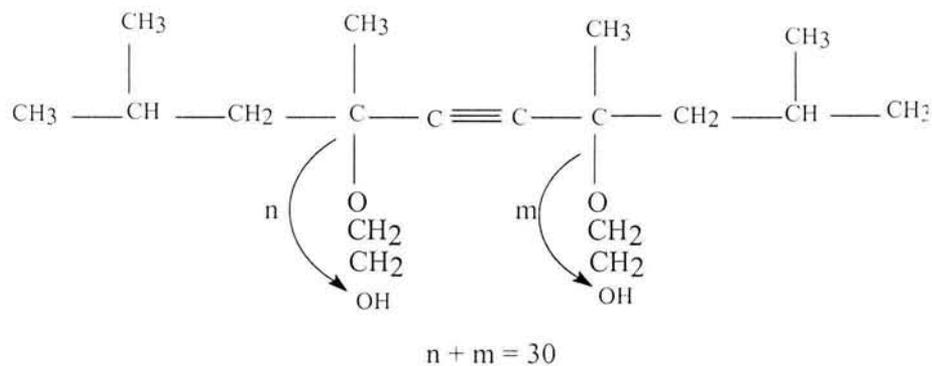
Tabla 4.1. Nombre y estructura química

Nombre	Estructura química
AGUA	H_2O
DEA	$HO-CH_2-CH_2-N-CH_2-CH_2-OH$ $ $ H
MDEA	$HO-CH_2-CH_2-N-CH_2-CH_2-OH$ $ $ CH_3
1-decanol	$C_{10}H_{22}O$
Brij 92	$C_{18}H_{35}(OCH_2CH_2)_nOH, n = 2$

Surfinol DF110-D



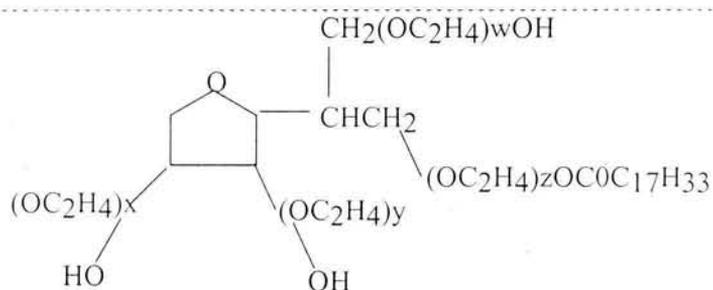
Surfinol 485



continúa

continúa

Tween 80



$$x + y + z + w = 20$$

Ocenol



Tabla 4.1a. Propiedades físicas, a 298.15 K.

Nombre	Viscosidad cP	Densidad g/cm ³	PM g/mol	HLB	Solubilidad en agua
Agua ^a	0.890	0.9970474	18.015		
DEA ^b	522.86	1.0936	105.15		Completa
MDEA ^c	76.9	1.0374	119.17		Completa
Tween 80 ^d	375-480	1.077	1309.68	15.4	Completa
Brij 92 ^d	30	0.912	356.59	4.9	Reducida
Ocenol ^d		0.849	268.47		Insoluble
Span 20 ^d	4250	1.032	346.47	8.6	Insoluble
Span 80 ^d	900	0.994	428.62	4.3	Insoluble
1-Decanol ^d		0.829	158.3		Reducida
Surfinol DF110-D ^c	32	1.033 (a 21°C)	254.41	3.0	0.03 %
Surfínol 485 ^c	<350 (a 20°C)	1.080	2869.47	17.0	Completa

(a) Riddich y Bunger (1970); (b) Águila-Hernández (1994); (c) Al-Ghawas et al. (1989); (d) web:www.sigma-aldrick.com.mx (e) Air Productos y Chemicals, Inc. (1992).

IV.2. Tensión superficial de componentes puros: agua, MDEA y DEA

Para determinar la tensión superficial de equilibrio de estos componentes puros se empleó un tensiómetro comercial que opera bajo el método de gota pendiente (sistema cerrado, donde la sustancia está en equilibrio con su vapor), con una precisión en el control de la temperatura de ± 0.003 K y en los valores de tensión superficial de ± 0.50 mN m⁻¹. Mientras que, Vázquez et al. (1996, 1997) y Alvarez et al. (1998) emplearon un

estalagmómetro (marca Traube) y un tensiómetro (marca Prolabo), los cuales emplean el principio del plato de Wilhelmy (sistema abierto), con una precisión en el control de temperatura en todas sus mediciones fue de ± 0.05 °C y la precisión en la tensión superficial de equilibrio fue de ± 0.02 mN m⁻¹. La tensión superficial disminuye con el aumento de la temperatura, en los tres componentes puros.

La Tabla 4.2 y Figura 4.1 muestran la tensión superficial del agua de este trabajo y de la literatura (Riddick y Bunger, 1972; Ramírez-Verduzco, 2001; Vargaftik et al., 1983; Vázquez et al., 1996). Al igual que Vázquez et al. (1997) se utiliza agua destilada y desionizada. Los errores relativos indican que los resultados obtenidos en este trabajo comparan de manera satisfactoria con los reportados en la literatura.

La Tabla 4.3 y Figura 4.2 muestran la tensión superficial de la DEA de este trabajo y de la literatura (Vázquez et al., 1996; Ramírez-Verduzco, 2001). La DEA fue destilada, cuyo análisis cromatográfico fue de 99.1 % de área. Vázquez et al. (1996) emplean DEA sin destilar, marca Merck, con una pureza reportada mayor del 98 %. Los errores relativos, indican que no hay una buena correlación con los valores reportados por Vázquez et al. (1996), simplemente porque la pureza de la amina es diferente y su método es abierto, por lo que, la sustancia está en contacto con el aire. Por el contrario, al comparar estos resultados con los de Ramírez-Verduzco (2001), quien hace una destilación previa y utiliza la misma técnica de medición utilizada en este trabajo, la correlación es satisfactoria.

La Tabla 4.4 y Figura 4.3 muestran la tensión superficial de la MDEA de este trabajo y de la literatura (Alvarez et al., 1998). La MDEA fue destilada, cuyo análisis cromatográfico fue de 99.1 % de área. Alvarez et al. (1998) usa MDEA sin destilar, marca Merck, con una pureza reportada mayor del 98 %. Observando los valores de los errores relativos, se puede decir que los resultados obtenidos en este trabajo comparan de manera satisfactoria con los reportados en la literatura.

Los valores experimentales de tensión superficial de equilibrio para los componentes puros y la mezcla MDEA + DEA + agua, fueron ajustados empleando una ecuación lineal y una polinomio de segundo grado, cuyos parámetros se encuentran al final de este capítulo (ver Tabla 4.74).

Tabla 4.2 Tensión superficial de equilibrio del agua, en función de la temperatura.

T/K	γ (mN m ⁻¹)								
	[a]	[b]	[c]	[d]	[e]	% ϵ ^[f]	% ϵ ^[g]	% ϵ ^[h]	% ϵ ^[i]
298.15	71.96	71.81			72.01	-0.21			0.08
303.15	71.21	71.18	71.12	71.20	71.21	-0.04	-0.13	-0.01	0.00
313.15	69.33	69.46	69.51	69.60	69.52	0.19	0.26	0.39	0.27
323.15	67.93	67.99	67.87	67.94	67.92	0.08	-0.09	0.01	-0.01
333.15	66.07	66.04	66.14	66.24		-0.04	0.11	0.26	
343.15	64.35	64.27	64.37	64.47		-0.12	0.03	0.18	

$$\% \epsilon = (\gamma_{lit} - \gamma_{exp} / \gamma_{lit}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Riddick y Bunger (1972).

[c] Ramírez-Verduzco (2001).

[d] Vargaftik et al. (1983).

[e] Vázquez et al. (1997).

[f] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Riddick y Bunger (1972).

[g] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Ramírez-Verduzco (2001).

[h] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Vargaftik et al. (1983).

[i] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Vázquez et al. (1997).

Tabla 4.3. Tensión superficial de equilibrio de DEA, en función de la temperatura.

T/K	γ (mN m ⁻¹)				
	[a]	[b]	[c]	% ϵ ^[d]	% ϵ ^[e]
298.15	48.69	47.21		-3.13	
303.15	48.05	46.46	48.01	-3.42	-0.08
313.15	47.06	44.75	47.15	-5.16	0.19
323.15	46.05	43.12	46.30	-6.79	0.54
333.15	45.09		45.53		0.96
343.15	44.20		44.64		0.98

$$\% \epsilon = (\gamma_{lit} - \gamma_{exp} / \gamma_{lit}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Vázquez et al. (1996).

[c] Ramírez-Verduzco (2001).

[d] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Vázquez et al. (1996).

[e] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Ramírez-Verduzco (2001).

Tabla 4.4. Tensión superficial de equilibrio de MDEA, en función de la temperatura.

T/K	$\gamma(\text{mN m}^{-1})$		
	[a]	[b]	% ϵ [c]
298.15	39.27	38.90	-0.95
303.15	38.67	38.10	-1.49
313.15	37.29	37.31	0.05
323.15	36.65	36.88	0.62
333.15	35.58		
343.15	34.58		

$$\% \epsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Alvarez et al. (1998).

[c] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Alvarez et al. (1998).

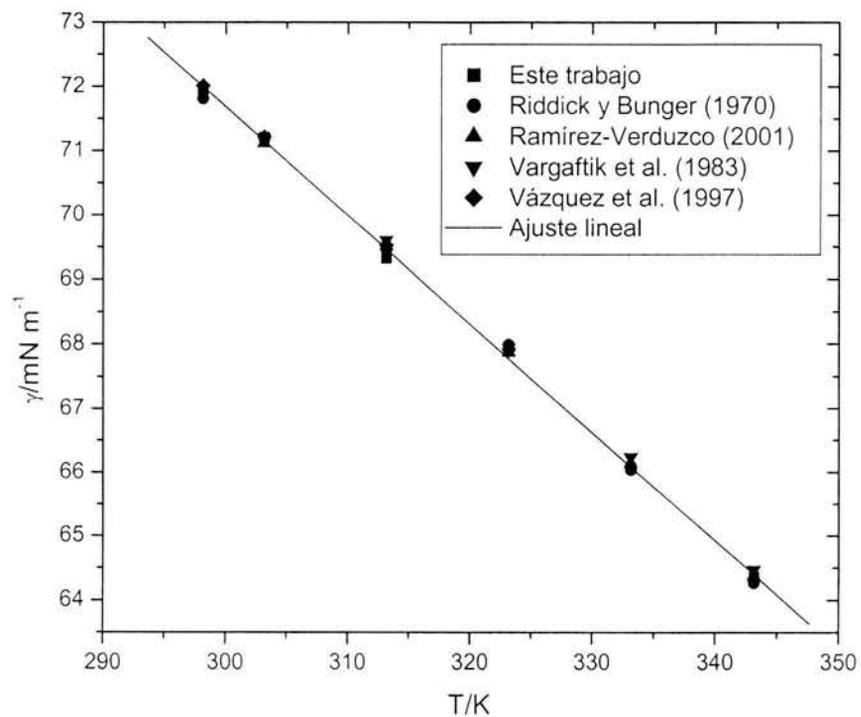


Figura 4.1. Tensión superficial del agua, en función de la temperatura.

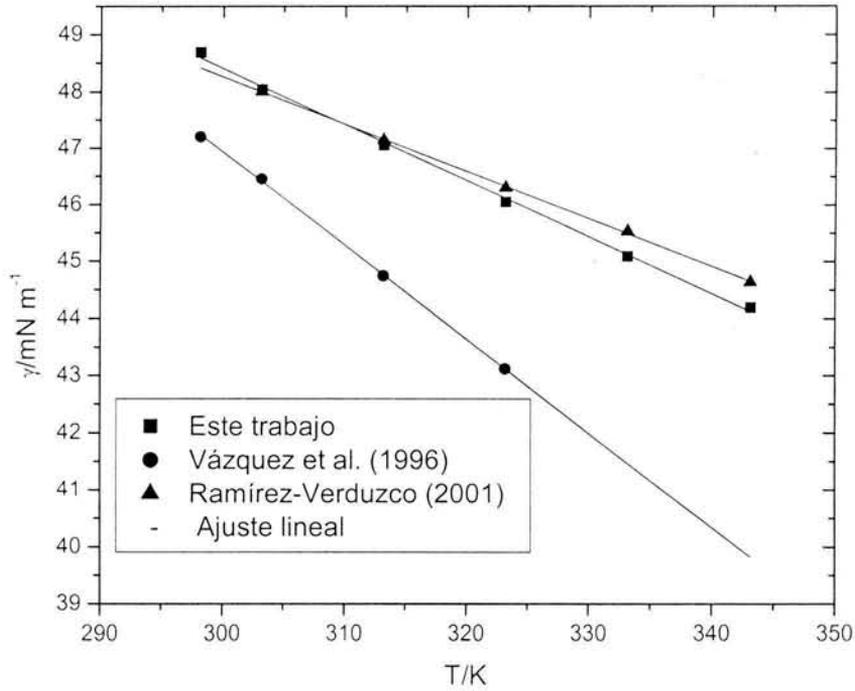


Figura 4.2. Tensión superficial de la DEA, en función de la temperatura.

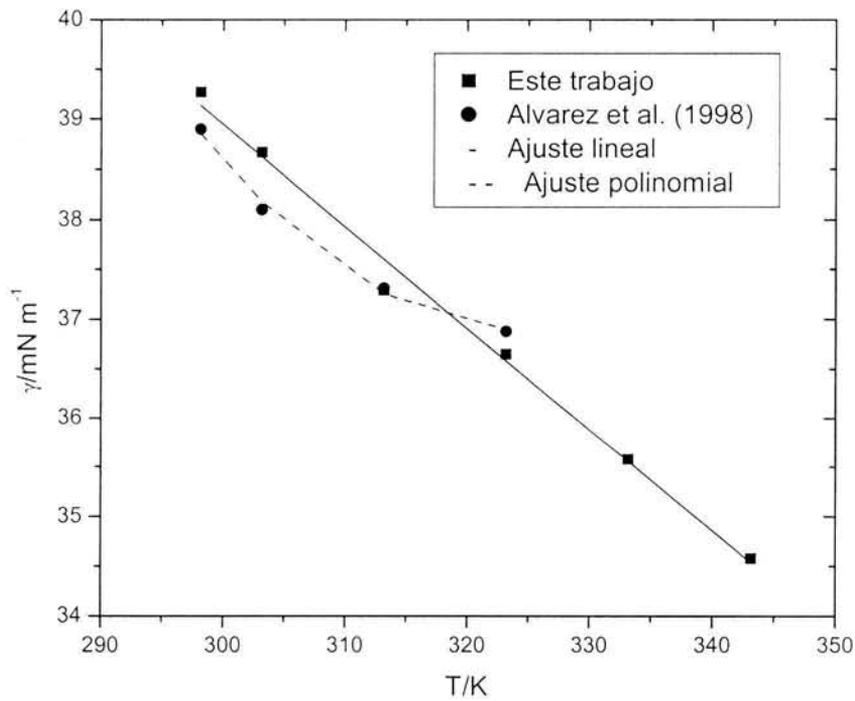


Figura 4.3. Tensión superficial de la MDEA, en función de la temperatura.

IV.3. Tensión superficial de sistemas binarios: DEA + agua y MDEA + agua

En esta sección se presentan resultados experimentales de tensión superficial de equilibrio de sistemas binarios, en función de la concentración y la temperatura. Para su medición, en algunos sistemas se empleó el método de gota pendiente y para otros sistemas se empleó el método de elevación capilar (cuya precisión en el control de la temperatura fue de ± 0.003 K y en los valores de tensión superficial de equilibrio de ± 0.15 mN m⁻¹). Rinker et al. (1994) utiliza un tensiómetro marca Rosano que opera bajo el método del plato de Wilhelmy, la precisión en el control de la temperatura fue de ± 0.05 °C y en los valores de tensión superficial de equilibrio de ± 0.05 mN m⁻¹. Se utilizó la ecuación de Langmuir para ajustar la datos de presión superficial en función de la concentración de la amina.

La Tabla 4.5 y Figura 4.4 reportan la tensión superficial de equilibrio del sistema DEA + agua, a 10, 20, y 30 % masa de la amina en el intervalo de temperatura de 293.15 a 363.15 K. Se utilizó DEA destilada y agua desionizada. En la misma Tabla 4.5 se reportan los valores experimentales obtenidos por Rinker et al. (1994), a 10, 20 y 30 % masa de DEA. Rinker y colaboradores, utilizan agua destilada y desionizada y DEA (sin destilar) proporcionada por Fisher Scientific con una pureza reportada mayor del 99 % masa. Se observa que existe buena concordancia entre ambos valores, es decir, se tiene un error relativo promedio absoluto de 0.28 %, el cual está dentro del error experimental de ambos trabajos. Asimismo, se determinaron datos experimentales de tensión superficial a otras temperaturas para este mismo sistema.

Tabla 4.5. Tensión superficial de equilibrio de DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

% masa DEA	T/K	[a]	[b]	%ε ^[c]
10	293.15	63.90	64.14	-0.37
10	313.15	61.74	61.65	+0.14
10	323.15		60.69	
10	333.15	60.05	60.48	-0.72
10	343.15		58.28	
10	353.15	56.84	56.49	+0.62
10	363.15		55.87	
20	293.15	65.27	66.45	-1.81
20	313.15	63.31	63.94	-0.99

continúa

continúa

20	323.15		62.62	
20	333.15	62.04	61.73	+0.50
20	343.15		59.98	
20	353.15	58.99	58.38	+1.03
20	363.15		57.34	
30	293.15	61.94	61.84	+0.16
30	313.15	60.17	60.17	+0.23
30	323.15		58.57	
30	333.15	58.02	57.27	+1.29
30	343.15		56.23	
30	353.15	55.27	55.01	+0.47
30	363.15		53.89	

$$\% \varepsilon = (\gamma_{lit} - \gamma_{exp} / \gamma_{lit}) * 100$$

[a] Rinker et al. (1994)

[b] Este trabajo: capilaridad

[c] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

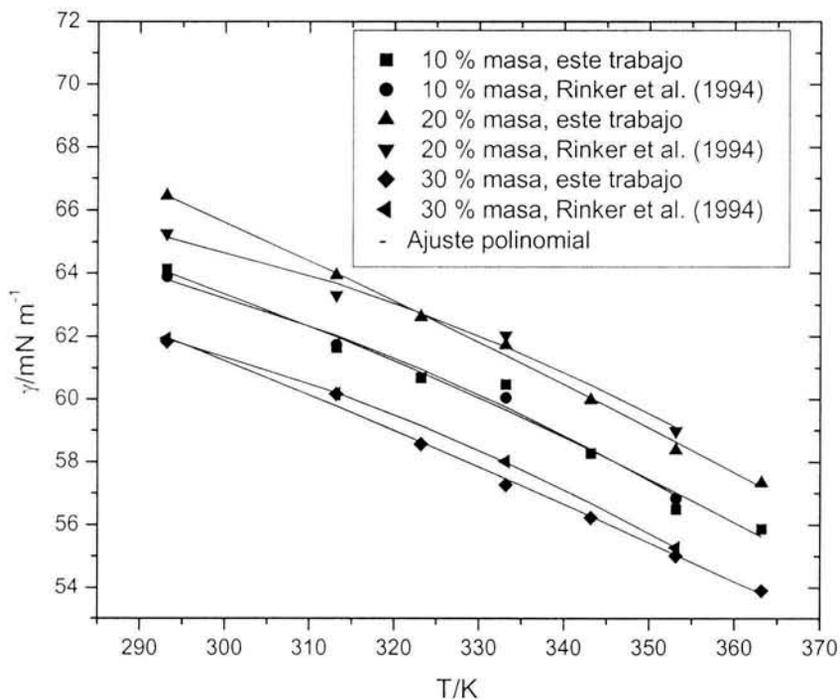


Figura 4.4. Tensión superficial de DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

Las Tablas (4.6 - 4.9) muestran la tensión superficial de equilibrio para el sistema DEA + agua, a 10, 20, 30, 40, y 50 % masa de la amina, en el intervalo de temperatura de 313.15 a

343.15 K y los respectivos componentes puros. Los errores relativos entre los resultados obtenidos en este trabajo y los de la literatura son grandes, no hay buena concordancia como sucede con el componente puro. La DEA es altamente higroscópica, por lo tanto, es difícil reproducirla. Las Figuras 4.5 a 4.8 muestran la presión superficial en función de la concentración. La DEA tiene una débil actividad superficial, cuya presión superficial es de 22.5 mN m^{-1} a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K, y disminuye a 21 mN m^{-1} a 333.15 K y a 20 mN m^{-1} a 343.15 K.

Tabla 4.6. Tensión superficial de equilibrio de DEA + H₂O, en función de la concentración, a 313.15 K

% masa de DEA	$\gamma(\text{mN m}^{-1})$				%ε ^[e]	%ε ^[f]	%ε ^[g]
	[a]	[b]	[c]	[d]			
0	69.33			69.52			0.27
10	64.69	61.65	61.74	64.57	-4.93	-4.78	-0.19
20	63.40	63.94	63.31	61.19	0.84	-0.14	-3.61
30	60.92	60.17	60.17	58.69	-1.25	-1.25	-3.80
40	59.12			56.71			-4.25
50	57.50			55.04			-4.47
100	47.06			44.75			-5.16

$$\% \varepsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Águila-Hernández et al. (2001)

[c] Rinker et al. (1994)

[d] Vázquez et al. (1996) (valores calculados)

[e] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Águila-Hernández et al. (2001).

[f] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994)

[g] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Vázquez et al. (1996)

Tabla 4.7. Tensión superficial de equilibrio del sistema DEA + H₂O, en función de la concentración, a 323.15 K.

% masa de DEA	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$				%ε ^[e]	%ε ^[f]	%ε ^[g]
	[a]	[b]	[c]	[d]			
0	67.93			67.92			-0.01
10	63.12	60.69	60.95	62.94	-4.00	-3.56	-0.29
20	60.55	62.62	62.74	59.55	3.31	3.49	-1.68

continúa

continúa

30	58.65	58.57	59.15	57.05	-0.14	0.84	-2.80
40	56.69			55.07			-2.94
50	55.58			53.4			-4.08
100	46.05			43.12			-6.79

$$\% \varepsilon = (\gamma_{lit} - \gamma_{exp} / \gamma_{lit}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Águila-Hernández et al. (2001)

[c] Rinker et al. (1994) (valores calculados)

[d] Vázquez et al. (1996) (valores calculados)

[e] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Águila-Hernández et al. (2001).

[f] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

[g] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Vázquez et al. (1996).

Tabla 4.8. Tensión superficial de equilibrio del sistema DEA + H₂O, en función de la concentración, a 333.15 K.

% masa de DEA	$\gamma / \text{mN m}^{-1}$				
	[a]	[b]	[c]	$\% \varepsilon^{[d]}$	$\% \varepsilon^{[e]}$
0	66.07				
10	59.65	60.48	60.05	1.37	0.66
20	58.02	61.73	62.04	6.01	6.47
30	56.28	57.27	58.02	1.73	3.00
40	54.27				
50	53.50				
100	45.09				

$$\% \varepsilon = (\gamma_{lit} - \gamma_{exp} / \gamma_{lit}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Águila-Hernández et al. (2001).

[c] Rinker et al. (1994).

[d] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Águila-Hernández et al. (2001).

[e] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

Tabla 4.9. Tensión superficial de equilibrio de DEA + H₂O, en función de la concentración, a 343.15 K.

% masa de DEA	$\gamma / \text{mN m}^{-1}$				
	[a]	[b]	[c]	$\% \varepsilon^{[d]}$	$\% \varepsilon^{[e]}$
0	64.35				
10	58.36	58.28	58.74	-0.14	0.65

continúa

continúa

20	57.11	59.98	60.88	4.78	6.19
30	55.21	56.23	56.73	1.81	2.68
40	53.65				
50	52.44				
100	44.20				

$$\% \varepsilon = (\gamma_{lit} - \gamma_{exp} / \gamma_{lit}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Águila-Hernández et al. (2001).

[c] Rinker et al. (1994) (valores calculados).

[d] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Águila-Hernández et al. (2001).

[e] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

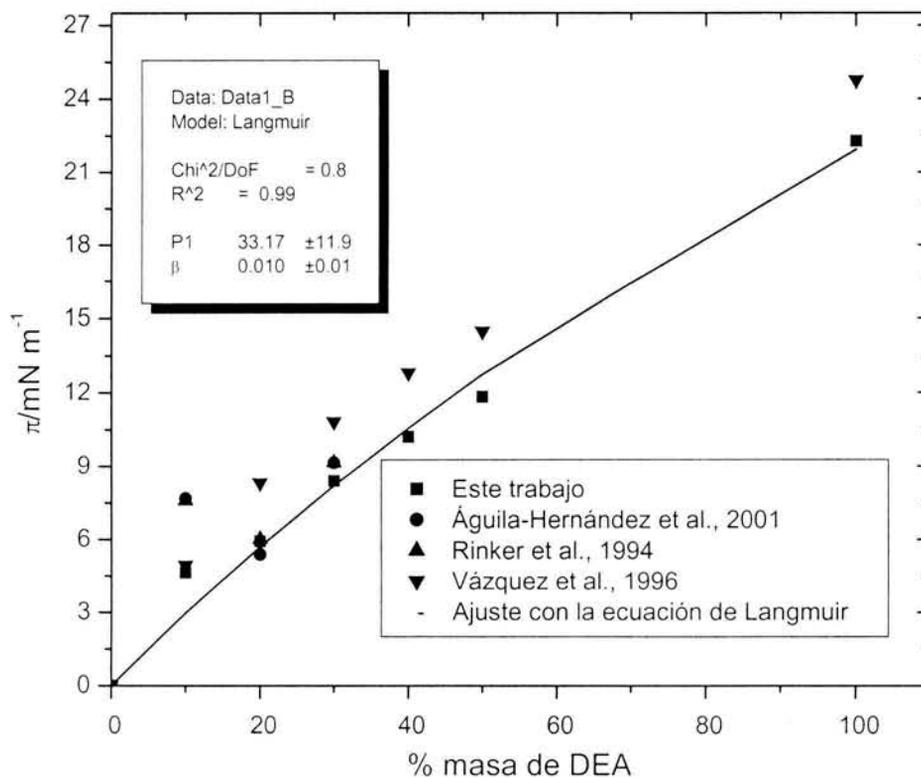


Figura 4.5. Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 313.15 K.

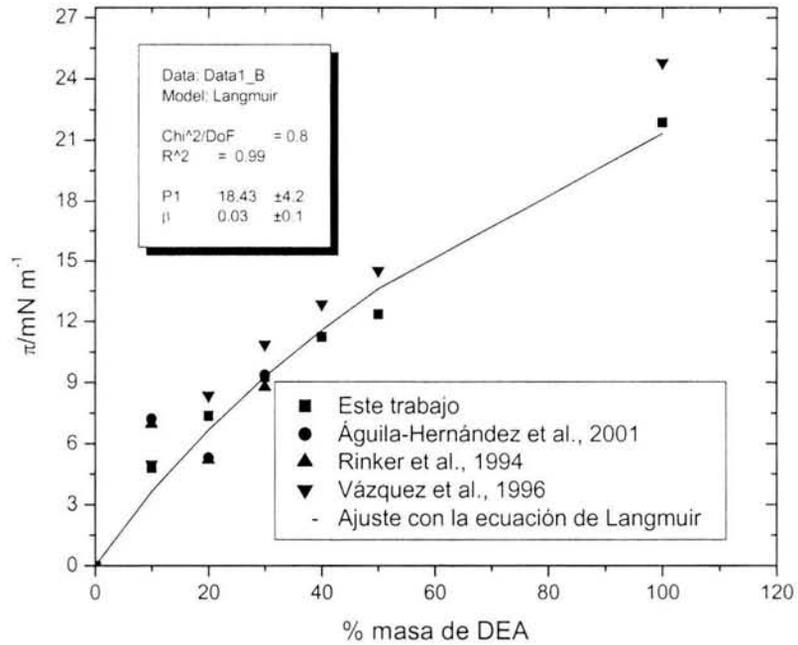


Figura 4.6. Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 323.15 K.

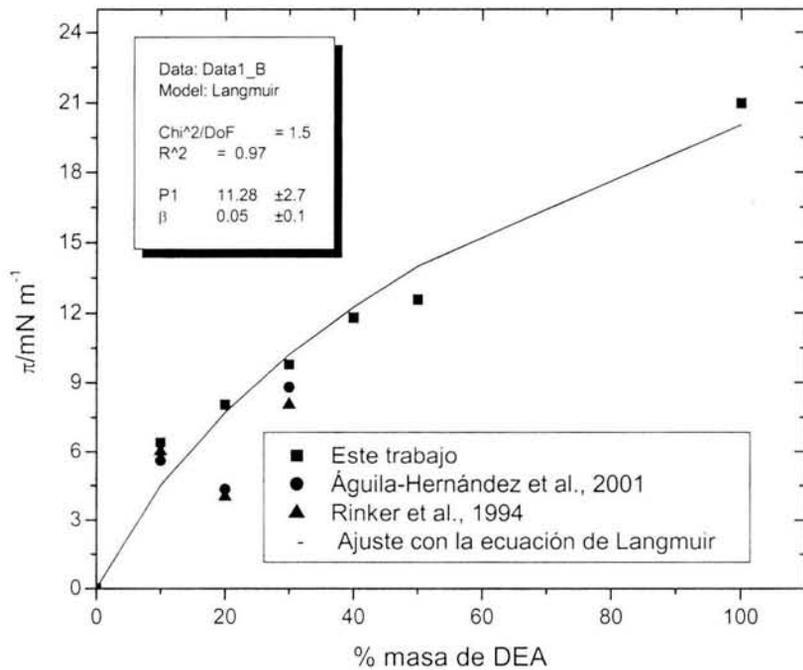


Figura 4.7. Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 333.15 K.

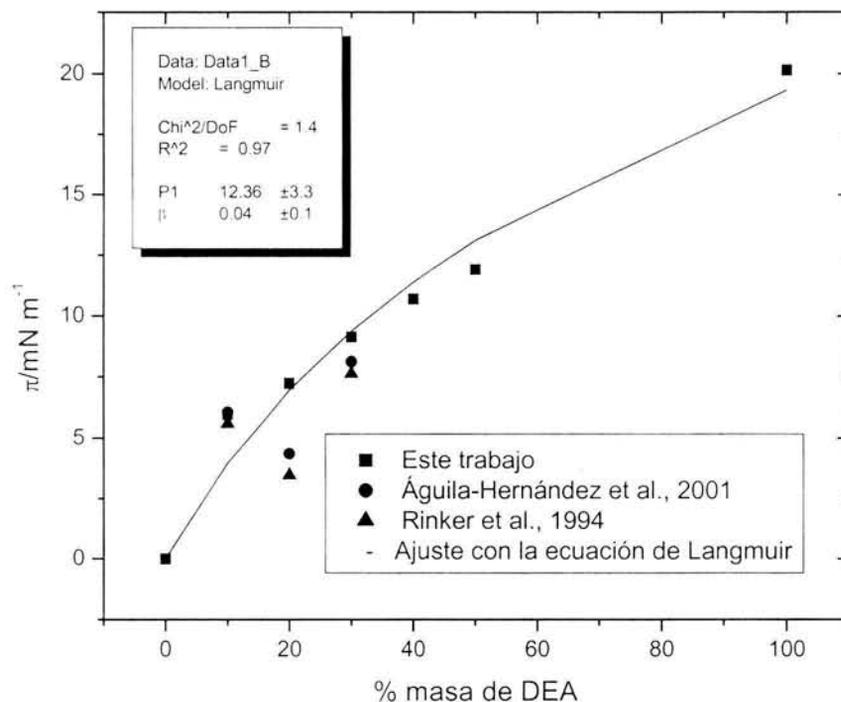


Figura 4.8. Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 343.15 K.

Las Tablas 4.10 a 4.13 muestran la tensión superficial de equilibrio para el sistema MDEA + agua, a 10, 20, 30, 40, y 50 % masa de la amina y los correspondientes componentes puros, en el intervalo de temperatura de 313.15 a 343.15 K. Las Figuras 4.9 a 4.12 contienen la presión superficial en función de la concentración. Observando los valores de los errores relativos, se puede decir que los resultados comparan de manera satisfactoria con los reportados en la literatura. La presión superficial aumenta cuando aumenta la concentración de la MDEA y es mayor que el de la DEA. Indicando que la MDEA tiene mayor actividad superficial que la DEA, generando una mayor disminuye en la tensión superficial del agua. La concordancia de los valores experimentales de tensión superficial obtenidos por otros autores es excelente porque la MDEA es menos higroscópica que la DEA.

Tabla 4.10. Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H₂O, en función de la concentración, a 313.15 K

% masa de MDEA	$\gamma(\text{mN m}^{-1})$				
	[a]	[b]	[c]	% ϵ ^[d]	% ϵ ^[e]
0	69.33		69.52		0.37
10	58.45	58.08	59.88	-0.64	2.39
20	54.38	54.56	54.62	0.33	0.44
30	51.74	51.47	51.31	-0.52	-0.84
40	49.51	49.85	48.94	0.68	-1.16
50	47.83	47.72	47.10	-0.23	-1.55
100	37.29		37.31		0.05

$$\% \epsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Rinker et al. (1994).

[c] Alvarez et al. (1998) (valores calculados).

[d] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

[e] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Alvarez et al. (1998).

Tabla 4.11. Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H₂O, en función de la concentración, a 323.15 K.

% masa de MDEA	$\gamma(\text{mN m}^{-1})$				
	[a]	[b]	[c]	% ϵ ^[d]	% ϵ ^[e]
0	67.93		67.92		-0.07
10	55.68	55.56	58.47	-0.22	4.77
20	52.73	52.86	53.11	0.24	0.72
30	50.17	50.42	49.66	0.49	-1.03
40	48.18	48.89	47.2	1.45	-2.07
50	46.16	46.57	45.31	0.88	-1.88
100	36.65		36.88		0.62

$$\% \epsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Águila-Hernández et al., (2001): gota pendiente.

[b] Rinker et al. (1994) (valores calculados).

[c] Alvarez et al. (1998) (valores calculados).

[d] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

[e] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Alvarez et al. (1998).

Tabla 4.12. Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H₂O, en función de la concentración, a 333.15 K

% masa de MDEA	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$		
	[a]	[b]	% ϵ ^[c]
0	66.07		
10	55.56	53.31	-4.22
20	51.18	51.20	0.04
30	48.86	49.34	0.97
40	46.60	47.81	2.53
50	45.15	45.44	0.64
100	35.58		

$$\% \epsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Rinker et al. (1994).

[c] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

Tabla 4.13. Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H₂O, en función de la concentración, a 343.15 K

% masa de MDEA	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$		
	[a]	[b]	% ϵ ^[c]
0	64.35		
10	53.37	51.37	-3.89
20	49.63	49.64	0.02
30	47.71	48.14	0.89
40	45.57	46.60	2.21
50	44.28	43.89	-0.89
100	34.58		

$$\% \epsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente.

[b] Rinker et al. (1994) (valores calculados).

[c] Error relativo, entre los resultados de este trabajo y los reportados por Rinker et al. (1994).

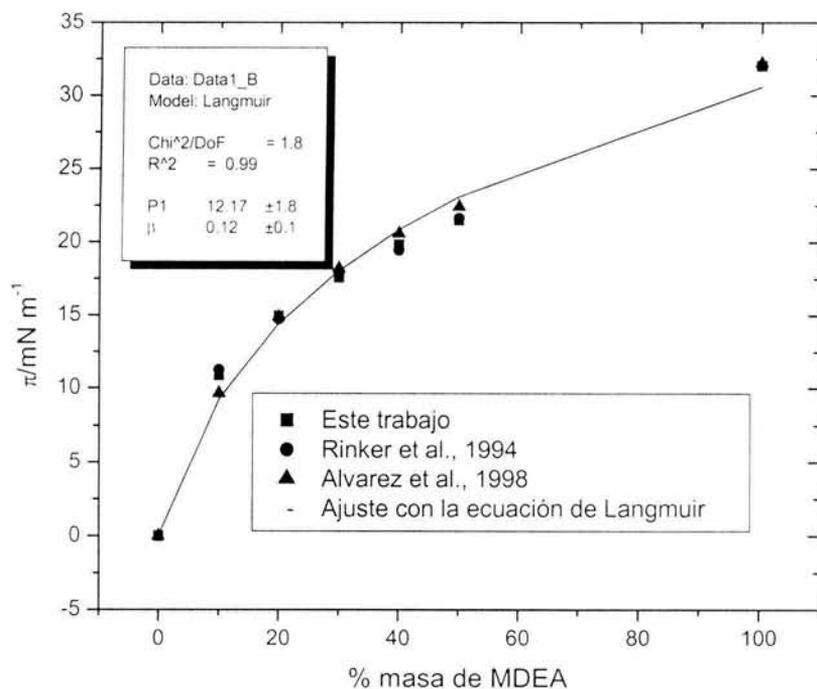


Figura 4.9. Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 313.15 K.

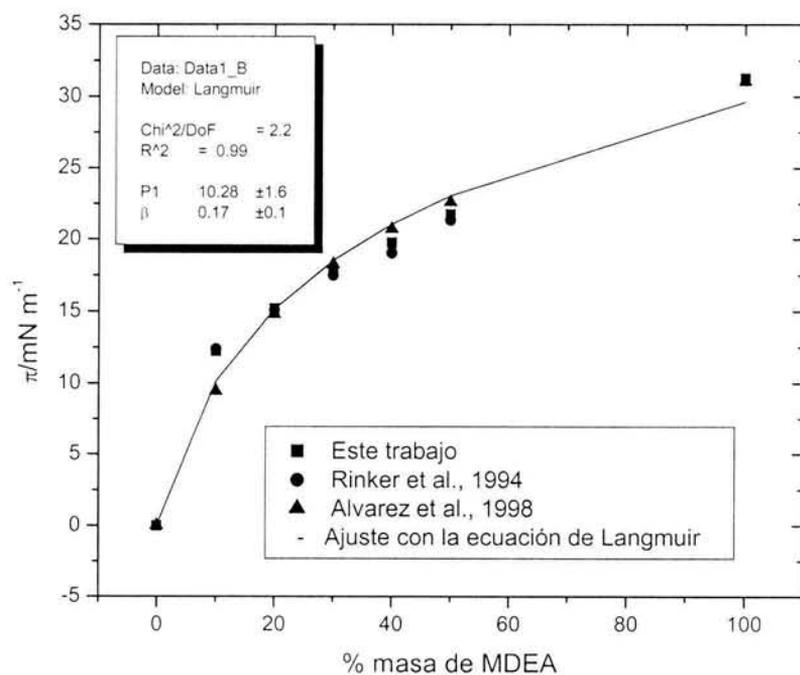


Figura 4.10. Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 323.15 K.

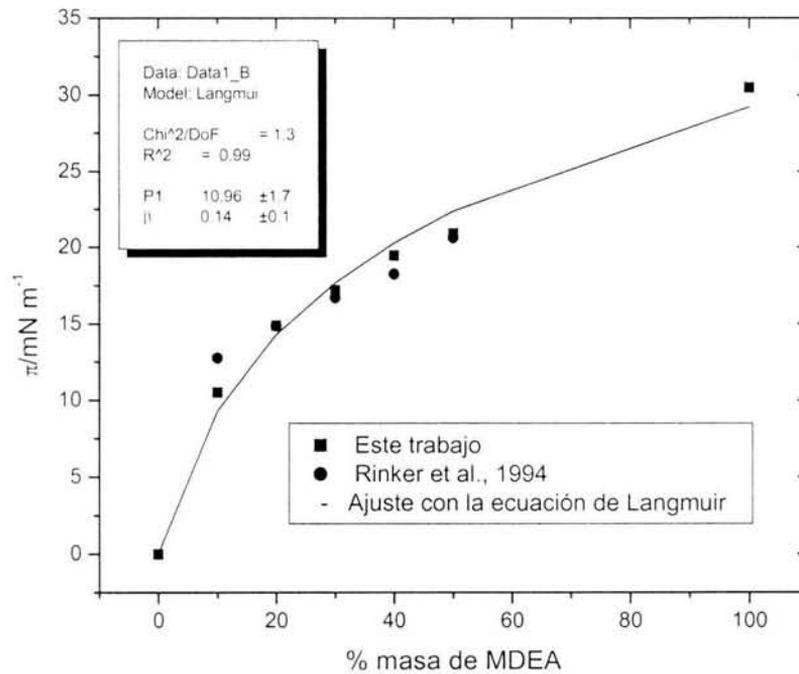


Figura 4.11. Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 333.15 K.

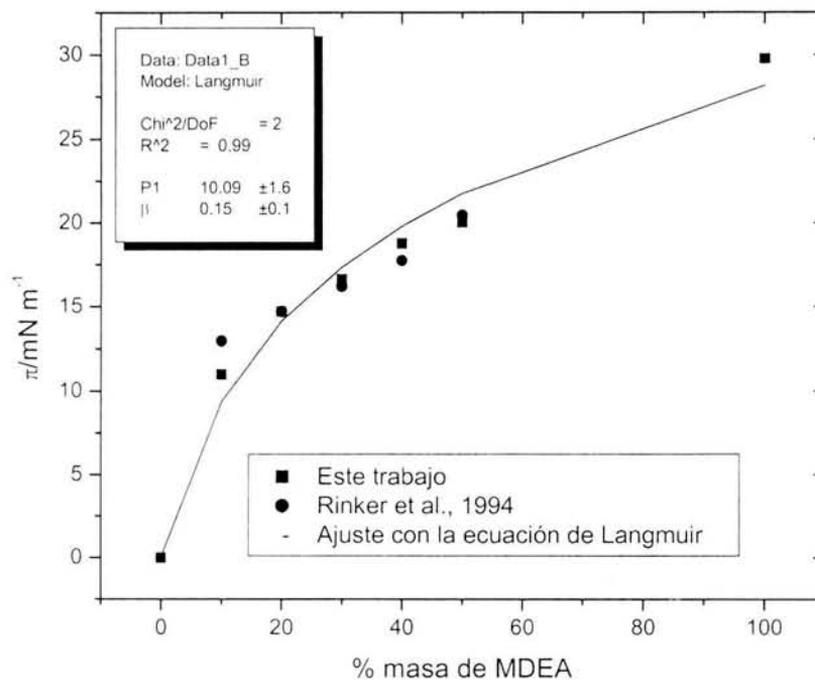


Figura 4.12. Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 343.15 K.

Hasta aquí se han presentado valores de tensión superficial de componentes puros (agua, DEA y MDEA) y de dos sistemas binarios: DEA + agua y MDEA + agua. Se observa que los valores de la tensión superficial de las mezclas caen dentro de los correspondientes componentes puros y que la MDEA por tener mayor actividad superficial que la DEA, disminuye más la tensión superficial del agua. La ecuación de Langmuir correlaciona de manera satisfactoria los valores experimentales.

IV.4. Tensión superficial de equilibrio de sistemas ternarios: MDEA + DEA + agua; Span 20, Span 80, Brij 92 y Surfínol 485 + DEA acuosa al 20 % masa y Surfínol 485 + MDEA acuosa al 20 % masa.

En esta sección, primero se estudió el sistema MDEA + DEA + agua para observar la sinergia al mezclar dos aminas, posteriormente, tanto en la MDEA acuosa como en la DEA acuosa se adiciona un tensoactivo no iónico para ver el efecto que éste produce en la tensión superficial de equilibrio. Se empleó el método de gota pendiente y el de elevación capilar. Asimismo, se utilizó la ecuación de Langmuir para ajustar la presión superficial en función de la concentración de la amina.

La Tabla 4.14 y la Figura 4.13 muestran la tensión superficial del sistema MDEA + DEA + agua, a una concentración total de las aminas del 50 % masa a las temperaturas de 313.15, 323.15 y 333.15 K. Como se observa, la tensión superficial disminuye cuando la concentración de la MDEA y la temperatura aumentan. Los resultados fueron comparados con los valores reportados por Alvarez et al. (1998), a dos temperaturas (313.15 y 323.15) K y con cuatro relaciones diferentes de % masa (0/50, 30/20, 40/10 y 50/0). La comparación muestra un % de error relativo de 0.19. Esto indica que la correlación es excelente. Las otras concentraciones obtenidas en este trabajo son originales, es decir, no hay valores reportados en la literatura. A la concentración de 40 % masa de MDEA y 10 % masa de DEA se demuestra la sinergia, cuya disminución en la tensión superficial es cercana al de la MDEA.

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

Tabla 4.14. Tensión superficial de equilibrio de MDEA + DEA + agua, a una concentración total del 50 % masa de las dos aminas, en función de la concentración y la temperatura.

T/K	% masa MDEA/ % masa DEA								
	0/50	5/45	15/35	25/25	30/20	35/15	40/10	45/5	50/0
313.15	54.67	53.77	52.34	50.52	49.86	49.17	48.44	48.14	47.59
323.15	53.04	52.70	51.01	49.49	48.38	47.95	47.26	46.34	45.86
333.15	52.68	51.54	49.90	47.63	46.95	46.52	46.20	45.91	45.40

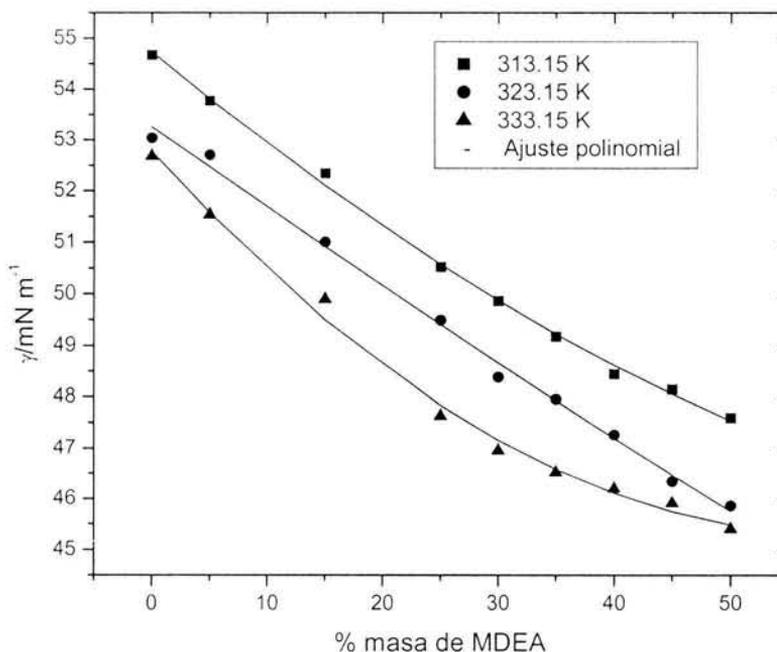


Figura 4.13. Tensión superficial de MDEA + DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

Las Tablas 4.15 y 4.16 muestran la tensión superficial de equilibrio del sistema Span 20 y Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, a las temperaturas de 293.15 y 313.15 K. Las Figuras 4.14 a 4.17 muestran la presión superficial en función de la concentración del tensoactivo. La presión superficial es mayor del Span 20 que del Span 80, indicando que el Span 20 tiene una actividad superficial mayor que el Span 80 y que la presión superficial aumenta al aumentar la temperatura.

Tabla 4.15. Tensión superficial de equilibrio de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa y Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 293.15 K.

C (10^3 Mol dm^{-3})	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	
	Span20	Span80
0	66.45	66.45
0.49	57.38	63.15
1.2	47.50	58.79
3.7	41.51	54.51
16.0	37.44	50.35

Tabla 4.16. Tensión superficial de equilibrio de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa y Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 313.15 K.

C (10^3 Mol dm^{-3})	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	
	Span20	Span80
0	63.94	63.94
0.49	48.79	52.86
1.2	41.03	49.82
3.7	35.67	38.25
16.0	33.17	35.03

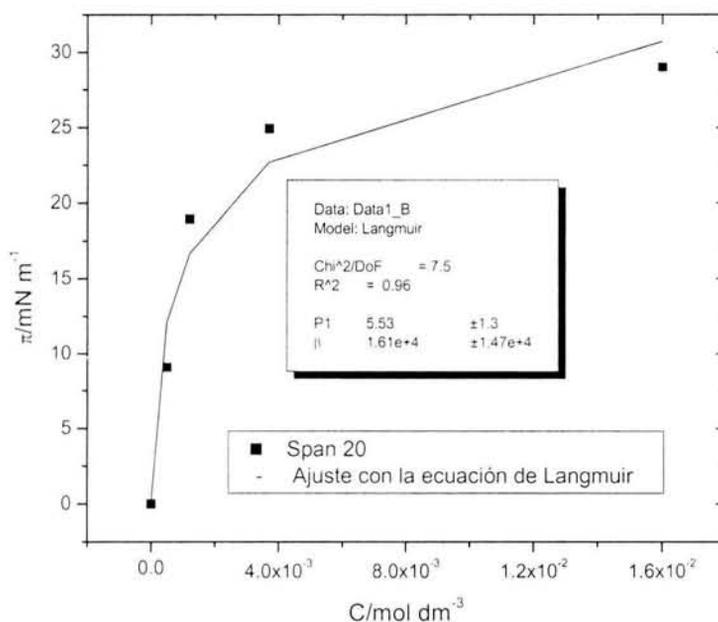


Figura 4.14. Presión superficial de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 293.15 K.

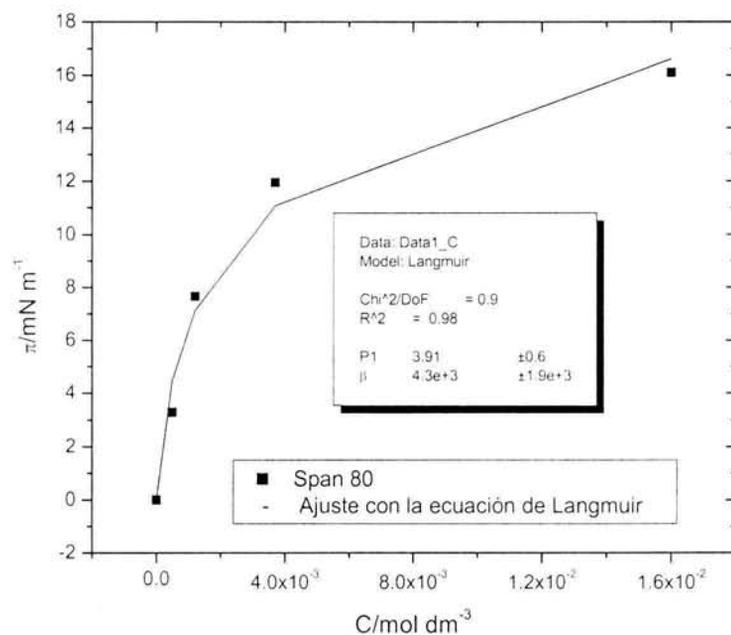


Figura 4.15. Presión superficial de Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 293.15 K.

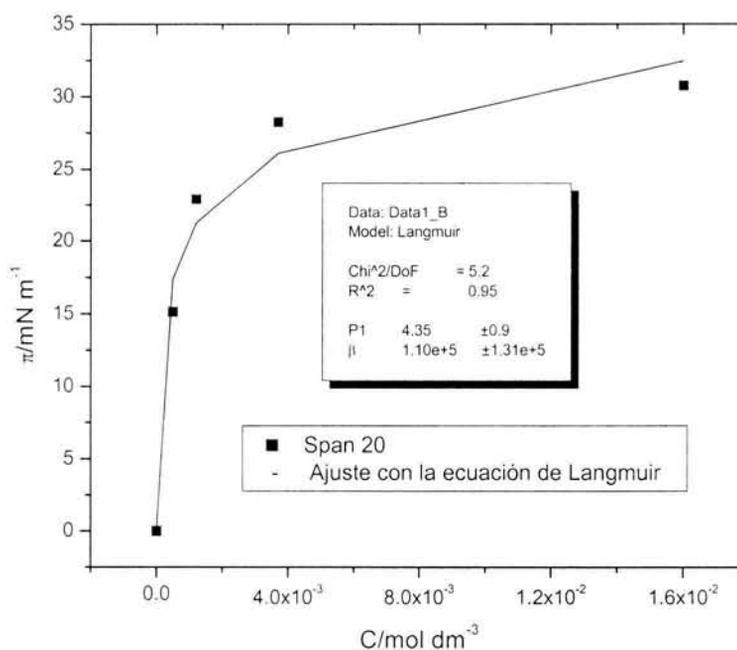


Figura 4.16. Presión superficial de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 313.15 K.

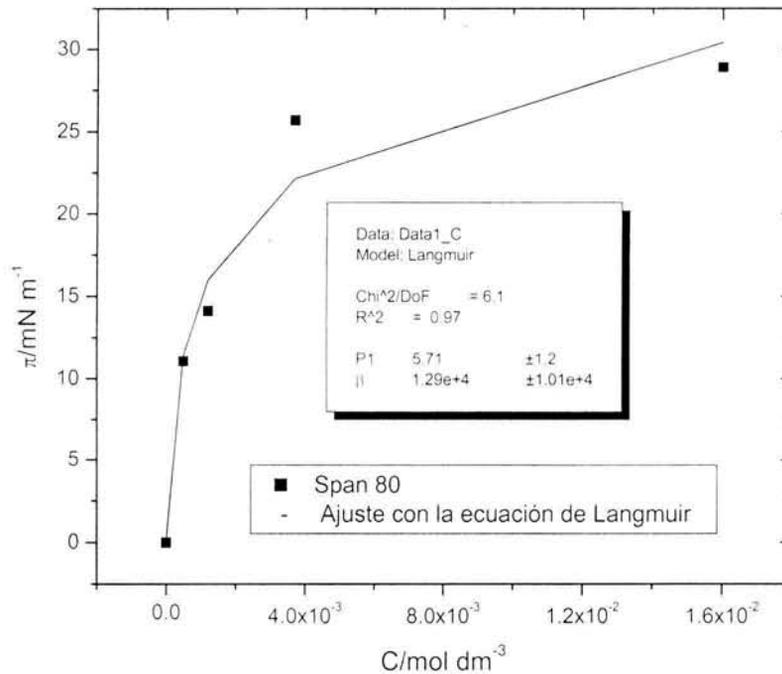


Figura 4.17. Presión superficial de Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 313.15 K.

Las Tablas 4.17, 4.18 y 4.19 presentan la tensión superficial de equilibrio del sistema Brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, a las temperaturas de 323.15, 333.15 y 343.15 K, determinadas con el método de gota pendiente y con el método de capilaridad. Observando los valores de los errores relativos, se puede decir que los resultados obtenidos en este trabajo comparan de manera satisfactoria con ambos métodos. La Figura 4.18 muestra la presión superficial en función de la concentración del tensoactivo. La presión superficial del Brij 92 es más grande que la del Span 20. Esto indica que el Brij 92 tiene una actividad superficial mayor que el Span 20. La presión superficial disminuye al aumentar la temperatura.

Tabla 4.17. Tensión superficial de equilibrio del brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 323.15 K.

C (10 ⁴ Mol dm ⁻³)	[a] $\gamma/\text{mN m}^{-1}$	[b] $\gamma/\text{mN m}^{-1}$	% ϵ ^[c]
0	60.55	62.62	
0.092	29.46	29.49	-0.10
0.19	28.00	28.18	-0.64
0.25	27.96	27.79	0.61
0.51	27.51	27.51	0
1.0	27.22	27.14	0.29
1.5	27.05	27.03	0.07
2.0	27.46	27.47	-0.03

$$\% \epsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente

[b] Este trabajo: Capilaridad

[c] Error relativo, entre los resultados con el método de capilaridad y con el método de gota pendiente.

Tabla 4.18. Tensión superficial de equilibrio del brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 333.15 K.

C (10 ⁴ Mol dm ⁻³)	[a] $\gamma/\text{mN m}^{-1}$	[b] $\gamma/\text{mN m}^{-1}$	% ϵ ^[c]
0	58.02	61.73	
0.092	28.56	28.67	-0.38
0.19	27.38	27.58	-0.73
0.25	27.31	27.36	-0.18
0.51	27.01	27.12	-0.41
1.0	26.93	26.99	-0.22
1.5	26.91	26.92	-0.04
2.0	26.96	26.91	0.18

$$\% \epsilon = (\gamma_{\text{lit}} - \gamma_{\text{exp}} / \gamma_{\text{lit}}) * 100$$

[a] Este trabajo: gota pendiente

[b] Este trabajo: Capilaridad

[c] Error relativo, en por ciento, entre los resultados con el método de capilaridad y con el método de gota pendiente.

Tabla 4.19. Tensión superficial de equilibrio del brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 343.15 K.

C (10 ⁴ Mol dm ⁻³)	[a] $\gamma/\text{mN m}^{-1}$	[b] $\gamma/\text{mN m}^{-1}$	% ϵ ^[c]
0	57.11	59.98	
0.092	27.68	27.75	-0.25

continúa

continúa

0.19	26.86	26.88	-0.07
0.25	26.85	26.69	0.59
0.51	26.7	26.63	0.26
1.0	26.52	26.51	0.04
1.5	26.42	26.41	0.04
2.0	26.85	26.69	0.59

$$\% \varepsilon = (\gamma_{lit} - \gamma_{exp} / \gamma_{lit}) * 100$$

^[a] Este trabajo: gota pendiente

^[b] Este trabajo: Capilaridad

^[c] Error relativo, en por ciento, entre los resultados con el método de capilaridad y con el método de gota pendiente.

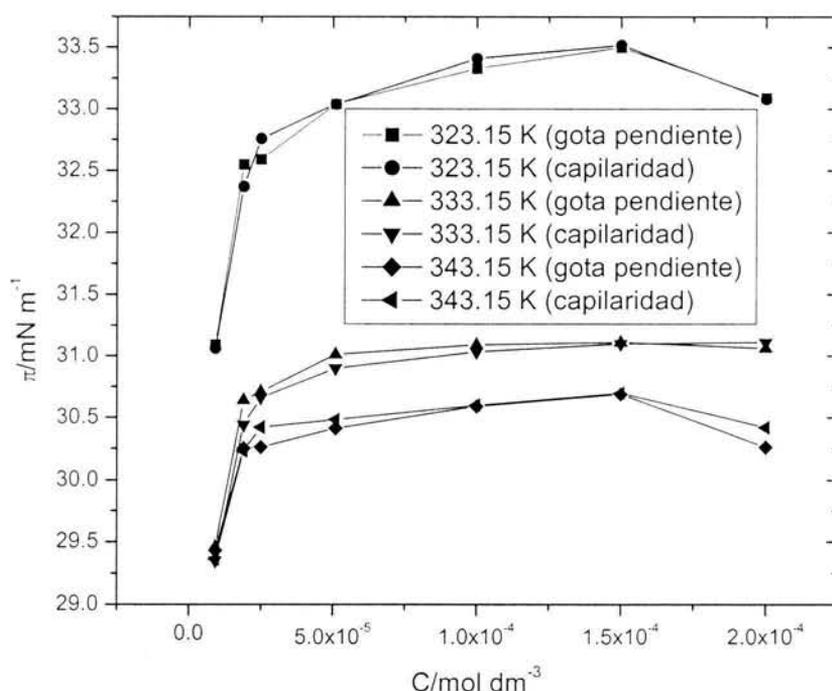


Figura 4.18. Presión superficial de brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de concentración y la temperatura.

La Tabla 4.20 muestra la tensión superficial de equilibrio del sistema surfínol 485 + DEA acuosa al 20 % masa, a las temperaturas de 323.15, 333.15 y 343.15 K. Las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21 muestran la presión superficial en función de la concentración del tensoactivo. Se observa que la presión superficial aumenta cuando aumenta la concentración del tensoactivo. Los valores indican que el Surfínol 485 tiene una actividad superficial menor

que el Brij 92. Los valores de presión superficial del Brij 92 son de 27.5, 26.5 y 26.0 mN m⁻¹ a 323.15, 333.15 y 343.15 K y los Surfínoil 485 son de 33.5, 31.0 y 30.5 mN m⁻¹ a las mismas temperaturas.

Tabla 4.20. Tensión superficial de equilibrio del surfínoil 485 en DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración y la temperatura.

10 ⁴ C/mol dm ⁻³	γ /mN m ⁻¹		
	323.15 K	333.15 K	343.15 K
0	60.55	58.02	57.11
0.0742	48.86	46.43	44.89
1.80	45.04	44.15	42.3
4.11	42.11	41.16	39.85
7.87	39.72	38.62	37.03
13.5	37.44	36.51	34.94
18.8	35.94	35.23	33.76
26.0	34.69	33.74	32.05
32.9	33.64	33.08	31.6
38.2	33.5	32.55	31.23

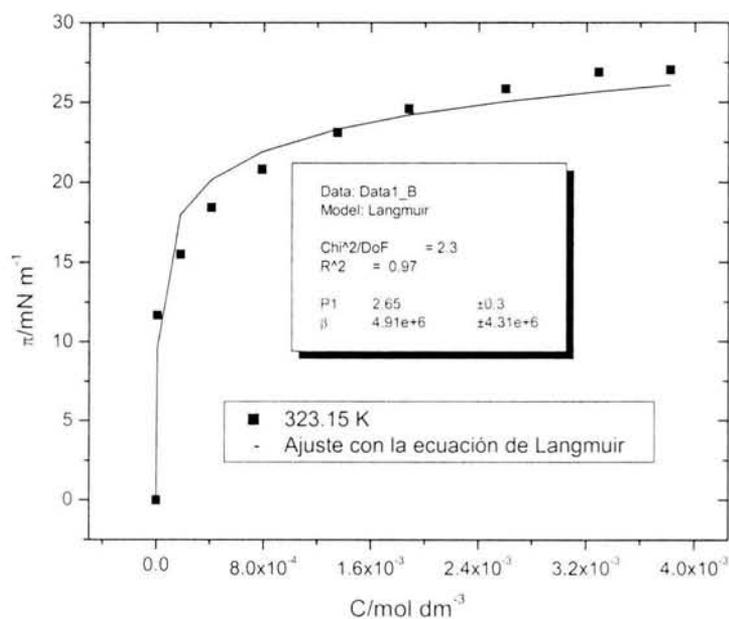


Figura 4.19. Presión superficial del surfínoil 485 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 323.15 K.

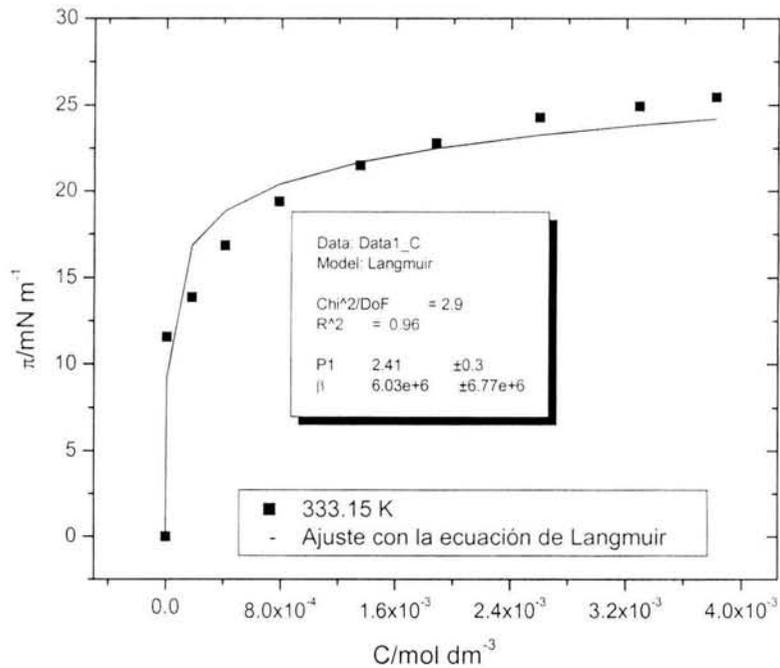


Figura 4.20. Presión superficial del surfínol 485 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 333.15 K.

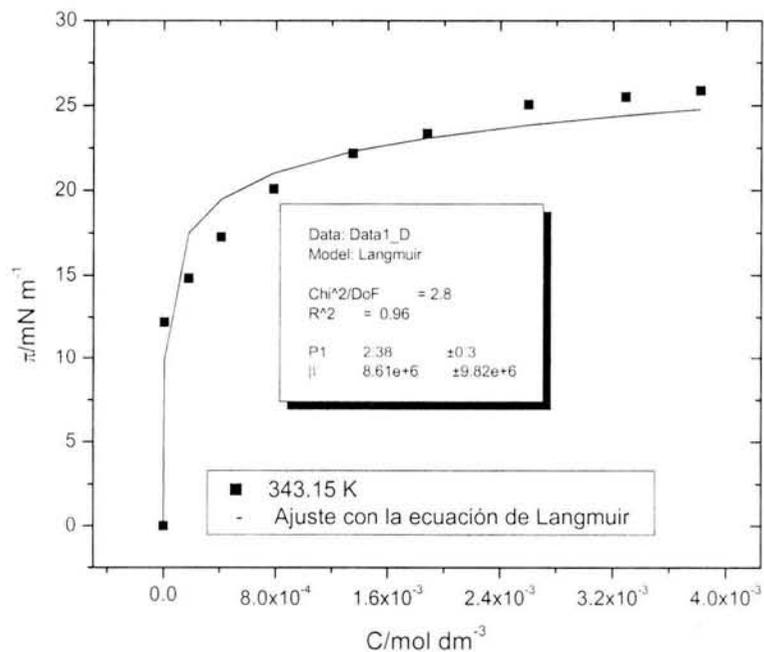


Figura 4.21. Presión superficial del surfínol 485 en DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 343.15 K.

La Tabla 4.21 muestra la tensión superficial de equilibrio del sistema Surfíno 485 + MDEA acuosa al 20 % masa, a las temperaturas de 323.15, 333.15 y 343.15 K. Las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 muestran la presión superficial en función de la concentración del tensoactivo. La presión superficial en el sistema Surfíno 485 + MDEA es menor que en el sistema Surfíno 485 + DEA. Esto indica que el Surfíno 485 en MDEA su actividad superficial es menor.

Tabla 4.21. Tensión superficial de equilibrio del surfíno 485 en MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 \text{ C/mol dm}^{-3}$	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$		
	323.15 K	333.15 K	343.15 K
0	52.73	51.18	49.63
0.0821	47.48	46.71	44.5
1.86	45.68	44.89	43.45
4.14	43.15	42.33	41.29
7.76	41.77	40.05	39.38
15.4	38.92	37.69	37.22
18.8	38.39	37.16	36.73
21.5	38.32	36.79	36.25
25.8	37.34	36.32	35.81
28.8	36.86	35.98	35.3

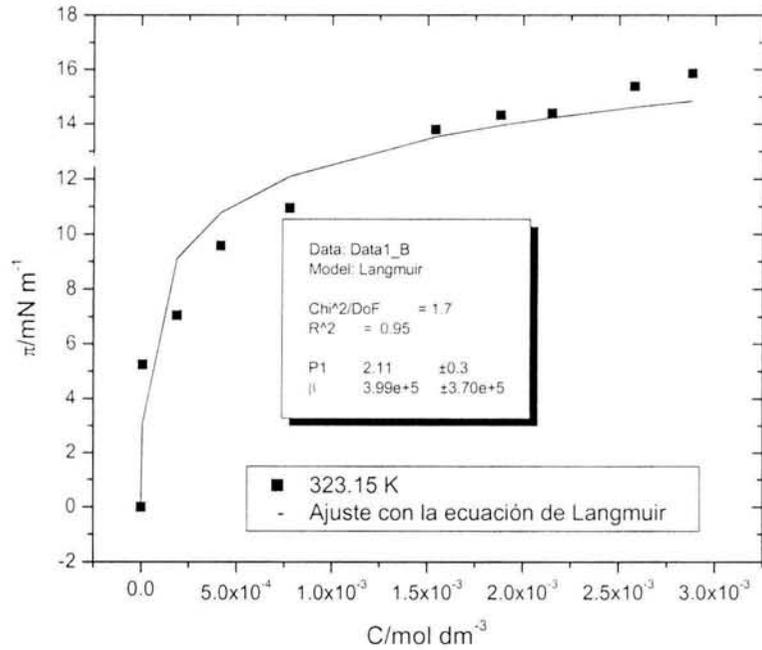


Figura 4.22. Presión superficial de equilibrio del surfínol 485 + MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 323.15 K.

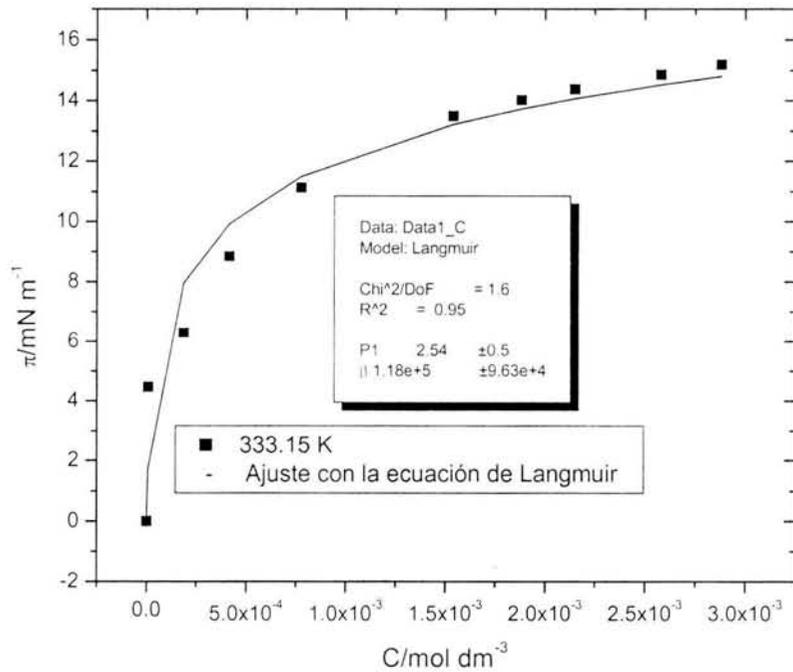


Figura 4.23. Presión superficial de equilibrio del surfínol 485 + MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 333.15 K.

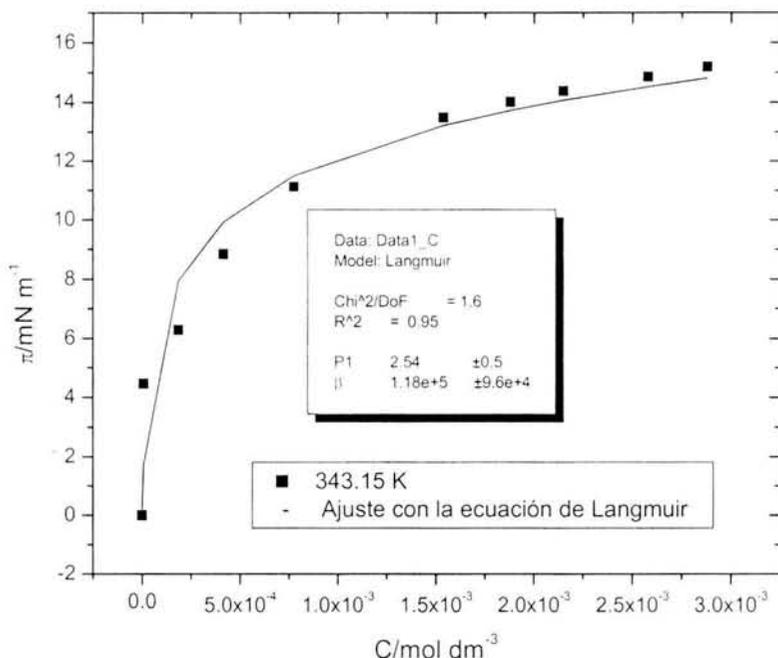


Figura 4.24. Presión superficial de equilibrio del surfínol 485 + MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 343.15 K.

La actividad superficial del Brij 92 es mayor que del Span 20, Span 80 y el Surfínol 485. La tensión superficial del Brij 92 en el sistema DEA al 20 % masa es mucho menor que los otros tensoactivos. Esto indica que el Brij 92 será un buen candidato para el control de la espuma que se genera en las plantas de endulzamiento de corrientes gaseosas. La ecuación de Langmuir correlacionó adecuadamente los valores experimentales.

IV.5. Tensión superficial de equilibrio de sistemas multicomponentes: Brij 92, Tween 80, Surfínol DF110-D, Surfínol 485 y Ocenol + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua).

Otra contribución sumamente importante en el presente trabajo doctoral fue estudiar la tensión superficial de equilibrio de mezclas acuosas de dos aminas, cuya composición es MDEA/DEA (45 % masa de amina total con la siguiente relación: 32.5 % masa de MDEA, 12.5 % masa de DEA y 55 % masa de agua) + un tensoactivo no iónico, con la finalidad de conocer sus propiedades de superficie y correlacionarlas con el índice de estabilidad de

espuma, para su posible aplicación en las plantas de endulzamiento. Se utilizó el método de gota pendiente y se empleó la ecuación de Langmuir para ajustar la presión superficial en función de la concentración del tensoactivo.

La Tabla 4.22 contiene la tensión superficial de equilibrio del sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K. Las Figuras 4.25 y 4.26 muestran la presión superficial en función de la concentración. La presión superficial aumenta cuando aumenta la concentración del tensoactivo y alcanza un valor de 20 mN m^{-1} a 313.15 y disminuye al aumentar la temperatura.

Tabla 4.22. Tensión superficial de equilibrio del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 \text{ C/mol dm}^{-3}$	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	
	313.15 K	323.15 K
0	50.83	49.19
1.27	49.64	43.02
6.44	42.39	41.04
11.6	37.16	37.83
15.1	34.66	34.16
17.6	33.33	33.15
20.6	32.44	30.22
24.7	30.31	29.82
29.3	30.31	29.82
35.5	30.31	29.82

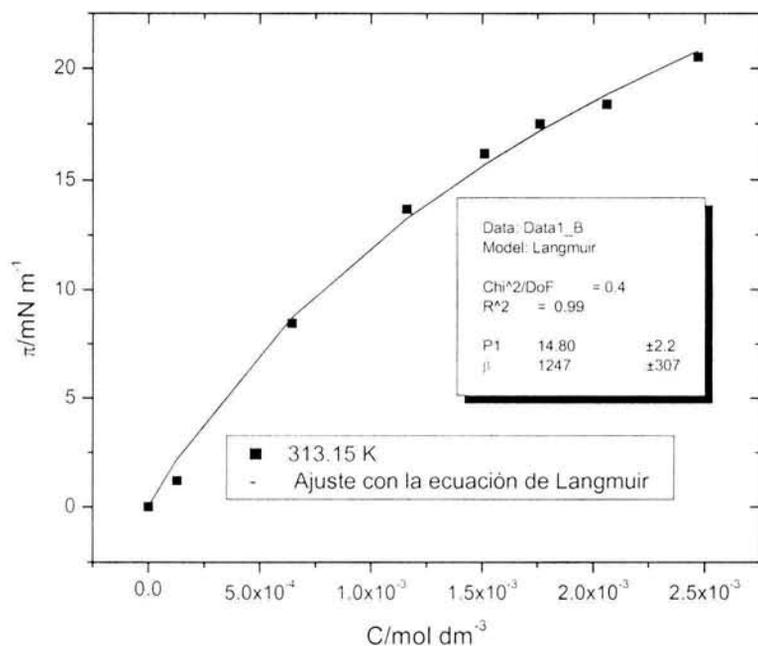


Figura 4.25. Presión superficial de equilibrio del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

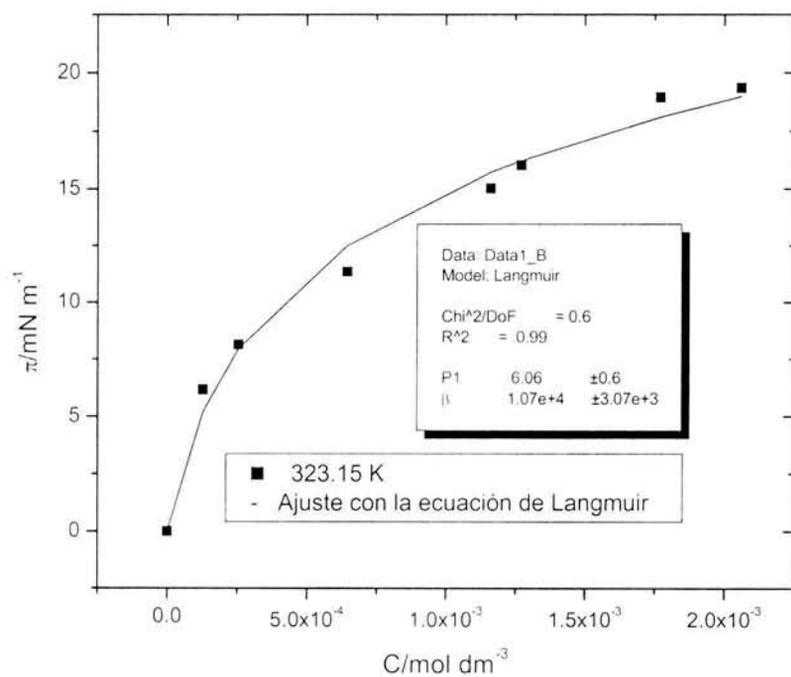


Figura 4.26. Presión superficial de equilibrio del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

La Tabla 4.23 muestra la tensión superficial de equilibrio del sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K. La Figura 4.27 y 4.28 muestran la presión superficial en función de la concentración. Se observa que la presión superficial aumenta cuando aumenta la concentración del tensoactivo. El Tween 80 tiene una actividad superficial menor que Brij 92 ya que sus valores de presión superficial son de 18 y de 17.5 mN m⁻¹ a 313.15 y 323.15 K, respectivamente.

Tabla 4.23. Tensión superficial de equilibrio del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

10 ⁴ C/mol dm ⁻³	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	
	313.15 K	323.15 K
0	50.83	49.19
5.29	41.28	38.13
5.76	40.89	35.77
6.09	40.37	34.7
7.85	38.46	34.49
8.34	38.19	33.22
8.81	37.73	32.36
9.84	36.46	32.35
11.6	34.25	32.36
13.0	32.80	32.34
14.7	32.80	32.31
20.0	32.80	

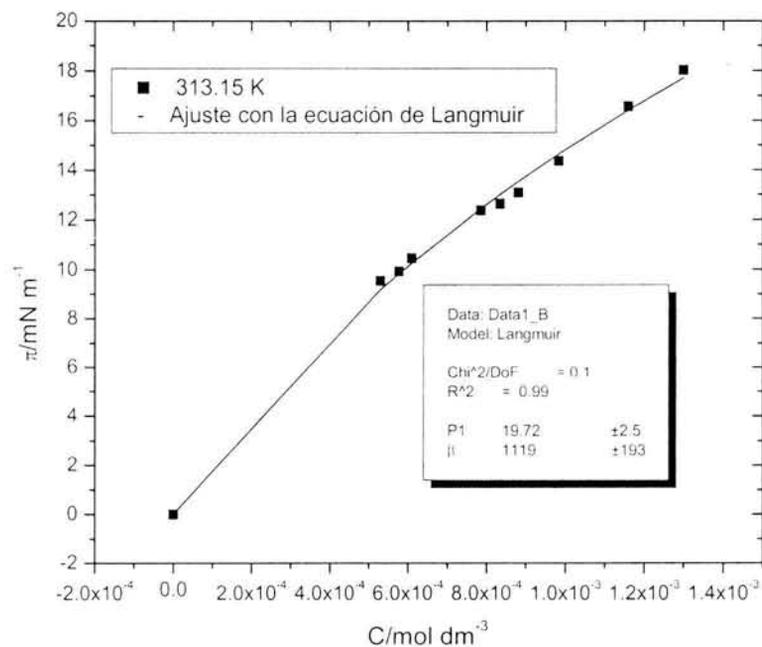


Figura 4.27. Presión superficial de equilibrio del tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

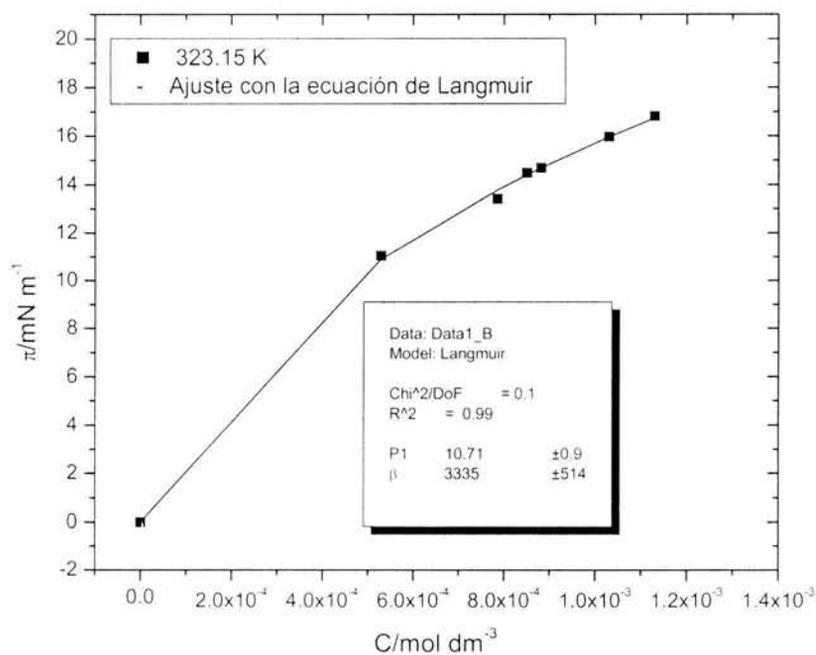


Figura 4.28. Tensión superficial de equilibrio del tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

Las Tablas 4.24 y 4.25 muestran la tensión superficial de equilibrio del sistema Surfíno 485 + MDEA/DEA acuosa y del Surfíno DF-110D + MDEA/DEA acuosa, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K. Las Figuras 4.29 a 4.32 muestran la presión superficial en función de la concentración. Como se observa, la presión superficial aumenta cuando aumenta la concentración del tensoactivo. El surfíno 485 tiene una actividad superficial menor que el Tween 80, que el Surfíno DF110-D y que el Brij 92. Los valores de su presión superficial son de 9.5 y 8.5 mN m⁻¹ a 313.15 y 323.15 K, respectivamente contra 18 y 14 mN m⁻¹ para el Surfíno DF110-D, a las mismas temperaturas.

Tabla 4.24. Tensión superficial de equilibrio del surfíno 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

10 ⁴ mol dm ⁻³	$\gamma/\text{m N m}^{-1}$		
	313.15 K	10 ⁴ mol dm ⁻³	323.15
0	50.83	0	49.19
0.15	49.73	0.146	49.37
0.86	48.84	0.439	48.46
1.88	47.67	1.88	46.60
3.23	46.52	3.23	45.09
4.39	45.69	4.39	44.60
8.09	44.42	8.09	43.24
19.00	41.52	19.00	40.89

Tabla 4.25. Tensión superficial de equilibrio del surfíno DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

10 ⁴ mol dm ⁻³	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$		
	313.15 K	10 ⁴ mol dm ⁻³	323.15 K
0	50.83	0	49.19
1.65	48.58	6.69	46.29
6.69	45.40	8.47	43.82
9.08	43.77	9.08	43.79
16.1	41.56	16.1	41.77
21.1	39.40	21.1	39.86
33.0	37.51	33.0	38
49.1	35.45	49.1	35.85

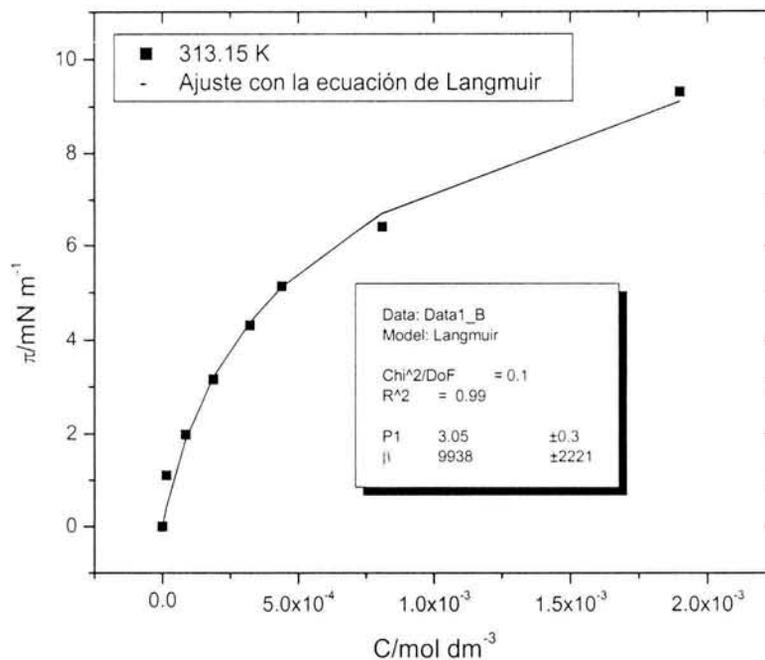


Figura 4.29. Presión superficial de equilibrio del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

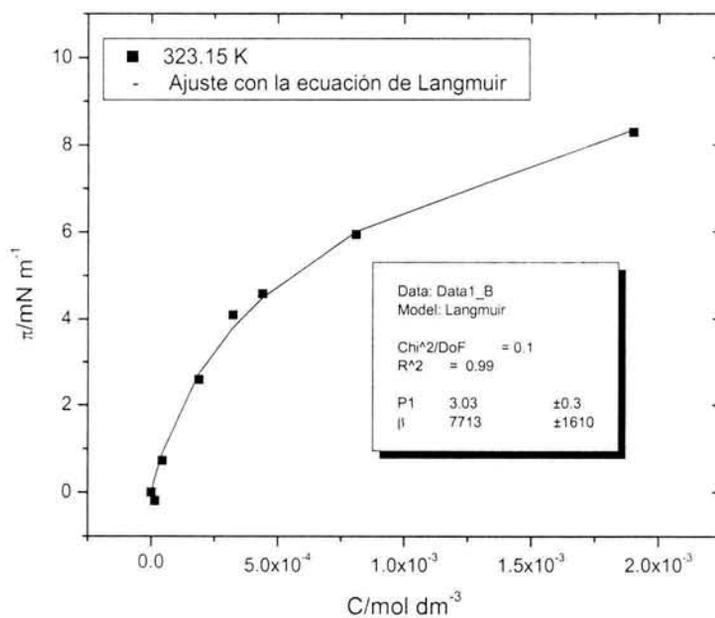


Figura 4.30. Tensión superficial de equilibrio del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

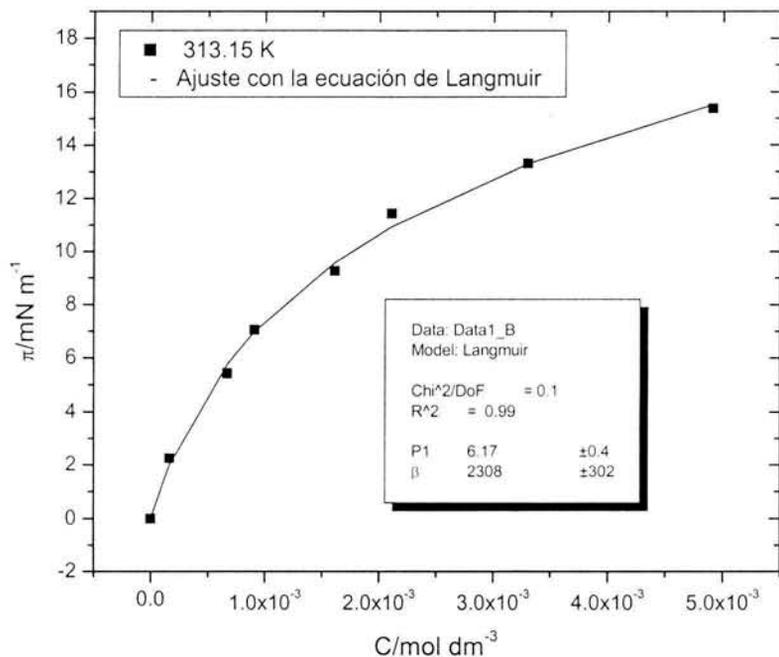


Figura 4.31. Presión superficial de equilibrio del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

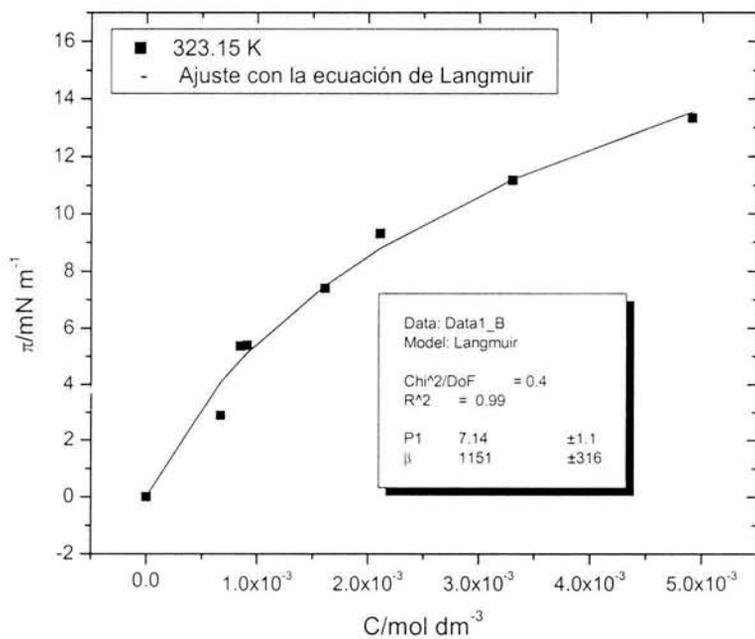


Figura 4.32. Presión superficial de equilibrio del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

La Tabla 4.26 muestra la tensión superficial de equilibrio del sistema ocnol + MDEA/DEA acuosa, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K. Las Figuras 4.33 y 4.34 muestran la presión superficial en función de la concentración. Como se observa, la presión superficial aumenta cuando aumenta la concentración del tensoactivo y disminuye al aumentar la temperatura. Los valores de presión superficial son muy cercanos al del Brij 92. La presión superficial del ocnol, a 313.15 K es de 19.5 mN m⁻¹ contra 20 mN m⁻¹ del Brij 92 y de 18.5 mN m⁻¹ contra 19.5 mN m⁻¹ a 323.15. Estos valores ponen en evidencia porque el ocnol es utilizado en las plantas de endulzamiento para el control de la espuma, es decir, con una tensión superficial de este orden la espuma es pequeña.

Tabla 4.26. Valores experimentales de tensión superficial de equilibrio del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

10 ⁴ C/mol dm ⁻³	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	
	313.15 K	323.15 K
0	50.83	49.19
1.15	49.45	47.9
3.04	48.51	46.6
7.03	42.66	41.48
8.93	38.74	38.01
10.5	36.49	35.71
13.0	33.58	33.26
14.8	31.81	31.15
21.3	31.72	31.13

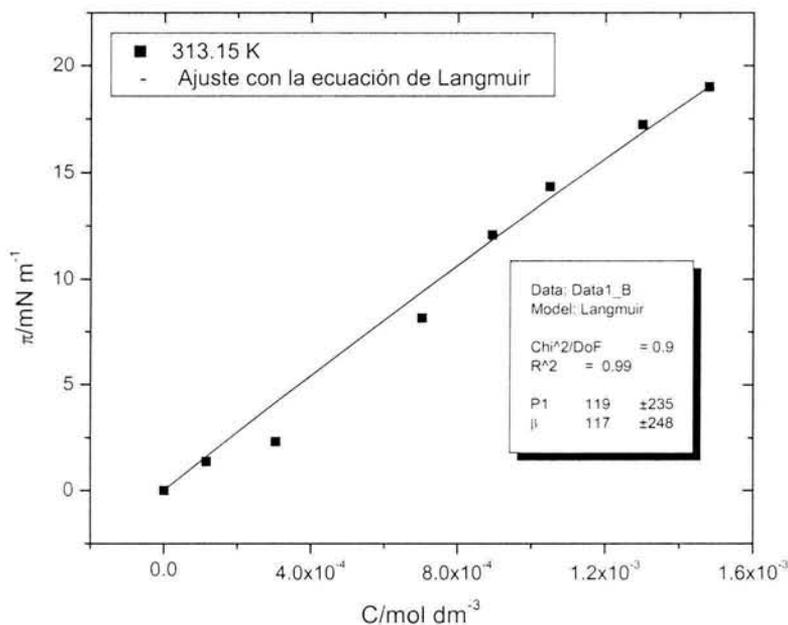


Figura 4.33. Presión superficial de equilibrio del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

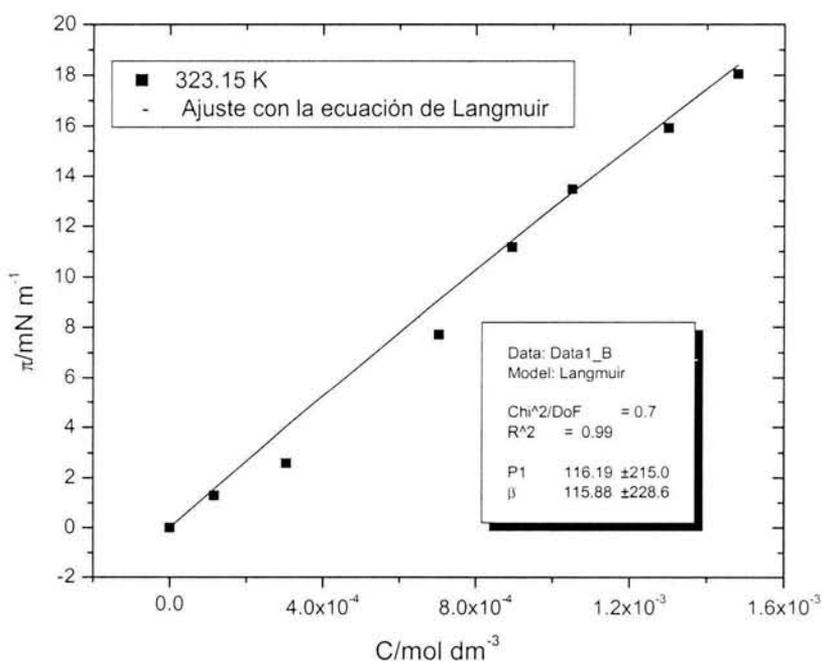


Figura 4.34. Presión superficial de equilibrio del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

Aquí concluye la determinación de la tensión superficial de equilibrio de componentes puros, sistemas binarios, sistemas ternarios y de sistemas multicomponentes. De estos resultados, se observa que el Brij 92 disminuye la tensión superficial más que el Span 20, Span 80, Tween 80, Surfínol 485 y Surfínol DF110-D, por tener una actividad superficial mayor que éstos tensoactivos. Además, sus propiedades de superficie son similares al del ocnol que actualmente se utiliza para controlar la espuma en las plantas de endulzamiento, por lo que, se puede concluir que el Brij 92 puede sustituir al ocnol y ser utilizado en dichas plantas. Asimismo, la ecuación de Langmuir fue capaz de correlacionar satisfactoriamente los valores experimentales.

IV.6. Índice de estabilidad y volumen de la espuma de sistemas binarios: DEA + agua y MDEA + agua

En esta sección se presentan valores experimentales del volumen y la estabilidad de espuma de sistemas binarios y multicomponentes para analizar la situación fisicoquímica de las propiedades de las espumas. Se observó, que la fisicoquímica del sistema cambia en función de la concentración y la temperatura y la naturaleza del agente antiespumante. El interés en este estudio fue conocer la cantidad de espuma producida en la solución y su persistencia con el tiempo. Para este estudio se empleó un espumómetro de vidrio que opera bajo el método del flujo continuo de gas.

Las Tablas 4.27 y 4.28 y Figuras 4.35 y 4.36 muestran el índice de estabilidad y del volumen de la espuma del sistema DEA + agua, en el intervalo de temperatura de 313.15 a 343.15 K. Al aumentar la concentración y la temperatura el índice de estabilidad y el volumen de la espuma disminuyen.

Tabla 4.27. Índice de estabilidad de espuma de DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

C/Mol dm ⁻³	Σ/s			
	313.15 K	323.15 K	333.15 K	343.15 K
0.95	10.91	9.96	8.56	6.84
1.92	10.57	9.59	7.93	6.63
2.91	9.95	9.23	7.34	5.67
3.92	9.16	8.10	4.94	3.67
4.97	8.22	5.99	3.45	1.58

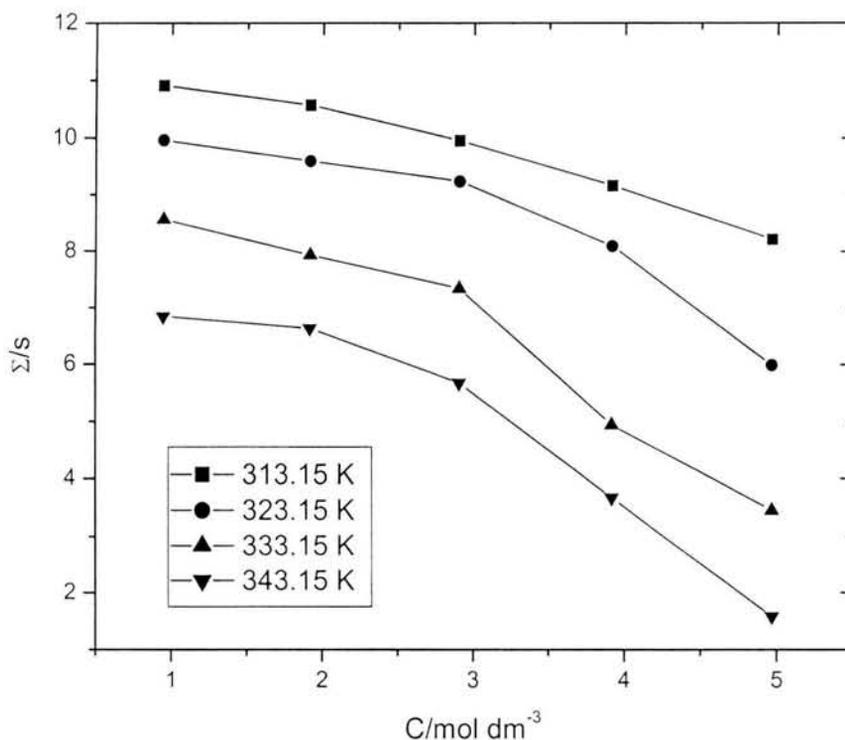


Figura 4.35. Índice de estabilidad de espuma de DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.35 muestra el índice de estabilidad de espuma del sistema DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura. A baja concentración (a cualquier temperatura), la espuma es mayor y va disminuyendo conforme aumenta la concentración. A la concentración de 0.95 mol dm^{-3} , a las cuatro temperaturas estudiadas, los valores en el índice de estabilidad de espuma son de 10.91, 9.96, 8.56, y 6.84 segundos, donde la tensión superficial del agua es de 69.33, 67.93, 66.07 y 64.35 mN m^{-1} , y de la DEA al 10 % masa son de 64.69, 63.12, 59.65 y 58.36 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 4.64, 4.81, 6.42 y 5.99 mN m^{-1} , respectivamente. Estos resultados indican que la DEA disminuye muy poco la tensión superficial del agua, su actividad superficial es pequeña, mostrando tiempos de permanencia grandes, ya que en este estudio lo que buscamos es que los tiempos de permanencia y volumen de la espuma sen pequeños o que no formen espuma.

Tabla 4.28. Volumen de la espuma de DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

C/Mol dm ⁻³	Volumen de la espuma/cm ³			
	313.15 K	323.15 K	333.15 K	343.15 K
0.95	111.21	101.6	87.37	69.77
1.92	107.84	97.85	81.8	67.66
2.91	101.55	94.19	74.86	57.8
3.92	93.44	82.63	50.35	37.44
4.97	83.87	61.07	35.19	16.09

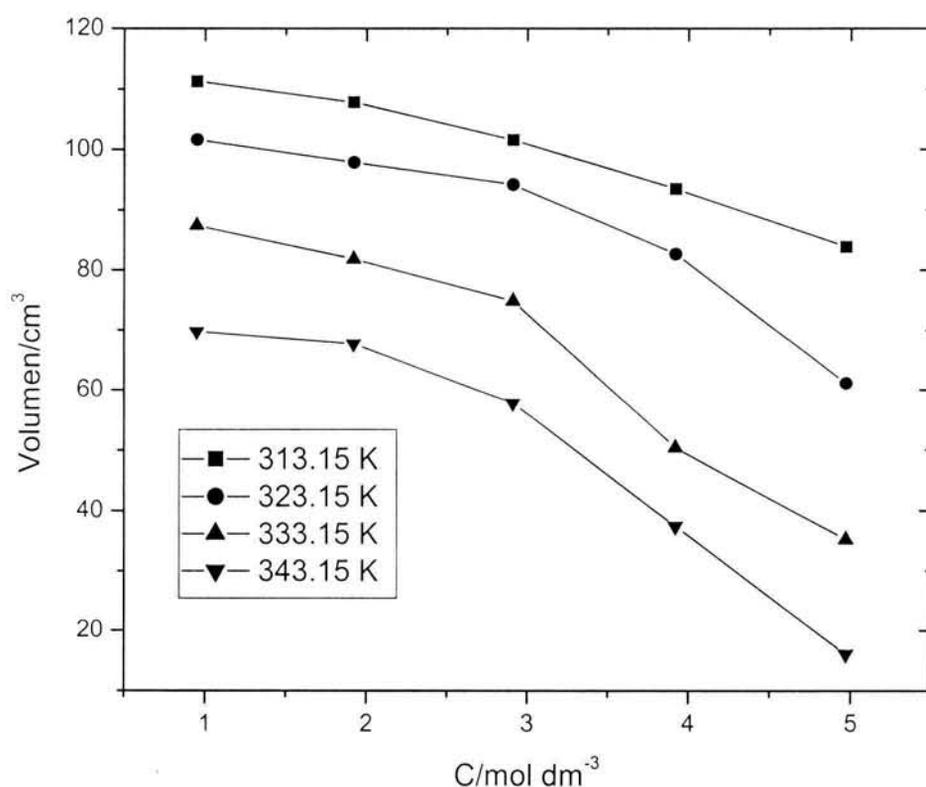


Figura 4.36. Volumen de la espuma de DEA + agua, en función de la concentración y temperatura.

Las Tablas 4.29 y 4.30 y Figuras 4.37 y 4.38 muestran el índice de estabilidad y el volumen de la espuma para el sistema MDEA + agua, en el intervalo de temperatura de 313.15 a 343.15 K. Al aumentar la concentración y la temperatura el índice de estabilidad y el volumen de la espuma disminuyen.

Tabla 4.29. Índice de estabilidad de espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

C/Mol dm ⁻³	Σ/s			
	313.15 K	323.15 K	333.15 K	343.15 K
0.845	9.26	8.28	6.68	4.40
1.69	8.66	7.52	6.57	4.20
2.55	8.17	7.26	6.28	4.00
3.42	7.16	6.59	5.92	3.31
4.32	4.94	3.91	3.43	1.47

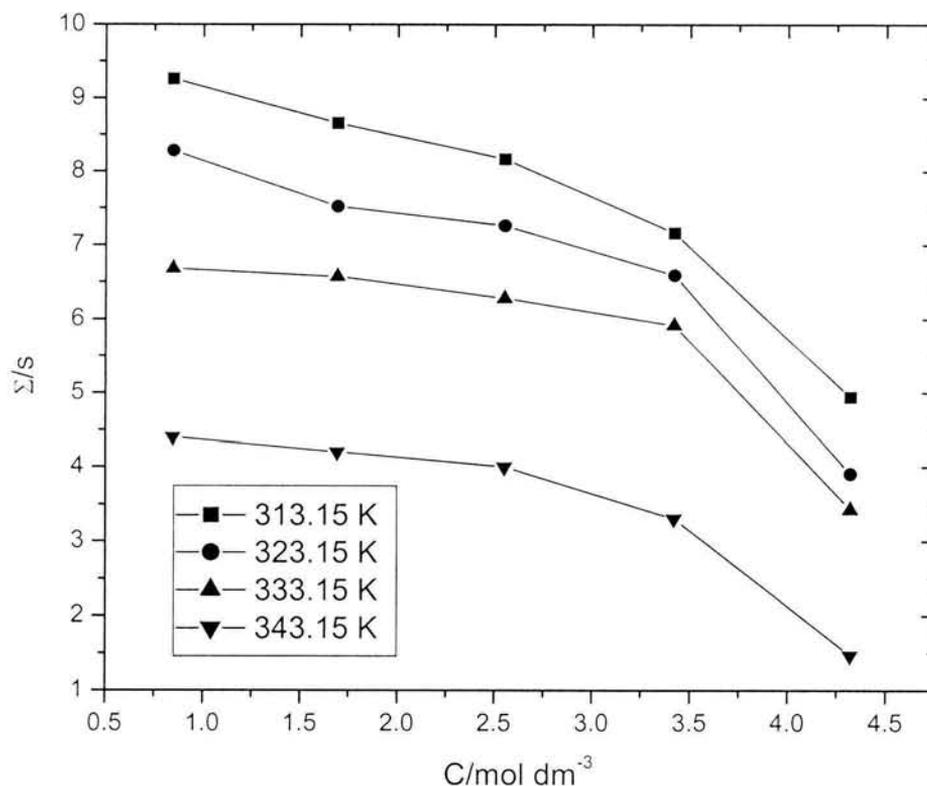


Figura 4.37. Índice de estabilidad de espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.37 muestra el comportamiento del índice de estabilidad de espuma del sistema MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura. A la concentración de 0.85 mol dm⁻³, a las cuatro temperaturas estudiadas, los valores del índice de estabilidad de espuma son de 9.26, 8.28, 6.68, y 4.40 segundos, donde la tensión superficial del agua son de 69.33, 67.93, 66.07 y 64.35 mN m⁻¹ y de la MDEA al 10 % masa son de 57.50, 55.58,

53.50 y 52.44 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 11.83, 12.35, 12.57 y 11.91 mN m^{-1} , respectivamente. La MDEA disminuye más la tensión superficial del agua, su actividad superficial es mayor que la DEA, su permanencia y volumen de espuma son menores que la DEA, es decir, entre mayor se disminuya la tensión superficial, se tiene un gradiente mayor, el volumen y la estabilidad de espuma son menores. La MDEA es mejor antiespumante que la DEA.

Tabla 4.30. Volumen de la espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

C/Mol dm^{-3}	Volumen de la espuma/ cm^3			
	313.15 K	323.15 K	333.15 K	343.15 K
0.845	94.45	84.52	68.11	44.86
1.69	88.35	76.72	67.01	42.88
2.55	83.30	74.03	64.09	40.86
3.42	73.08	67.24	60.47	33.77
4.32	50.36	39.87	35.01	15.00

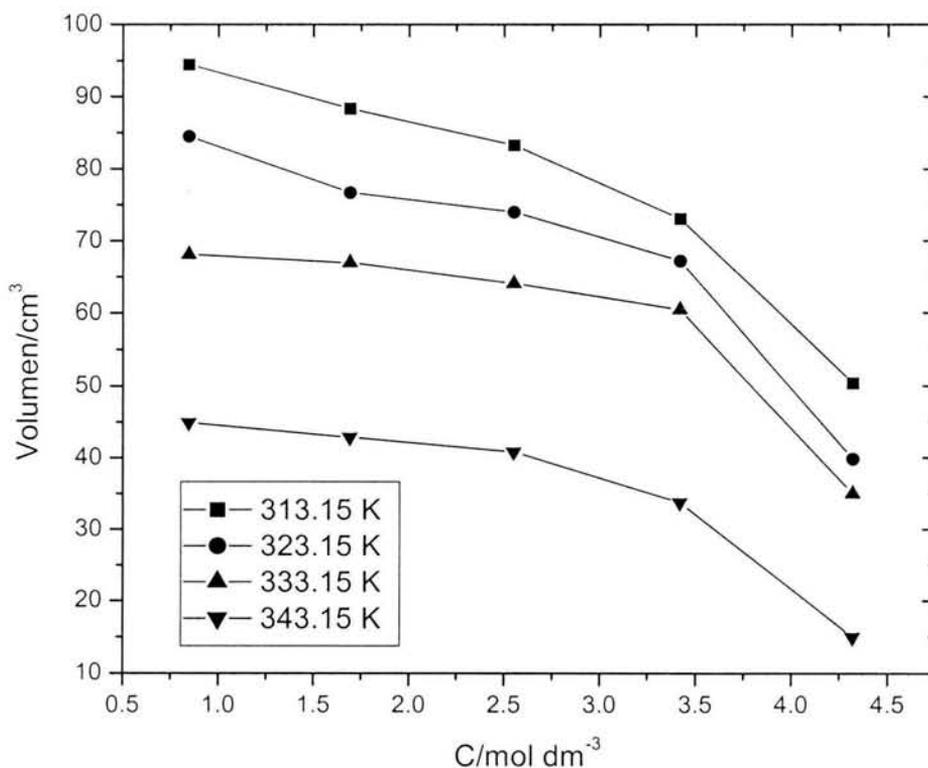


Figura 4.38. Volumen de la espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

Se puede decir, que con una pequeña concentración de seudotensoactivo (DEA ó MDEA) se puede modificar la viscosidad de bulto o superficial y la elasticidad superficial. La DEA posee una viscosidad de bulto mucho mayor que la MDEA (Tabla 4.1a) y tal vez la viscosidad superficial en la mezcla DEA + agua se incrementa mucho en la región diluida de la amina en forma similar que lo haría un tensoactivo (Figura 1.8, capítulo I), provocando una mayor estabilidad de espuma. Por otro lado, al mezclar las dos aminas MDEA/DEA al 45 % masa de amina total (32.5 % masa de MDEA, 12.5 % masa de DEA, y 55 % masa de agua), la estabilidad de la espuma disminuye a 6.92 segundos, a la temperatura de 313.15 K y 6.83 segundos, a 323.25 K, lo cual es bueno para los fines que se persiguen en este trabajo, es decir, encontrar un sistema que no forme espuma.

IV.7. Índice de estabilidad y volumen de la espuma de sistemas multicomponentes: Brij 92, SurfínoI DF110-D, SurfínoI 485 y Ocenol + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua)

Fue necesario determinar el índice de estabilidad de espuma del Brij 92, SurfínoI 485, SurfínoI DF110-D y del Ocenol en MDEA/DEA acuosa(45 % masa de amina total con la siguiente relación: 32.5 % masa de MDEA, 12.5 % masa de DEA y 55 % masa de agua), a 313.15 y 323.15 K. Para este estudio también se empleó el espumómetro de vidrio que opera bajo el método del flujo continuo de gas.

Las Tablas 4.31 y 4.32 y Figuras 4.39 y 4.40 muestran el índice de estabilidad y el volumen de la espuma para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K. Al aumentar la concentración y la temperatura el índice de estabilidad y el volumen de espuma disminuyen.

Tabla 4.31. Índice de estabilidad de espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 \text{ C/mol dm}^{-3}$	Σ/s	
	313.15 K	323.15 K
1.27	0.97	1.45
2.06	1.04	1.46
6.44	1.65	1.40
11.6	2.43	1.30
15.1	2.77	1.22
20.6	1.62	0.84
35.5	1.53	0.79

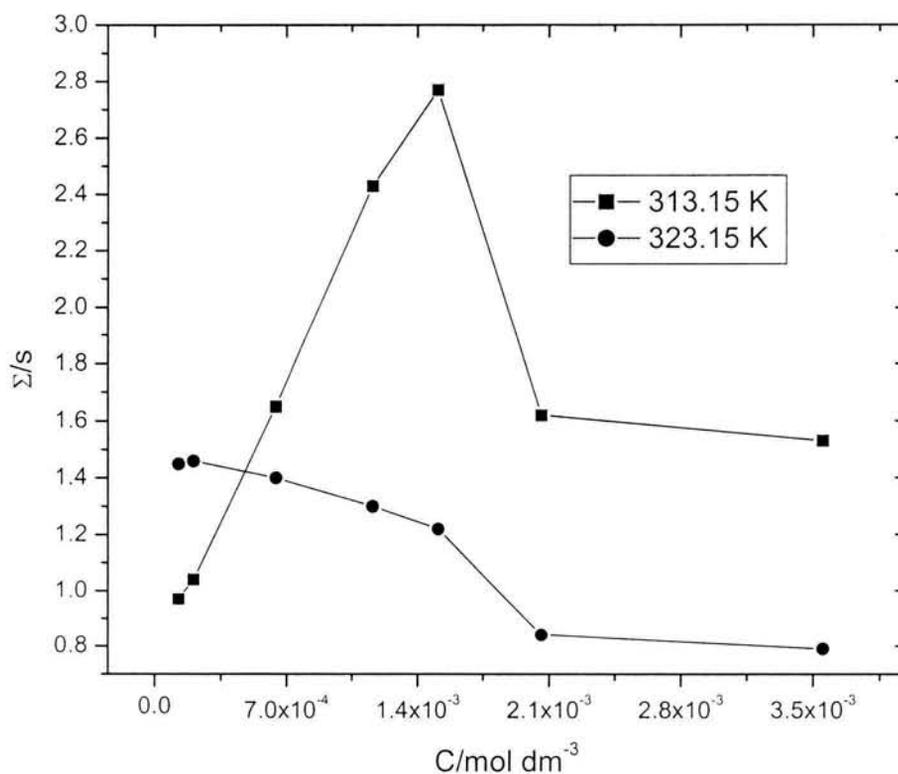


Figura 4.39. Índice de estabilidad de espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.39 muestra el índice de estabilidad de espuma del sistema Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura. A 313.15 K es el comportamiento típico que se obtiene al estudiar tensoactivos en agua (ver Figura 1.8 del capítulo I; Patist, et al., 1998). Al aumentar la concentración la estabilidad de la espuma

aumenta hasta que alcanza un máximo de estabilidad en 2.77 segundos a la concentración de $1.51 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$, donde la tensión superficial a esa concentración es de 34.66 mN m^{-1} y de la mezcla MDEA/DEA acuosa es de 50.83 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 16.17 mN m^{-1} . Mientras que a la temperatura de 323.15 K, el máximo de estabilidad de espuma alcanzado es de 1.46 segundos a la concentración de $2.06 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, donde la tensión superficial a esa concentración es de 42.00 mN m^{-1} y de la mezcla MDEA/DEA acuosa es de 49.19 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 7.19 mN m^{-1} . Estos resultados son excelentes, porque la permanencia de la espuma es muy pequeña, generando un volumen de espuma muy pequeño. El brij 92 tiene una actividad superficial grande y una viscosidad de bulto pequeña.

Tabla 4.32. Volumen de la espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 \text{ C/mol dm}^{-3}$	V/cm^3	
	313.15 K	323.15 K
1.27	9.9	14.8
2.06	9.7	14.9
6.44	16.8	14.3
11.6	24.7	13.3
15.1	28.3	13.1
20.6	16.5	8.6
35.5	15.6	8.1

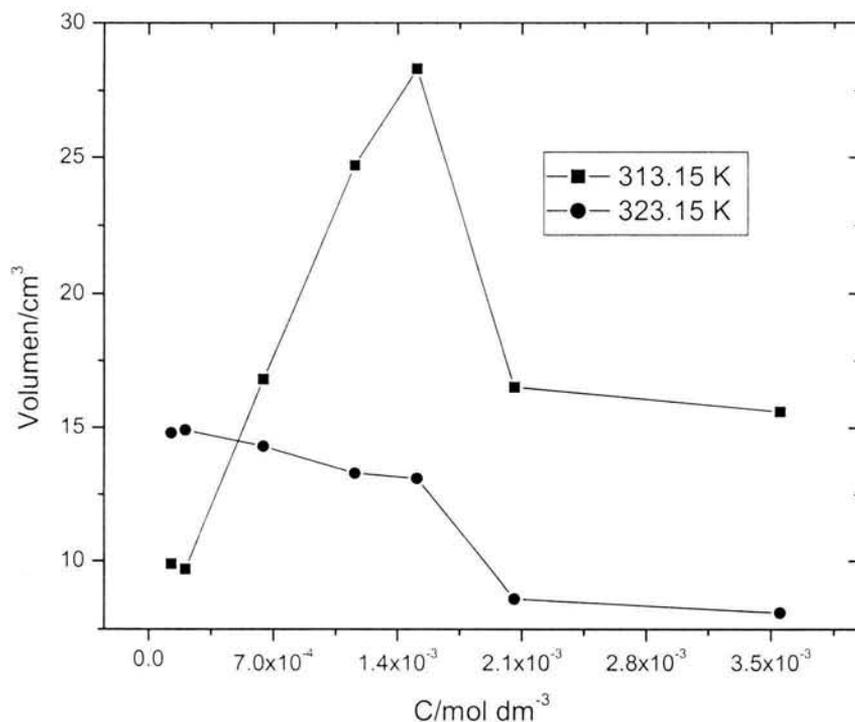


Figura 4.40. Volumen de la espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

Las Tablas 4.33 y 4.34 y Figuras 4.41 a 4.44 muestran el índice de estabilidad y el volumen de la espuma del sistema Surfínoil 485 y Surfínoil DF110-D en MDEA/DEA acuosa, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K. En el sistema surfínoil 485 al aumentar la concentración y la temperatura el índice de estabilidad y el volumen de la espuma disminuyen. En el sistema surfínoil DF-110D el índice de estabilidad y el volumen de la espuma se hace más grande al aumentar la temperatura. La solubilidad del surfínoil DF110-D decrece con el incremento de la temperatura, así a mayor temperatura su actividad superficial es más débil (Rosen, 1978). Para corroborar este comportamiento se estudió la concentración de 2.11×10^{-3} mol dm^{-3} a 303.15 y 333.15 K, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.33. Efectivamente, el índice de estabilidad de espuma es menor a 303.15 K que a 333.15 K. Además, la permanencia de la espuma tiene el siguiente orden: Surfínoil 485 > Surfínoil DF110-D > Brij 92, el cual ésta en concordancia con la actividad superficial de cada uno de ellos.

Tabla 4.33. Índice de estabilidad de espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^5 C/\text{mol dm}^{-3}$	Σ/s	
	313.15 K	323.15 K
1.57	8.32	7.74
15.6	13.95	14.10
26.6	20.09	21.51
39.5	21.39	21.68
61.3	21.58	21.62

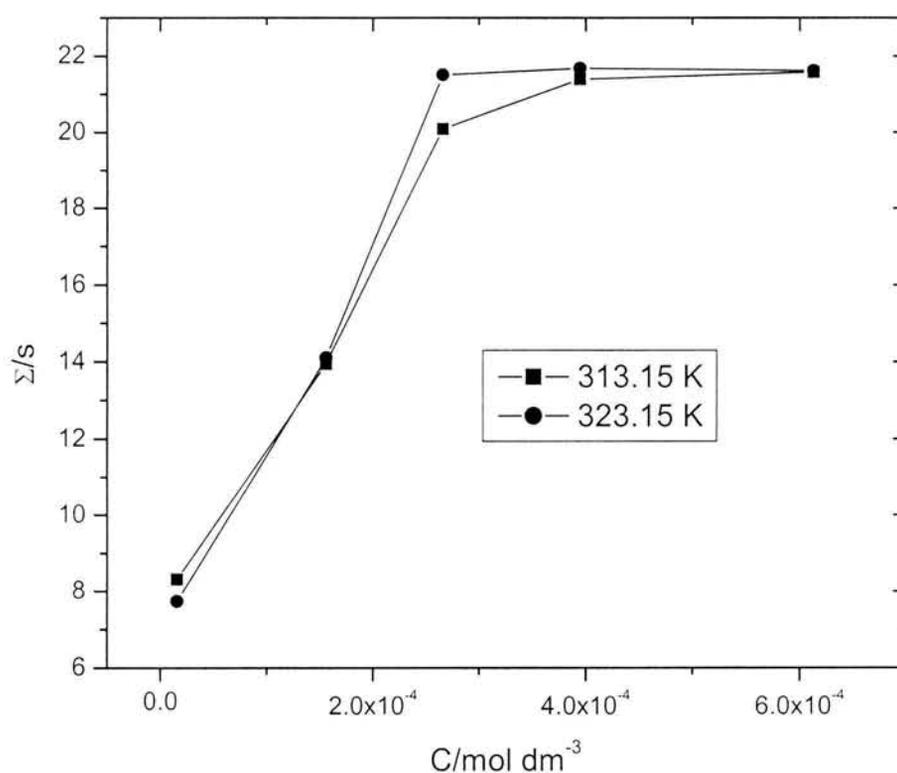


Figura 4.41. Índice de estabilidad de espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.41 muestra el índice de estabilidad de espuma del sistema surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura. Los resultados a 313.15 K, muestran un máximo de 20.30 segundos a la concentración de $3.00 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, en donde la tensión superficial a esa concentración es de 47.10 mN m^{-1} y de la mezcla acuosa MDEA/DEA es de 50.83 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 3.73 mN m^{-1} . Mientras que a la temperatura de 323.15 K, el máximo de estabilidad de

espuma es de 21.70 segundos a la concentración de $2.79 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, en donde la tensión superficial a esa concentración es de 46.10 mN m^{-1} y de la mezcla acuosa MDEA/DEA es de 49.19 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 3.09 mN m^{-1} . Se puede ver, que el gradiente en la tensión superficial es pequeño, entonces el volumen de la espuma es grande.

Tabla 4.34. Volumen de la espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^5 \text{ C/mol dm}^{-3}$	V/cm ³	
	313.15 K	323.15 K
1.57	84.9	78.9
15.6	142.3	143.8
26.6	204.9	219.4
39.5	218.2	221.1
61.3	220.1	220.5

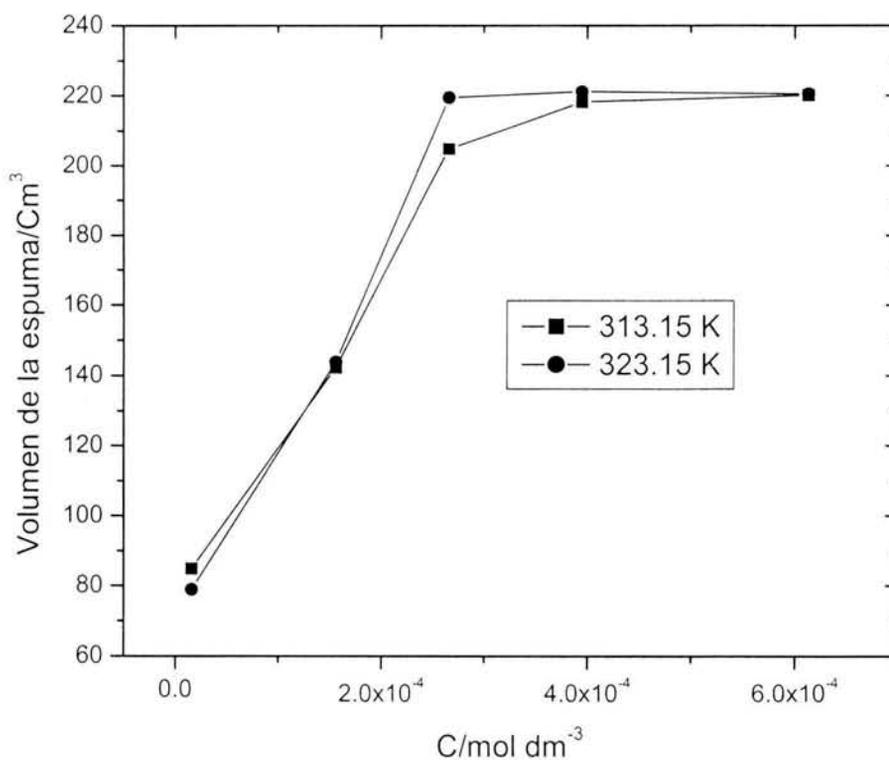


Figura 4.42. Volumen de la espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

Tabla 4.35. Índice de estabilidad de espuma del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 C/\text{mol dm}^{-3}$	Σ/s			
	303.15 K	313.15 K	323.15 K	333.15 K
1.65		8.63	9.42	
6.69		9.22		
9.08		9.89	12.99	
13.4		9.62	12.62	
16.1		9.32	12.50	
21.1	6.66	8.29	11.87	15.03
33.0		7.80	10.36	
49.1		7.61	9.49	

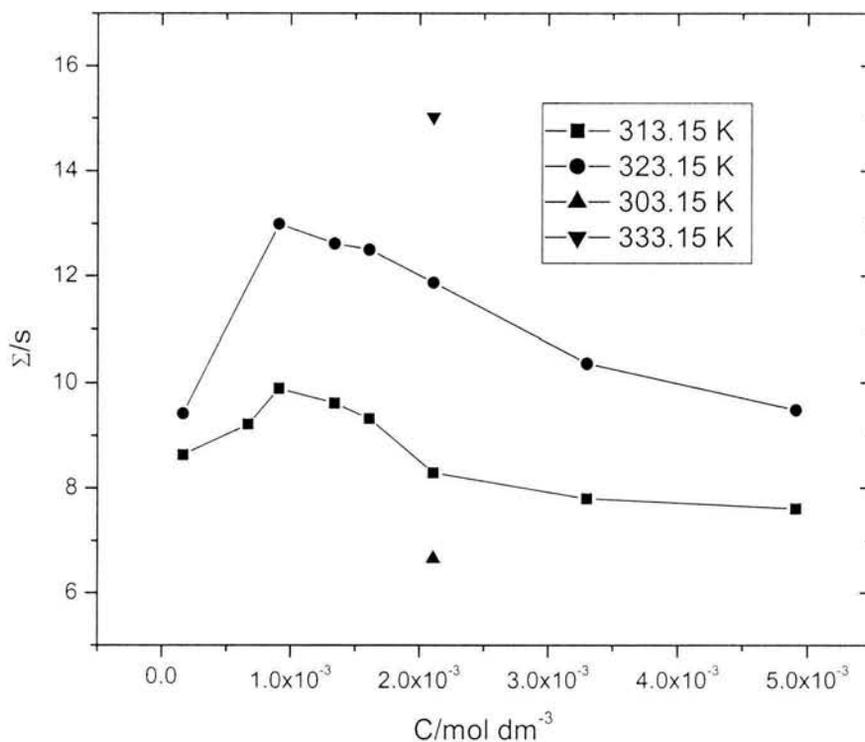


Figura 4.43. Índice de estabilidad de espuma del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.43 muestra el índice de estabilidad de espuma del sistema Surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y temperatura. Los resultados a 313.15 K, muestran un máximo de 9.89 segundos a la concentración de $9.09 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, en donde la tensión superficial a esa concentración es de 43.77 mN m^{-1} y para la mezcla

MDEA/DEA acuosa es de 50.83 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 7.06 mN m^{-1} . Mientras que a la temperatura de 323.15 K , el máximo de estabilidad de espuma alcanzado es de 12.99 segundos a la concentración de $9.08 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, en donde la tensión superficial a esa concentración es de 43.79 mN m^{-1} y para la mezcla MDEA/DEA acuosa de 49.19 mN m^{-1} , genera un gradiente en la tensión superficial, $\Delta\gamma$, de 5.4 mN m^{-1} . Estos resultados son más pequeños que del sistema Surfíno 485 y aumentan al aumentar la temperatura.

Tabla 4.36. Volumen de espuma del surfíno DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 C/\text{mol dm}^{-3}$	V/cm^3			
	303.15 K	313.15 K	323.15 K	333.15 K
1.65		88.9	96.1	
6.69		94.7		
9.08		100.8	125.8	
13.4		98.9	128.7	
16.1		95.1	127.6	
21.1	67.9	84.5	121.1	153.3
33.0		79.6	105.7	
49.1		77.7	96.9	

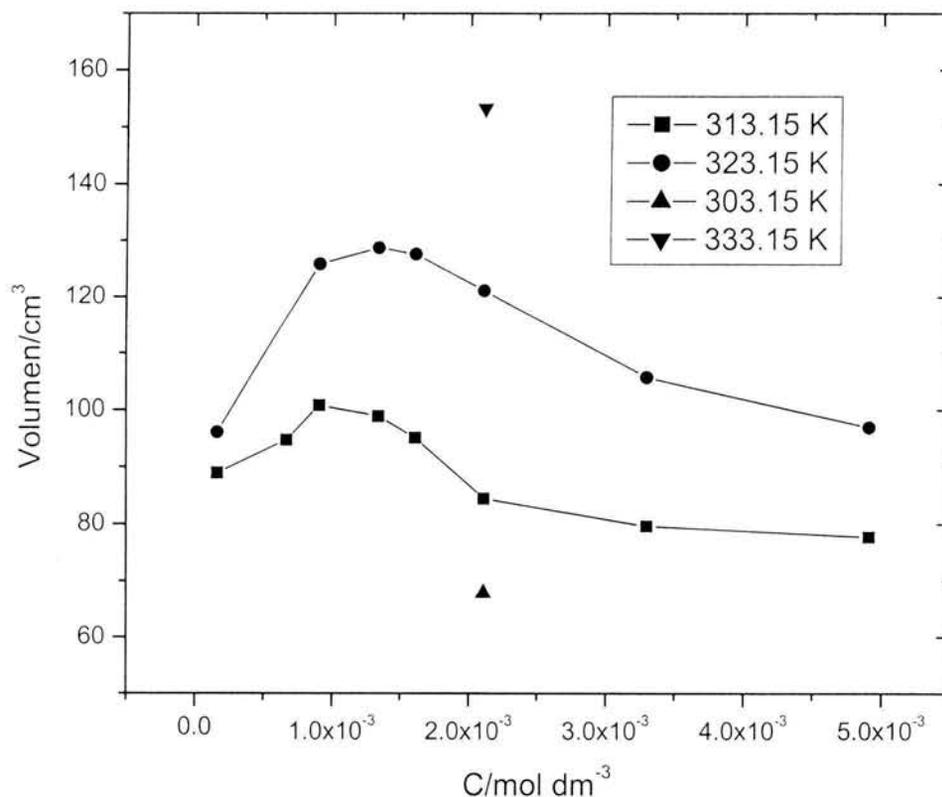


Figura 4.44. Volumen de la espuma del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

Las Tablas 4.37 y 4.38 y Figuras 4.45 y 4.46 muestran el índice de estabilidad y el volumen de espuma del sistema ocnol + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K. El índice de estabilidad y el volumen de espuma es mayor a 323.15 que a 313.15 K, indicando que la solubilidad del ocnol aumenta al aumentar la temperatura.

Tabla 4.37. Índice de estabilidad de espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 C/\text{mol dm}^{-3}$	Σ/s	
	313.15 K	323.15 K
1.25	2.4	2.85
10.5	1.59	1.62
15.3	1.53	1.66
20.5	1.25	1.50

Tabla 4.38. Volumen de la espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^4 C/\text{mol dm}^{-3}$	V/cm^3	
	313.15 K	323.15 K
1.25	24.5	29.1
10.5	16.3	16.6
15.3	15.6	17.0
20.5	12.8	15.3

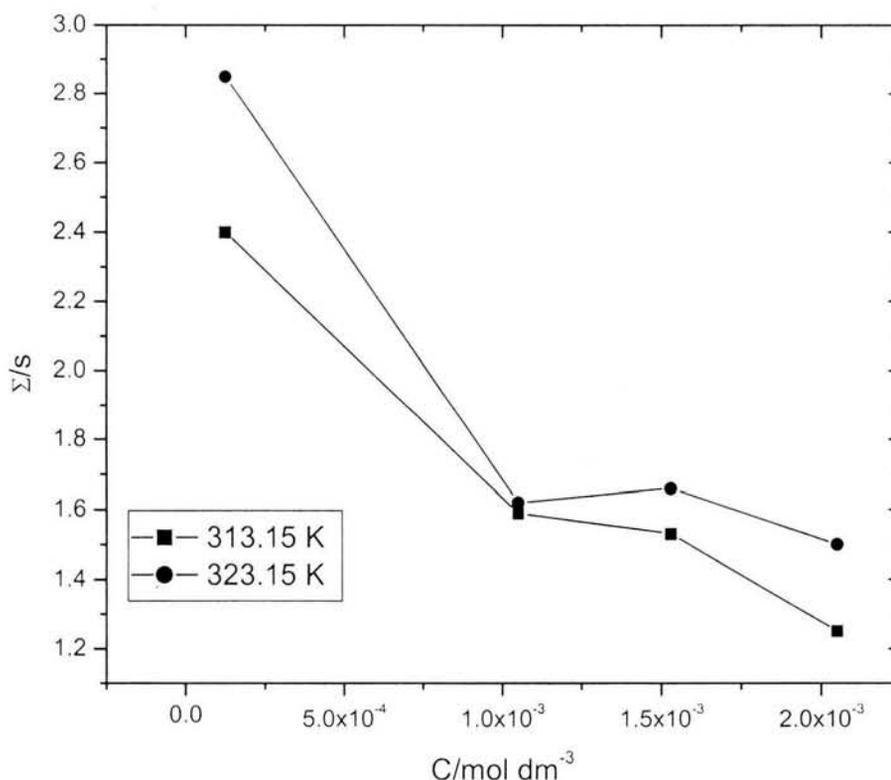


Figura 4.45. Índice de estabilidad de espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.45 muestra el índice de estabilidad de espuma del sistema ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura. En este sistema no se observa un valor máximo (por ser un seudotensoactivo). Los valores disminuyen al aumentar la concentración y se hacen más grandes con el aumento de la temperatura, estos valores son similares al del Brij 92. Esta propiedad, así como, en la tensión superficial hace

que el Brij 92 pueda ser utilizado para controlar la espuma que se presenta en las plantas de endulzamiento.

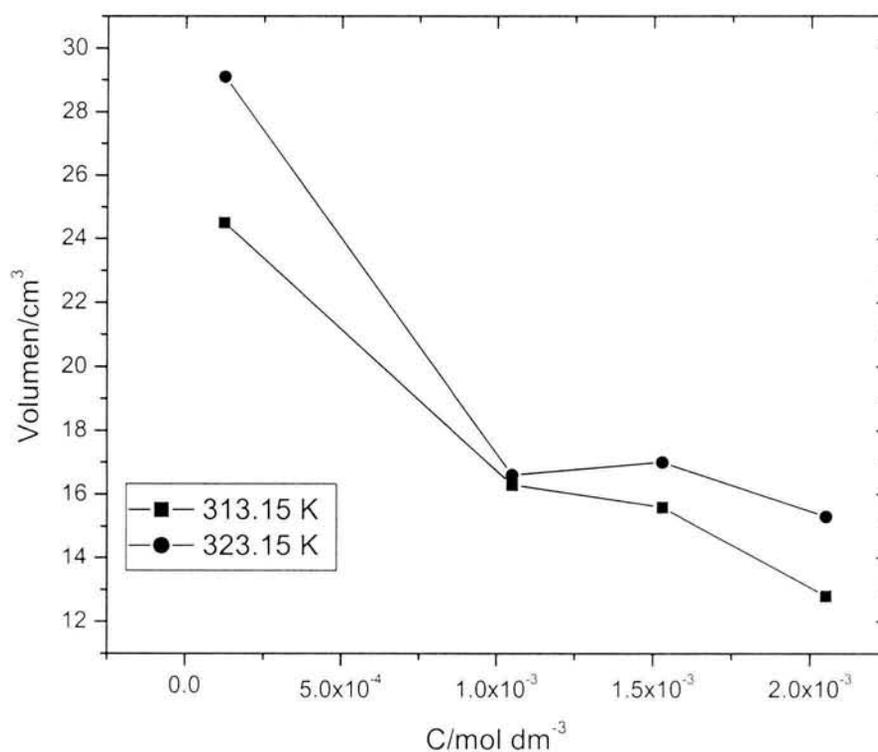


Figura 4.46. Volumen de la espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

Así que, tanto el Brij 92 como el ocnol, fue necesario conocer la eficiencia y el factor de expansión que tiene cada uno de ellos en la formación de la espuma. Las Tablas 4.39 a 4.42 muestran la eficiencia y del factor de expansión del brij 92 y del ocnol en la mezcla MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K, respectivamente. Para calcular la eficiencia se utilizó el índice de estabilidad de espuma de la mezcla MDEA/DEA acuosa, Σ_s , y el índice de estabilidad de espuma del brij 92 y el ocnol en MDEA/DEA acuosa, Σ_c , y para calcular el factor de expansión se utilizó la siguiente expresión $f = V_{\text{esp}}/V_{\text{liq}}$.

Tabla 4.39. Eficiencia y factor de expansión del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

10^4 C/mol dm ⁻³	Σ_s/s	Σ_c/s	* η	f
0	6.92			
1.27		0.97	86	0.39
2.06		1.04	85	0.39
6.44		1.65	76	0.67
11.6		2.43	65	0.99
15.1		2.77	60	1.13
20.6		1.62	78	0.66
35.5		1.53	79	0.62

$$*\eta = (\Sigma_s - \Sigma_c)/\Sigma_s * 100$$

Tabla 4.40. Eficiencia y factor de expansión del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

10^4 C/mol dm ⁻³	Σ_s/s	Σ_c/s	* η	f
0	6.83			
1.27		1.45	79	0.59
2.06		1.46	78	0.59
6.44		1.40	80	0.57
11.6		1.30	81	0.53
15.1		1.22	82	0.49
20.6		0.84	87	0.34
35.5		0.79	88	0.32

$$*\eta = (\Sigma_s - \Sigma_c)/\Sigma_s * 100$$

Tabla 4.41. Eficiencia y factor de expansión del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

10^4 C/mol dm ⁻³	Σ_s/s	Σ_c/s	* η	f
0	6.92			
1.25		2.4	65	0.98
10.5		1.59	77	0.65
15.3		1.53	78	0.62
20.5		1.25	82	0.51

$$*\eta = (\Sigma_s - \Sigma_c)/\Sigma_s * 100$$

Tabla 4.42. Eficiencia y factor de expansión del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

10^4 C/mol dm ⁻³	C/mol dm ⁻³	Σ_s/s	Σ_c/s	* η	f
0	0	6.83			
1.25	1.25×10^{-4}		2.85	58	1.16
10.5	1.05×10^{-3}		1.62	76	0.66
15.3	1.53×10^{-3}		1.66	76	0.68
20.5	2.05×10^{-3}		1.5	78	0.61

$$*\eta = (\Sigma_s - \Sigma_c)/\Sigma_s * 100$$

De estos resultados se observa que a la concentración de 2.05×10^{-3} mol/dm³ y a la temperatura de 313.15 K el ocnol es más eficiente (82 %), ya que el brij 92 tiene una eficiencia del 78 %, manteniéndose ambos sistemas en una zona de transición, no forman espuma solo dispersan el gas ($0.1 < f < 0.9$). Sin embargo a esta misma concentración y a la temperatura de 323.15 K ahora el brij 92 es más eficiente (87 %) ya que el ocnol tiene una eficiencia del 78 %.

Los valores de tensión superficial, así como los valores de estabilidad de espuma entre el Brij 92 y el ocnol son muy similares. Se propone al brij 92 como alternativa para el control de la espuma en las plantas de endulzamiento de corrientes gaseosas de Pemex-Gas y Pemex-Gas y Petroquímica Básica.

IV.8. Cálculo de la concentración micelar crítica (CMC), concentración superficial de exceso máxima, Γ_{max} , área superficial mínima por molécula, A_{min} y la presión superficial a la concentración micelar crítica, Π_{cmc} de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45% masa de amina total y 55 % masa de agua)

Cálculo de la CMC

Primeramente, se presenta la tensión superficial en función de la concentración del sistema brij 92 + MDEA/DEA acuosa y del sistema tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K.

Las Figuras 4.47 y 4.48 muestran la tensión superficial en función de la concentración del sistema Brij 92 en MDEA/DEA acuosa y del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a dos temperaturas. Estos valores están indicados en las Tablas 4.22 y 4.23, respectivamente.

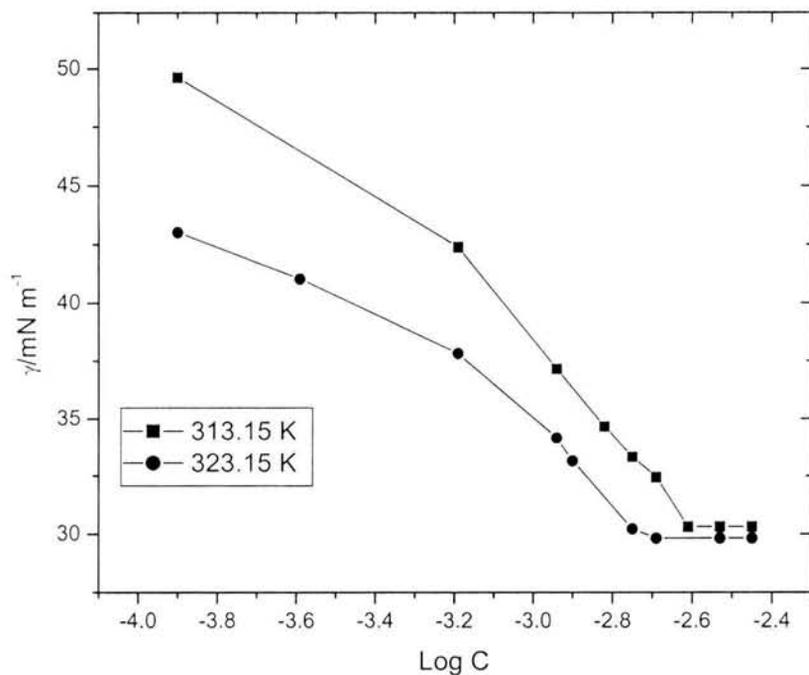


Figura 4.47. Tensión superficial del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

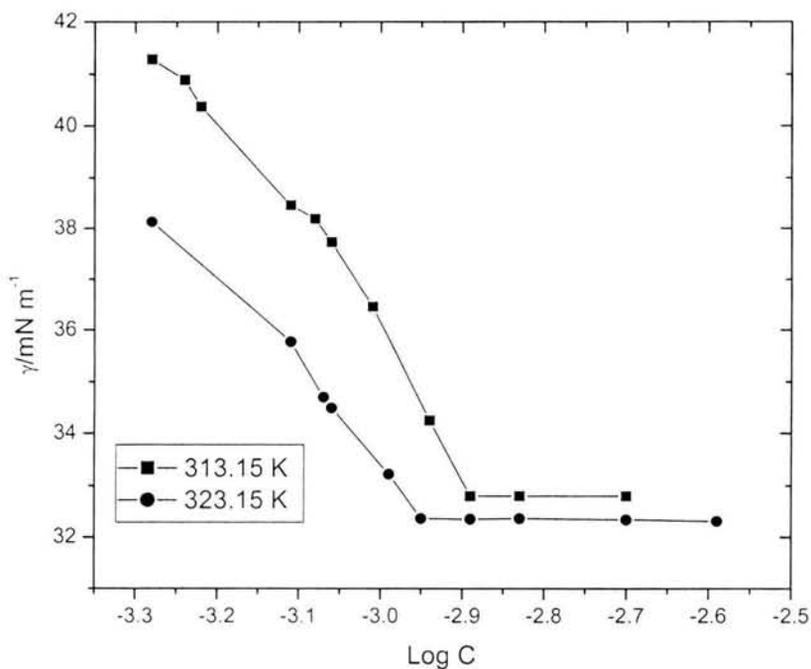


Figura 4.48. Tensión superficial del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

De estas graficas se observa claramente un cambio de pendiente, por lo que, se ajustan dos líneas rectas cuya intersección de ambas es la CMC (que se determina sustituyendo una ecuación en la otra y luego se despeja x). Los resultados se muestran en las Figuras 4.49 a 4.52 para los dos sistemas a cada una de sus temperaturas.

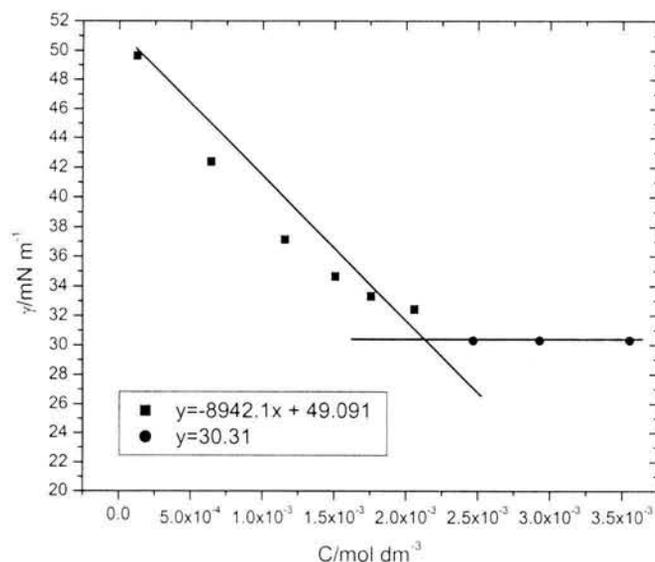


Figura 4.49. Tensión superficial del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

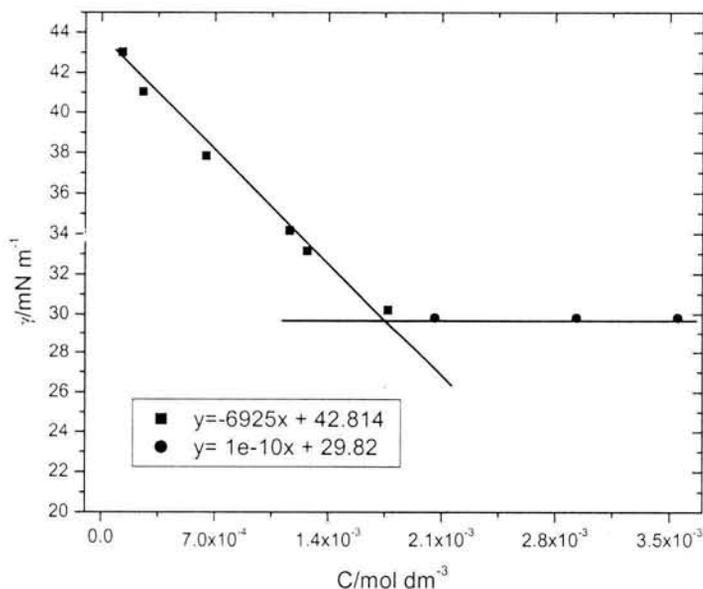


Figura 4.50. Tensión superficial del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

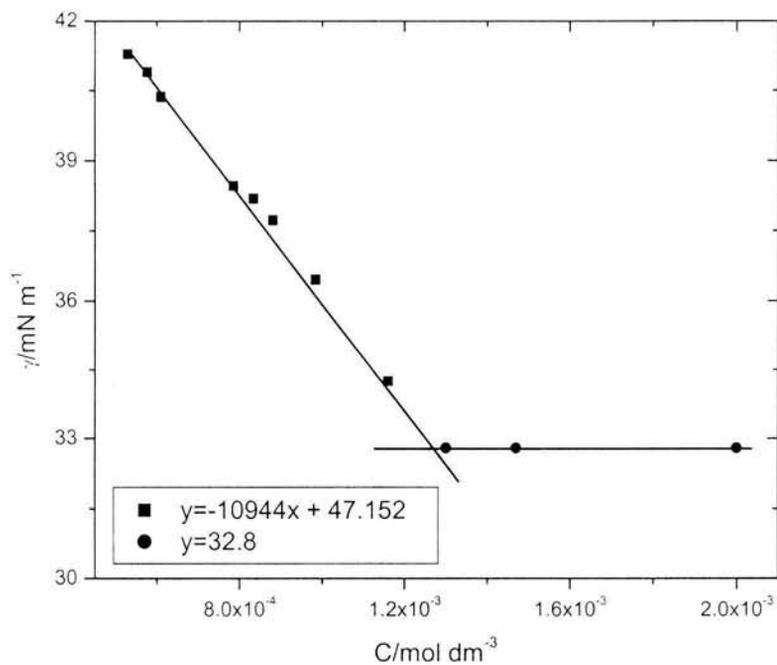


Figura 4.51. Tensión superficial del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

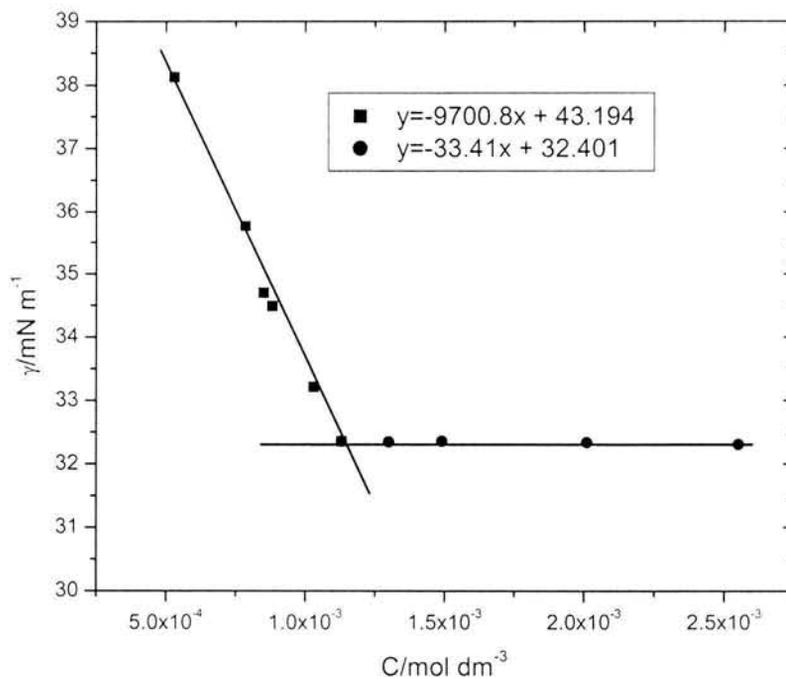


Figura 4.52. Tensión superficial del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.

Para calcular la concentración superficial de exceso máxima, Γ_{\max} , y el área superficial mínima por molécula, A_{\min} , se empleó las siguientes ecuaciones (Rosen, 1978):

$$\Gamma_{\max} = \frac{1}{2.303RT} \left(\frac{-\partial\gamma}{\partial \log C} \right)_T$$

donde $(-\partial\gamma/\partial \log C)_T$ es la pendiente del gráfico $\gamma - \log C$, T es la temperatura absoluta, R = 8.314 J mol⁻¹K⁻¹.

$$A = \frac{10^{16}}{N\Gamma}$$

donde N es el número de Avogadro.

Las Tablas 4.43 y 4.44 muestran los valores de la CMC, Γ_{\max} , A_{\min} y la π_{cmc} ($=\gamma_0-\gamma_{\text{cmc}}$), donde γ_0 es la tensión superficial del agua y γ_{cmc} es la tensión superficial de la solución a la CMC, del sistema brij 92 en MDEA/DEA acuosa y tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.

Tabla 4.43. Propiedades superficiales del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.

Tensoactivo	T (K)	10^3 cmc (mol dm ⁻³)	$10^{10} \Gamma_{\max}$ (mol cm ⁻²)	A_{\min} (Å ² /molécula)	γ_{cmc} (mN m ⁻¹)	π_{cmc} (mN m ⁻¹)
Brij 92	313.15	2.10±0.1	2.49±0.04	66.6±1	30.31±0.22	20.52±0.22
	323.15	1.88±0.1	1.80±0.03	92.2±1	29.82±0.22	19.36±0.22

Tabla 4.44. Propiedades superficiales del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.

Tensoactivo	T (K)	10^3 cmc (mol dm ⁻³)	$10^{10} \Gamma_{\max}$ (mol cm ⁻²)	A_{\min} (Å ² /molécula)	γ_{cmc} (mN m ⁻¹)	π_{cmc} (mN m ⁻¹)
Tween 80	313.15	1.88±0.01	3.55±0.04	46.8±0.6	32.80±0.22	18.03±0.22
	323.15	1.12±0.01	2.82±0.04	58.6±0.9	32.36±0.22	16.82±0.22

La concentración micelar crítica (CMC) en los sistemas estudiados (Tablas 4.43 y 4.44) disminuye al aumentar la temperatura y es más grande con respecto a la CMC de

tensoactivos no iónicos en agua (ver Tabla 4.45), porque la presencia de las aminas provoca que la aparición de los agregados sea a una concentraciones más grandes. La Tabla 4.45 muestra valores experimentales de la CMC de la familia homóloga formado por 2-etanol dodecílico etoxilado + Agua ($C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_xOH$ donde $x = 2-8$). En esta familia se observa que al aumentar el número de óxidos de etileno la CMC aumenta, porque al aumentar los óxidos de etileno el carácter hidrofílico aumenta (Rosen et al, 1982).

Tabla 4.45. Concentración micelar crítica de la serie homóloga estudiada por Rosen et al. (1982).

Tensoactivo	T (K)	10^5 CMC (mol dm ⁻³)
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_2OH$	283.15	3.8
	298.15	3.3
	313.15	3.2
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_3OH$	283.15	6.3
	298.15	5.2
	313.15	5.6
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_4OH$	283.15	8.2
	298.15	6.4
	313.15	5.9
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_5OH$	283.15	9.0
	298.15	6.4
	313.15	5.9
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_7OH$	283.15	12.1
	298.15	8.2
	313.15	7.3
$C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_7OH$	283.15	15.6
	298.15	10.9
	313.15	9.3

Las áreas mínimas por molécula del brij 92 y del tween 80 en la interfase de la solución acuosa de alcanolaminas/aire, muestran el mismo comportamiento respecto a los sistemas estudiados por Rosen et al. (1982). Así, se puede decir que en nuestros sistemas estudiados hay un aumento de moléculas en la superficie al aumentar la temperatura. Por esta razón, el área por molécula aumenta con el aumento de la temperatura. Se puede considerar que los

dos tensoactivos estudiados en este trabajo (brij 92 y tween 80) en MDEA/DEA acuosa tienen una excelente eficiencia para abatir la tensión superficial de la mezcla MDEA/DEA acuosa.

IV.9. Cálculo de los parámetros de micelización, ΔG°_{mic} , ΔS°_{mic} y ΔH°_{mic} para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y el Tween 80 + MDEA/DEA (45 % de amina total y 55 % masa de agua).

Los valores de la energía estándar de micelización ΔG°_{mic} fueron calculados con la ecuación dada por Rosen et al. (1982):

$$\Delta G^{\circ}_{mic} = RT \ln CMC \quad (IV.1)$$

Los valores de la entropía estándar de micelización ΔS°_{mic} fueron calculados con la ecuación siguiente (Rosen et al., 1982):

$$\frac{\Delta(\Delta G^{\circ}_{mic})}{\Delta T} = -\Delta S^{\circ}_{mic} \quad (IV.2)$$

y los valores de la entalpía estándar de micelización ΔH°_{mic} fueron calculados con la ecuación siguiente (Rosen et al., 1982):

$$\Delta H^{\circ}_{mic} = \Delta G^{\circ}_{mic} + T\Delta S^{\circ}_{mic} \quad (IV.3)$$

Las Tablas 4.46 y 4.47 muestran la energía estándar de micelización, ΔG°_{mic} , la entropía estándar de micelización ΔS°_{mic} y la entalpía estándar de micelización ΔH°_{mic} , del sistema brij 92 en MDEA/DEA acuosa y del tween 80 + MDEA/DEA acuosa.

Tabla 4.46. Parámetros termodinámicos de micelización del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.

Tensoactivo	T (K)	ΔG°_{mic} (kJ mol ⁻¹)	ΔH°_{mic} (kJ mol ⁻¹)	ΔS°_{mic} (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
Brij 92	313.15	-16.05±0.26	9.32±0.08	0.081±0.002
	323.15	-16.86±0.26		

Tabla 4.47. Parámetros termodinámicos de micelización del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.

Tensoactivo	T (K)	ΔG°_{mic} (kJ mol ⁻¹)	ΔH°_{mic} (kJ mol ⁻¹)	ΔS°_{mic} (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
Tween 80	313.15	-16.34±0.28	43.47±0.09	0.191±0.005
	323.15	-18.25±0.28		

Como se puede observar en las Tablas 4.46 y 4.47, se obtiene una contribución entrópica de micelización, ΔS°_{mic} positiva, la cual indica que se desarrollan incrementos imprevistos en el sistema al transformarse las moléculas de tensoactivo (brij 92 y tween 80) a agregados micelares y ocurre una restricción menor sobre el movimiento de la molécula del tensoactivo cuando éste está en un ambiente libre de agua. Esto indica que la cadena hidrofóbica que está en un ambiente rico de hidrocarburos se encuentra en el interior de la micela y la parte hidrofílica se encuentra en la parte externa de la micela y está unida por enlaces de hidrógeno del agua.

En las mismas Tablas 4.46 y 4.47, se observa una contribución entálpica de micelización ΔH°_{mic} positiva, indicando que hay un gran número de enlaces de hidrógeno entre las cadenas etoxiladas del brij 92 y del tween 80, indicando que las interacciones moleculares se hacen muy débiles en el proceso de micelización.

IV.10. Cálculo de los parámetros de adsorción, ΔG°_{ad} , ΔH°_{ad} y ΔS°_{ad} para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y el Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua).

Los valores de la energía estándar de adsorción ΔG°_{ad} , fueron calculados con la ecuación siguiente (Rosen et al., 1982):

$$\Delta G^{\circ}_{ad} = RT \ln CMC - N\pi_{cmc} A_{cmc} \quad (IV.4)$$

donde N es el número de Avogadro. Los valores de la entropía estándar de adsorción ΔS°_{ad} y la entalpía estándar de adsorción ΔH°_{ad} se calculan de igual manera como se hizo en el proceso de micelización.

Las Tablas 4.48 y 4.49 muestran la energía estándar de adsorción, ΔG_{ad}° , la entropía estándar de adsorción ΔS_{ad}° y la entalpía estándar de micelización ΔH_{ad}° , del sistema brij 92 en MDEA/DEA acuosa y del tween 80 + MDEA/DEA acuosa.

Tabla 4.48. Parámetros termodinámicos de adsorción del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.

Tensoactivo	T (K)	ΔG_{ad}° (kJ mol ⁻¹)	ΔH_{ad}° (kJ mol ⁻¹)	ΔS_{ad}° (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
Brij 92	313.15	-24.30±0.15	79.04±0.13	0.330±0.004
	323.15	-27.60±0.19		

Tabla 4.49. Parámetros termodinámicos de adsorción del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.

Tensoactivo	T (K)	ΔG_{ad}° (kJ mol ⁻¹)	ΔH_{ad}° (kJ mol ⁻¹)	ΔS_{ad}° (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
Tween 80	313.15	-21.40±0.11	66.28±0.12	0.280±0.004
	323.15	-24.20±0.12		

Como la contribución entrópica de adsorción es positiva ΔS_{ad}° y más grande que la contribución entrópica de micelización ΔS_{mic}° , éste resultado indica que hay una gran libertad de movimiento de las cadenas hidrocarbonadas en la interfase de la solución acuosa de aire/alcanolaminas comparada con un movimiento restringido en el bulto de la solución.

Como la contribución entálpica de adsorción, ΔH_{ad}° es positivo y más grande que la contribución entálpica de micelización, ΔH_{mic}° . Ésto indica que ocurren enlaces entre los oxígenos de la cadena etoxilada del brij 92 y del tween 80 y las interacciones entre las moléculas del agua se debilitan en el proceso de adsorción.

En una familia homóloga de alcoholes, el incremento en el número de carbonos repercute en un incremento en la actividad superficial o capacidad liofóbica, que medida a través de la energía estándar de adsorción, presenta un incremento fijo en relación al número de carbonos. La Tabla 4.50 muestra estos resultados. Valores similares se observan para otro tipo de familias homólogas de grupos hidrofílicos constantes. Esta propiedad, resultado de la igualdad de potenciales químicos bulto-superficie o dilución infinita, es la cantidad de

energía necesaria para transferir una mol de tensoactivo de la superficie al bulto, bajo un estado de referencia de 1 mN/m^{-1} de presión superficial (Elizalde et al., 1988).

Tabla 4.50. Presión superficial a dilución infinita $(\Pi/x)_{x \rightarrow 0}$ (H_2O), y energía estándar de adsorción ΔG_{ad}^0 para n-alcoholes, a 293.15 K (Clint et al., 1968).

Alcohol	$(\Pi/x)_{x \rightarrow 0}$	ΔG_{ad}^0 (kJ mol ⁻¹)	ΔH_{ad}^0 (kJ mol ⁻¹)	ΔS_{ad}^0 (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
Metanol	443	-14.85	-1.93	+0.04
Etanol	1375	-17.61	-1.78	+0.05
Propanol	4200	-20.33	-0.36	+0.7
Butanol	12440	-22.98	-1.48	+0.7
Pentanol	36800	-25.62	-4.43	+0.7
2-butoxietanol*			+23.88	+0.16

* Elizalde et al. (1988)

Para los n-alcoholes la contribución entálpica disminuye con el número de carbonos para metanol, etanol y propanol. En cambio, la contribución entrópica crece para estos mismos. Nótese que estos tres alcoholes representan al grupo de solubilidad total en agua a toda temperatura; en cambio, butanol y pentanol, grupo de inicio con presencia de puntos críticos superiores, la contribución entálpica es notablemente sensible al cambio en número de carbonos, mientras que la contribución entrópica es la misma (Clint et al., 1968). La comparación con el 2-butoxietanol indica un comportamiento diferente; la contribución entrópica es el doble a de los alcoholes de mayor peso molecular (etanol y pentanol) y la contribución entálpica es de tipo endotérmico ($\Delta H_{\text{ad}}^0 > 0$) (Elizalde et al., 1988).

Por otro lado, el comportamiento en la energía estándar de adsorción para una familia homóloga de tensoactivo no iónico, al aumentar el número de óxidos de etileno y la temperatura la energía estándar de adsorción aumenta (Rosen et al, 1982). En cuanto a la contribución entálpica es exotérmica hasta la familia con tres óxidos de etileno, luego se vuelve endotérmica a partir de la familia con cuatro moles de óxido de etileno y la contribución entrópica crece con el aumento de los óxidos de etileno (ver Tabla 4.51).

Tabla 4.51. Energía estándar de adsorción de la serie homóloga estudiada por Rosen et al, 1982.

Tensoactivo	T (K)	ΔG_{ad}° (kJ mol ⁻¹)	ΔH_{ad}° (kJ mol ⁻¹)	ΔS_{ad}° (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
C ₁₂ H ₂₅ (OC ₂ H ₄) ₂ OH	283.15	-32.8		
	298.15	-35.2	-1.4	+0.11
	313.15	-36.2		
C ₁₂ H ₂₅ (OC ₂ H ₄) ₃ OH	283.15	-33.5		
	298.15	-35.5	-0.3	0.11
	313.15	-36.8		
C ₁₂ H ₂₅ (OC ₂ H ₄) ₄ OH	283.15	-33.3		
	298.15	-35.9	+0.4	+0.12
	313.15	-37.7		
C ₁₂ H ₂₅ (OC ₂ H ₄) ₅ OH	283.15	-34.2		
	298.15	-36.2	+0.6	+0.12
	313.15	-37.9		
C ₁₂ H ₂₅ (OC ₂ H ₄) ₇ OH	283.15	-34.7		
	298.15	-36.9	+2.4	+0.13
	313.15	-38.7		
C ₁₂ H ₂₅ (OC ₂ H ₄) ₈ OH	283.15	-35.2		
	298.15	-37.4	+3.3	+0.13
	313.15	-39.3		

De las observaciones realizadas en las Tablas 4.50 y 4.51, se puede ver que el tween 80 en MDEA/DEA acuosa compara con las propiedades entálpicas y entrópicas de adsorción del 2 butoxietanol en agua (Elizalde, et al., 1988). La comparación del brij 92 y del tween 80 con la familia homóloga estudiada por Rosen et al. (1982) es muy grande tanto la contribución entálpica como la contribución entrópica porque las aminas también contribuyen.

IV.11. Cálculo de la adsorción superficial de exceso Γ_i , el área superficial por molécula, A , y el módulo de elasticidad de Gibbs, ϵ , para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 en MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua)

El reparto de especies entre regiones homogéneas e inhomogéneas está termodinámicamente establecida por la ecuación de Gibbs (ecuación I.64, capítulo I)

$$\Gamma_i = -\frac{C_2}{RT} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial C_2} \right)_T$$

donde Γ_i representa la concentración superficial de exceso con relación a la concentración de bulto C_2 . El signo resultante para Γ_i depende del comportamiento de la tensión superficial γ en relación a la concentración de bulto C_2 ; si adiciones sucesivas de C_2 repercuten en abatimientos progresivos en la energía superficial, γ , la especie i presenta una tendencia preferencialmente energética por la región superficial; todo material con este comportamiento se clasifica como tensoactivo o material con actividad superficial.

Cuando la región superficial agota su capacidad de ocupación y la concentración de superficie es la de saturación Γ_s , el abatimiento de la tensión superficial finaliza y la especie i inicia una nueva etapa energética: la asociación en bulto en estructuras de agregados o micelas, como se discutió en la Sección I.1A.

El área superficial por molécula en la interfase da información del grado de empaquetamiento y la orientación de la molécula de tensoactivo adsorbida en la superficie, la cual se puede calcular con la ecuación propuesta por Rosen (1978).

$$A = \frac{10^{16}}{N\Gamma_i}$$

donde Γ_i es la concentración superficial de exceso y se puede calcular con la ecuación de adsorción de Gibbs y N es el número de Avogadro.

La elasticidad es la resistencia de la deformación de la película. Un valor grande del coeficiente de elasticidad indica que la película tiene la habilidad de sufrir choques sin que se rompa. Cuando una película de un líquido puro es estirada, éste no representa cambios

significativos en la tensión superficial; por lo tanto, el valor del coeficiente de elasticidad es igual a cero. Ésta es la razón principal para indicar que los líquidos puros no hacen espuma. Si una película tiene un valor del coeficiente de elasticidad mayor de cero, significa que el estiramiento de la película producirá un incremento local en la tensión superficial e inducirá flujo del substrato hacia el interior del área expandida y de esta manera podrá restaurar el espesor original de la lamela. El módulo de elasticidad de Gibbs se puede calcular con la ecuación siguiente (Sharpe y Eastoe, 1996; Monin et al., 2000):

$$\varepsilon = -\Gamma \frac{\partial \gamma}{\partial \Gamma}$$

Las Tablas 4.52 y 4.53 y Figuras 4.42 a 4.47 contienen los valores de la adsorción superficial de exceso, el área superficial por molécula y el módulo de elasticidad de Gibbs, del sistema brij 92 en MDEA/DEA acuosa y del sistema tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K, respectivamente.

Tabla 4.52. Propiedades de superficie del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

$10^4 C$ (mol dm ⁻³)	Ln C	γ (mN m ⁻¹)	$10^6 \Gamma$ (mol m ⁻²)	Area (Å ² /molécula)	ε (mN m ⁻¹)
1.27	-8.97	49.64	0.978	100.2	52.6
6.44	-7.35	42.39	2.67	72.6	38.1
11.6	-6.76	37.16	3.28	52.7	27.7
15.1	-6.50	34.66	3.55	43.2	22.7
17.6	-6.35	33.33	3.71	38.1	20
20.6	-6.19	32.44	3.88	34.7	18.2
24.7	-6.01	30.31	4.06	26.6	14
29.3	-5.84	30.31	4.24	26.6	14
35.5	-5.65	30.31	4.44	26.6	14
a 323.15 K					
1.27	-8.97	43.02	0.438	152.6	31.7
2.55	-8.27	41.04	1.11	133.6	27.7
6.44	-7.35	37.83	2.00	102.6	21.3
11.6	-6.76	34.16	2.57	67.3	14
12.7	-6.67	33.15	2.66	57.5	11.9
17.7	-6.34	30.22	2.97	29.3	6.08
20.6	-6.19	29.82	3.12	25.4	5.27
29.3	-5.84	29.82	3.46	25.4	5.27
35.5	-5.65	29.82	3.65	25.4	5.27

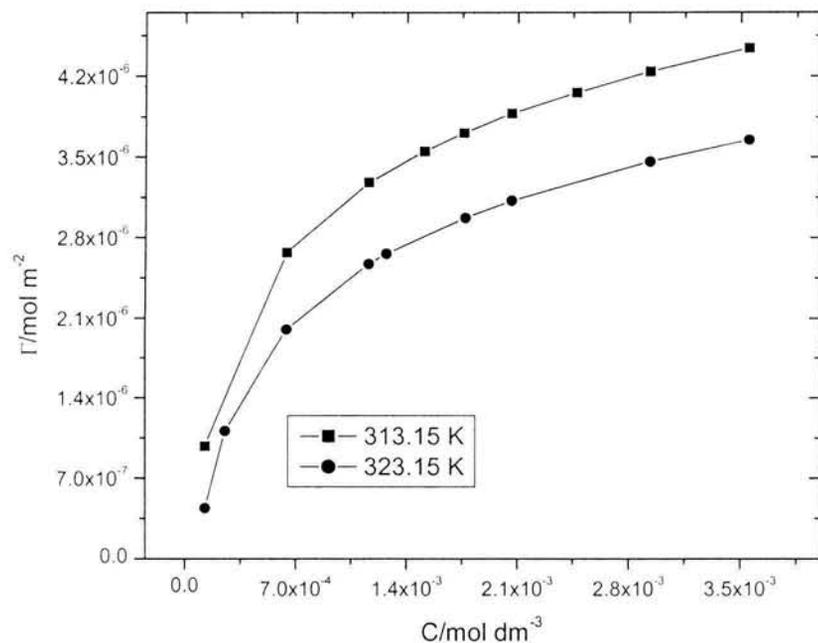


Figura 4.53. Adsorción superficial de exceso del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

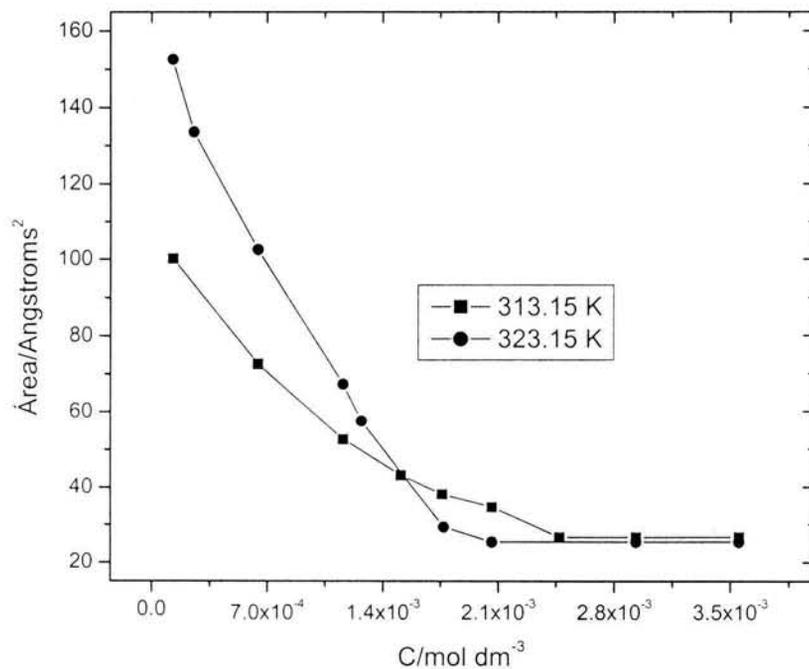


Figura 4.54. Área superficial por molécula del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.54 contiene los valores derivados del área superficial por molécula del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K. A 313.15 K el sistema presenta un mínimo a la concentración de la CMC ($2.10 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$). Por abajo de esta concentración, el área superficial por molécula aumenta al disminuir la concentración del brij 92 y por arriba de la CMC el área superficial por molécula se mantiene constante. Estos valores significan que en la zona rica de MDEA/DEA existe una mayor ordenación y empaquetamiento entre la interfase de aire/MDEA/DEA acuosa, en donde la tensión superficial a esa concentración es de 30.31 mN m^{-1} . A 323.15 K los valores del área superficial por moléculas son más grandes que a 313.15 K, indicando un mayor ordenamiento molecular. A esta temperatura el mínimo se obtiene a la concentración de $1.88 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$ donde la tensión superficial es de 29.82 mN m^{-1} . Estos valores en la zona rica de la solución acuosa MDEA/DEA son muy cercanos a los valores reportados por Rosen (1978) y por Monin et al. (2000).

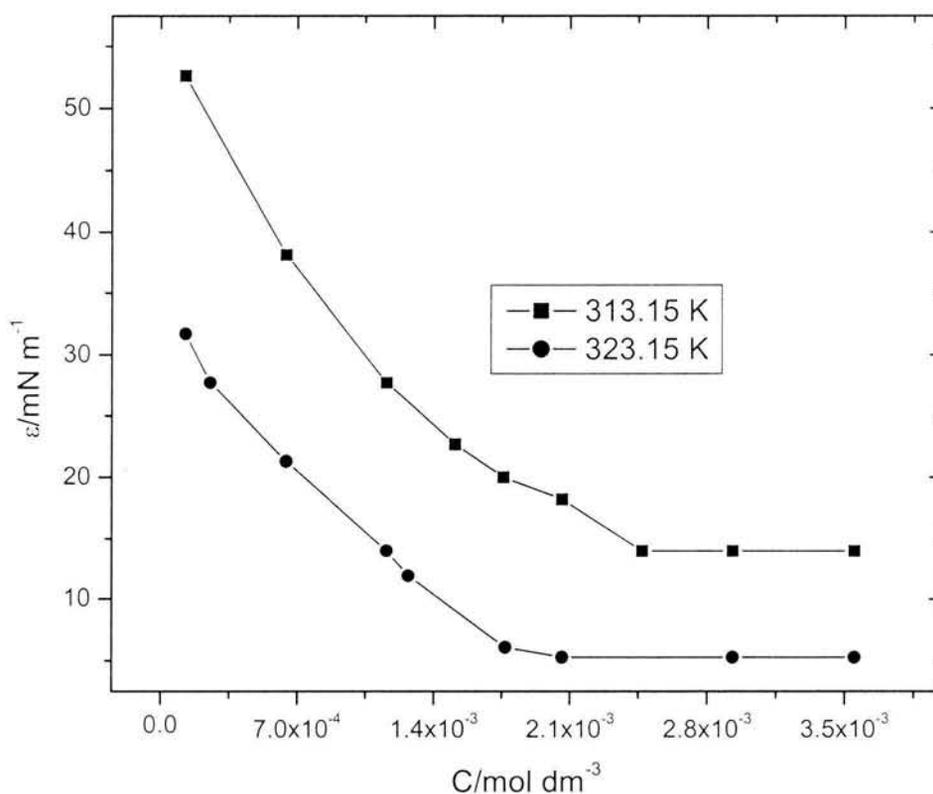


Figura 4.55. Módulo de elasticidad de Gibbs del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.55 contiene los valores del módulo de elasticidad de Gibbs del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K. A 313.15 K se obtiene un valor mínimo de 14 mN m⁻¹, a la concentración de 2.47x10⁻³ mol dm⁻³. Este valor es cercano al valor reportado por van Hunsel et al. (1989) para el brij 58 que es de 17 mN m⁻¹ (a 293.15 K). A la isoterma de 323.15 K el mínimo es de 5.27 mN m⁻¹, a la concentración de 2.06x10⁻³ mol dm⁻³. Estos valores indican que existe entre las moléculas una resistencia a la deformación y que pueden sufrir choques entre ellas sin que se rompa la película superficial.

Tabla 4.53. Propiedades de superficie del tween 80 en MDEA/ DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K

10 ⁴ C (mol dm ⁻³)	Ln C	γ (mN m ⁻¹)	10 ⁶ Γ (mol m ⁻²)	Area (Å ² /molécula)	ε (mN m ⁻¹)
5.29	-7.55	41.28	1.59	69.9	23.7
5.76	-7.46	40.89	1.98	67.7	23
6.09	-7.41	40.37	2.23	64.6	21.9
7.85	-7.15	38.46	3.38	53.4	18.1
8.34	-7.09	38.19	3.66	51.8	17.6
8.81	-7.04	37.73	3.91	49.0	16.6
9.84	-6.93	36.46	4.41	41.6	14.1
11.6	-6.77	34.25	5.14	28.6	9.71
13.0	-6.65	32.8	5.65	20.0	6.8
14.7	-6.52	32.8	6.24	20.0	6.8
20.0	-6.22	32.8	7.63	20.0	6.8
a 323.15 K					
5.29	-7.55	38.13	2.07	71.3	27.1
7.85	-7.15	35.77	2.88	58.9	22.4
8.50	-7.07	34.7	3.04	53.3	20.2
8.81	-7.04	34.49	3.12	52.1	19.8
10.3	-6.88	33.22	3.44	45.5	17.3
11.3	-6.79	32.36	3.63	40.9	15.5
13.0	-6.65	32.35	3.92	40.8	15.5
14.9	-6.51	32.36	4.20	40.9	15.5
20.1	-6.21	32.34	4.81	40.8	15.5
25.5	-5.98	32.31	5.30	40.7	15.4

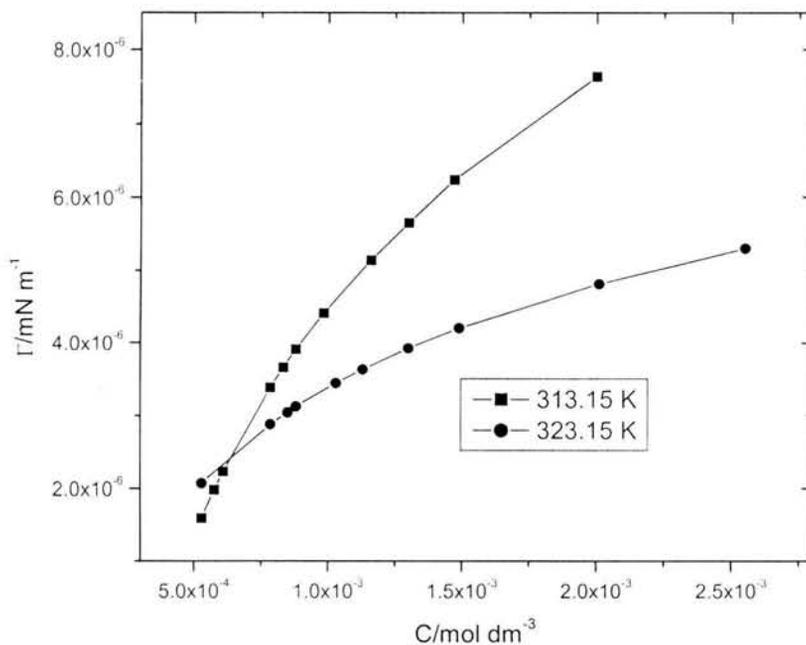


Figura 4.56. Adsorción superficial de exceso del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

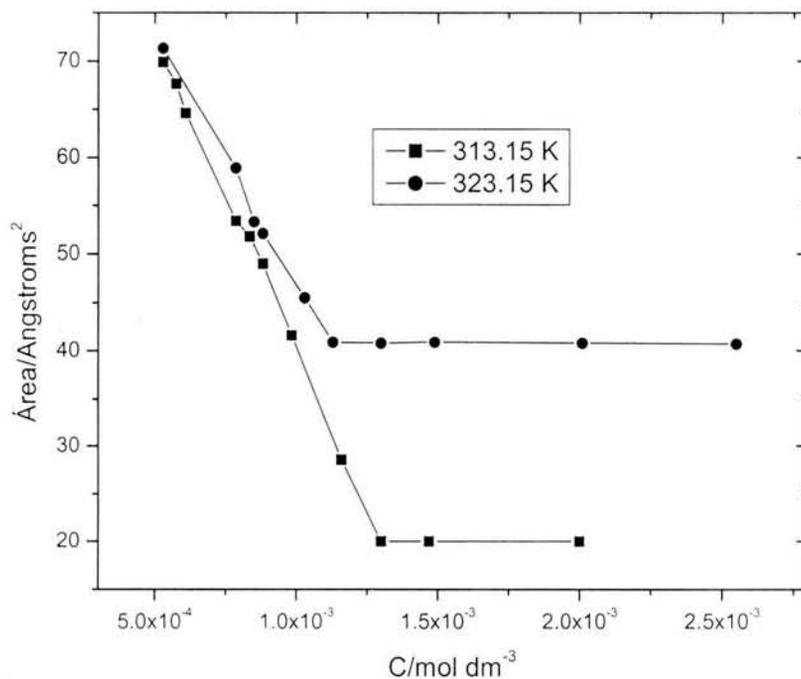


Figura 4.57. Área superficial por molécula del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.57 contiene los valores del área superficial por molécula del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K. A 313.15 K el sistema presenta un mínimo a la concentración de la CMC ($1.88 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$). Por abajo de esta concentración el área superficial por molécula aumenta al disminuir la concentración del tween 80 y por arriba de la CMC el área superficial por molécula se mantiene constante. Estos valores indican que en la zona rica de MDEA/DEA existe una mayor ordenación y empaquetamiento en la interfase aire/MDEA/DEA acuosa, en donde la tensión superficial a esa concentración es de 32.80 mN m^{-1} . Los valores del área superficial por molécula disminuyen al aumentar la concentración del tween 80 y la temperatura como se observa a la temperatura de 323.15 K. A esta temperatura el valor mínimo es de 32.36 mN m^{-1} , a la concentración de $1.12 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$.

El área superficial por molécula del tween 80 a la concentración de $5.29 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$ en la solución MDEA/DEA acuosa, es muy similar a los valores reportados por Vogler (1992); Lu y Rhodes (2000) del tween 80 en agua a la temperatura de 293.15 K ($77 - 80 \text{ \AA}^2$). Esto significa que la parte hidrofílica del tween 80 siempre ocupa dicha área, independientemente si es agua o una solución de aminas. Por otra parte, los derivados del nonilfenol, las áreas superficiales por molécula se incrementan al aumentar el número de óxido de etileno. Esto confirma que los grupos hidrofóbicos tienen una pequeña influencia sobre el área superficial por molécula (van Voorst Vader, 1960) y se pueden enrollar o empaquetar al azar (Donbrow, 1975).

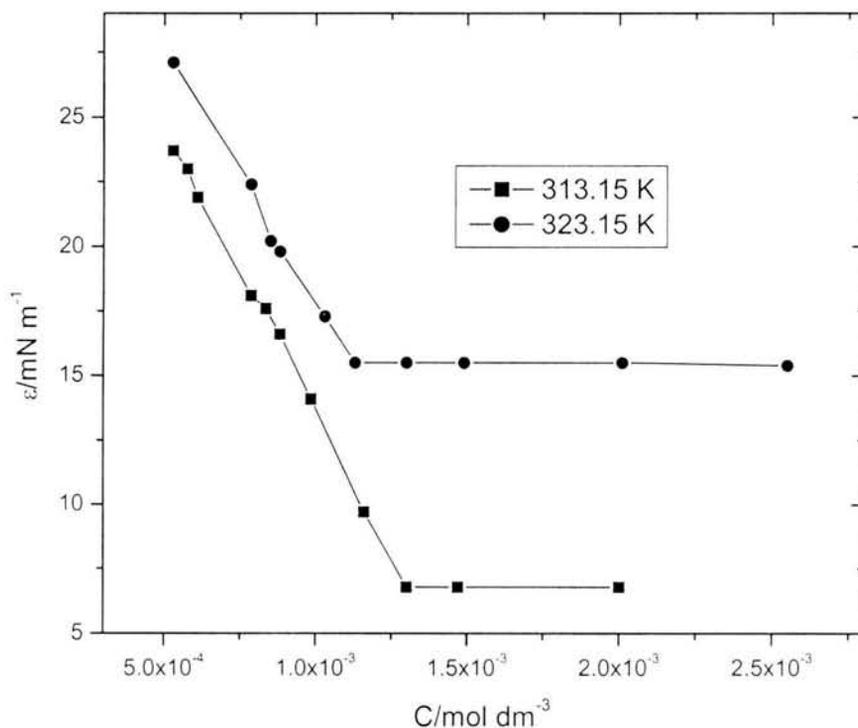


Figura 4.58. Módulo de elasticidad de Gibbs del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

La Figura 4.58 contiene los valores del módulo de elasticidad de Gibbs del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K. A 313.15 K. Se obtienen un valor mínimo de 6.8 mN m^{-1} , a la concentración de $1.30 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$. Para este sistema el módulo de elasticidad de Gibbs aumenta al aumentar la temperatura. A la temperatura de 323.15 K el valor mínimo es de 15.5 mN m^{-1} , a la concentración de $1.13 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$. Estos valores indican que existe entre las moléculas una alta resistencia a la deformación y que pueden sufrir choques entre ellas sin que se rompa la película superficial.

La longitud de la parte hidrofílica del tensoactivo no iónico se puede calcular con la ecuación siguiente (Sedev, 2001):

$$L = 2R_G = 2aN^{1/2}$$

donde R_G es el radio de giro, a ($=2.1 \text{ \AA}$) que representa el tamaño efectivo del monómero y N es el número de óxidos de etileno. Para el brij 92 ($N = 2$) y para el tween 80 ($N= 20$). Así, la longitud de la parte hidrofílica del brij 92 es de 8.4 \AA y para el tween 80 es de 84 \AA .

IV.12. Cálculo del coeficiente de difusión de MDEA, DEA, Brij 92, Tween 80, SurfínoI DF110-D y SurfínoI 485 en agua, empleando la ecuación propuesta por Joos y Rillaerts (1981)

Empleando los datos experimentales de la tensión superficial dinámica, se derivó el coeficiente de difusión para la DEA, la MDEA, el Brij 92, el Tween 80, el SurfínoI DF110-D y el SurfínoI 485 en agua, en función de la concentración y la temperatura. Los valores experimentales de la tensión superficial dinámica de estos sistemas se presentan en el Apéndice I.

A continuación se da un ejemplo para obtener el coeficiente de difusión del n-decanol en agua a 295.15 K , a la concentración de $1.33 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$. El n-decanol en agua se tomó como sistema de referencia ya que ha sido ampliamente estudiado por varios investigadores (Lin et al., 1991; Lin et al., 1995), donde estos autores calculan valores del coeficiente de difusión del n-decanol en agua utilizando valores experimentales de tensión superficial dinámica obtenidos con el método de gota pendiente.

Primeramente, la Figura 4.59 muestra la tensión superficial dinámica en función del tiempo del sistema n-decanol + agua, a 295.15 K . Se observa que a tiempos pequeños la tensión superficial es la del agua y va disminuyendo a medida que el tiempo aumenta hasta llegar a un tiempo en que la tensión superficial se mantiene constante.

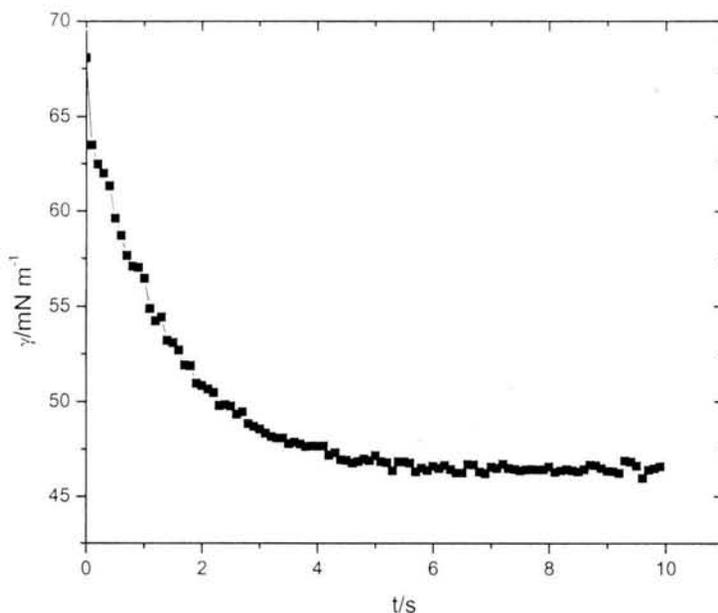


Figura 4.59. Tensión superficial dinámica de n-decanol en agua a una concentración de $1.33 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, a 295.15 K.

La Figura 4.60 muestra los resultados de presión superficial en función de la concentración multiplicado por la raíz cuadrada del tiempo para hallar la pendiente de la zona lineal.

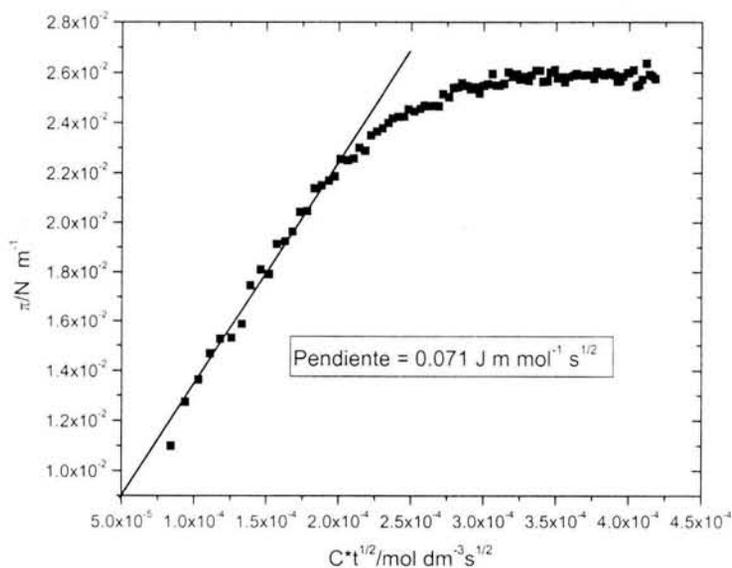


Figura 4.60. Presión superficial de n-decanol en agua, a una concentración de $1.33 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, a 295.15 K.

Finalmente, para calcular el coeficiente de difusión se utilizó la ecuación propuesta por Joos y Rillaerts (1981):

$$\frac{d\pi}{dt^{1/2}C_{eq}} = 2RT \left(\frac{D_{12}}{\Pi} \right)^{1/2} \quad (II.18)$$

donde el término del lado izquierdo de la ecuación (II.18) representa la pendiente de la zona lineal. Por lo tanto, esta expresión permite despejar y calcular el coeficiente de difusión, D_{12} , ya que todos los parámetros se conocen.

La Tabla 4.54 muestra el valor calculado y el de literatura (Lin et al., 1991) del coeficiente de difusión del n-decanol en agua. Observando el valor del error relativo se puede afirmar que el resultado obtenido en este trabajo compara de manera satisfactoria con el valor reportado en la literatura.

Tabla 4.54. Coeficiente de difusión del n-decanol en agua, con datos de tensión superficial dinámica a una sola concentración y 295.15 K.

$10^4 C/\text{mol dm}^{-3}$	$D_{12}/\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$		
	[a]	[b]	%ε ^[c]
1.33	6.58	6.56	-0.30

%ε = (Dlit-Dexp/Dlit)*100

[a] Este trabajo.

[b] Lin et al., (1991).

[c] Error relativo, entre el resultado de este trabajo y los reportados por Lin et al., (1991).

Si los datos dinámicos de tensión superficial a tiempos cortos (o en el menor de los tiempos) coinciden con la tensión superficial en equilibrio del sistema agua-amina, se puede afirmar que la cinética de envejecimiento superficial es responsabilidad estricta del tensoactivo en solución (Brij o Tween). La manera de verificar esta proposición mediante un argumento más sólido, consiste en analizar el comportamiento de la presión superficial dinámica en relación a la raíz cuadrada del tiempo multiplicado por la concentración del tensoactivo. En este caso el comportamiento lineal a tiempos cortos, seleccionado por el observador, mostrará una ordenada al origen que representará la tensión superficial del sistema agua-amina, sin la presencia del tensoactivo en turno. De la pendiente de esta relación lineal presión superficial *versus* ($t^{1/2} \cdot C$) se puede obtener el coeficiente de difusión correspondiente sin la necesidad de recurrir a una ecuación de estado y sus valores al

equilibrio ya que en él a tiempo cero la concentración superficial es altamente diluida y su comportamiento puede ser descrito por la ecuación de estado bidimensional. Esto permite traducir la concentración de superficie en función del tiempo en tensión o presión superficial dinámica.

Por lo tanto, utilizando la ecuación de Joos y Rillaerts (1981), los resultados del coeficiente de difusión que se muestran en las Tablas 4.55 a 4.57 fueron obtenidos empleando el mismo procedimiento usado en el sistema n-decanol + agua.

Tabla 4.55. Coeficiente de difusión y de la literatura de DEA en agua, en función de la concentración y la temperatura.

C/mol dm ⁻³	D ₁₂ /cm ² s ⁻¹			
	323.15 K		333.15 K	343.15 K
	10 ¹⁸	10 ⁶	10 ¹⁸	10 ¹⁸
	[a]	[b]	[a]	[a]
0.95	881	12.2	829	473
1.92	174	10.7	960	86.8
2.91	10.9	8.38	10.2	38.6
3.92	6.96	6.48	8.29	9.65
4.97	3.92	4.54	6.55	7.82

[a]. Ecuación (II.18)

[b] Rowley y Oscarson (1993)

La Tabla 4.55 muestra el valor calculado y el reportado por Rowley y Oscarson (1993) del coeficiente de difusión de DEA en agua. Como se ve, el valor derivado del coeficiente de difusión de DEA en agua es muy pequeño comparado con el reportado en la literatura. Significa que el proceso no está gobernada por la difusión sino que está controlado por una barrera energética de adsorción. Este comportamiento se puede observar también a las temperaturas de 333.15 y 343.15 K.

Es importante mencionar que los valores experimentales del coeficiente de difusión reportados por Rowley y Oscarson (1993) que se muestran en la Tabla 4.55 fueron obtenidos directamente con un dispersor de Teylor.

Tabla 4.56. Coeficiente de difusión y de la literatura de MDEA en agua, en función de la concentración y la temperatura.

C/mol dm ⁻³	D ₁₂ /cm ² s ⁻¹			
	323.15		333.15	343.15
	K		K	K
	10 ¹⁸	10 ⁶	10 ¹⁸	10 ¹⁸
	[a]	[b]	[a]	[a]
0.845	697	10.91	368	154
1.69	534	9.11	164	386
2.55	980	7.33	10.2	9.65
3.42	436	6.17	5.02	6.17
4.32	0.436	5.55	3.68	4.73

[a]. Ecuación (II.18)

[b] Rowley and Oscarson (1993); Rowley et al. (1997)

La Tabla 4.56 muestra el valor derivado y el reportado por Rowley y Oscarson (1993) y de Rowley et al. (1997) del coeficiente de difusión de MDEA en agua. Como se puede ver, el valor derivado del coeficiente de difusión de MDEA en agua es muy pequeño comparado con el valor reportado en la literatura, lo cual significa que el proceso no está gobernado por la difusión sino que está controlado por una barrera energética de adsorción. Este comportamiento se observa también a las temperaturas de 333.15 y 343.15 K.

La Tabla 4.57 muestra el valor derivado del coeficiente de difusión de cuatro tensoactivos no iónicos en agua, estudiados en este trabajo doctoral. Estos valores son similares a los valores de otros tensoactivos no iónicos en agua estudiados por Eastoe y Dalton (2000) y Rulison y Lochhead (1995).

Tabla 4.57. Coeficiente de difusión de cuatro tensoactivos no iónicos en agua, en función de la temperatura, a una concentración de 2.51×10^{-4} mol dm⁻³.

Tensoactivo	D (10 ⁶ cm ² /s)	
	313.15 K	323.15 K
Brij 92	0.13	0.29
Tween 80	0.85	1.19
SurfínoI DF110-D	2.11	2.66
SurfínoI 485	9.44	18.33

IV.13. Cálculo del coeficiente de difusión de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 en MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua) empleando la ecuación de Ward y Tordai (1964)

Un ejemplo de los resultados obtenidos, se muestra a continuación: los resultados que se presentan son para una concentración de equilibrio de 1.16×10^{-6} mol cm^{-3} donde a partir de los datos experimentales de tensión superficial dinámica (ver Apéndice II), se calcula el coeficiente de difusión para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

Primeramente, se muestra la curva de presión superficial de equilibrio en función del tiempo del sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K (ver Figura 4.61). Estos valores se ajustaron utilizando la isoterma tipo Langmuir (ecuación IV.5), propuesta en este trabajo:

$$\pi(t) = \pi(\infty) \frac{\alpha t}{1 + \alpha t} \quad (\text{IV.5})$$

donde $\pi(t)$ es la presión superficial dinámica, en mN m^{-1} ($\pi(t) = \gamma_0 - \gamma$; γ_0 es la tensión superficial de la solución acuosa de alcanolaminas "MDEA/DEA" y γ es la tensión superficial de la mezcla "tensoactivo + MDEA/DEA", $\pi(\infty) = \pi(\text{eq})$ cuando $t = \infty$, es la tensión superficial de equilibrio, en mN m^{-1} , α es la constante de adsorción de Langmuir, en mol cm^{-3} y t es el tiempo, en segundos.

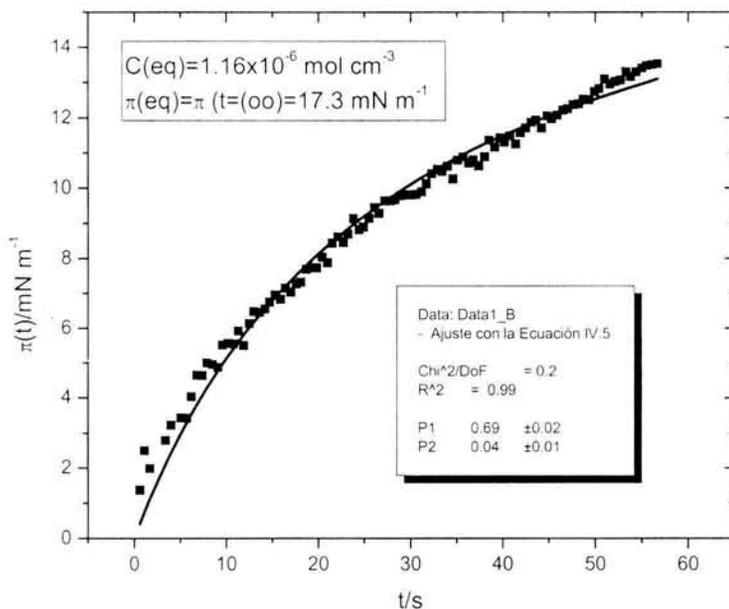


Figura 4.61. Presión superficial de equilibrio del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 313.15 K.

Después de haber ajustado todas las presiones superficiales dinámicas en función del tiempo (a cada una de las concentraciones estudiadas) tanto del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, así como del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a las temperaturas de 313.15 y 323.15 K (mismas que se encuentran en el Apéndice II), se calculó el valor de la presión superficial de equilibrio empleando la ordena al origen de la ecuación IV.5, la cual fue ajustada en función de la concentración del tensoactivo empleando la ecuación (1.84) de estado típica de Langmuir.

Los parámetros P_1 y β (de la ecuación 1.84) para el sistema Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K se muestran en la Tabla 4.58.

Tabla 4.58. Parámetros de la ecuación de estado de Langmuir para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa.

Temperatura (K)	Γ_s (mol/cm ²)	P_1 (erg/cm ²)	β (cm ³ /mol)	σ
313.15	1.96×10^{-10}	5.10	26886399	0.51

σ = desviación estándar.

Con los parámetros de ajuste (P_1 y β) que se muestran en la Tabla 4.58, se calculó la concentración del sustrato, los que posteriormente se grafican en función de $(t-\tau)^{1/2}$, (ver Figura 4.62) para obtener el valor del área bajo la curva a partir de los cuales se calculan los valores del coeficiente de difusión. La Figura 4.62 muestra la resolución de la integral de la ecuación II.7 (ver Apéndice 2 donde se muestran los valores de la concentración del sustrato en función de $(t-\tau)^{1/2}$ para calcular la integral, a todas las concentraciones estudiadas). El valor de la concentración del sustrato, C_s , que se debe sustituir en la ecuación II.7 es aquel que esté evaluado al punto en el tiempo que se fijó como tiempo máximo.

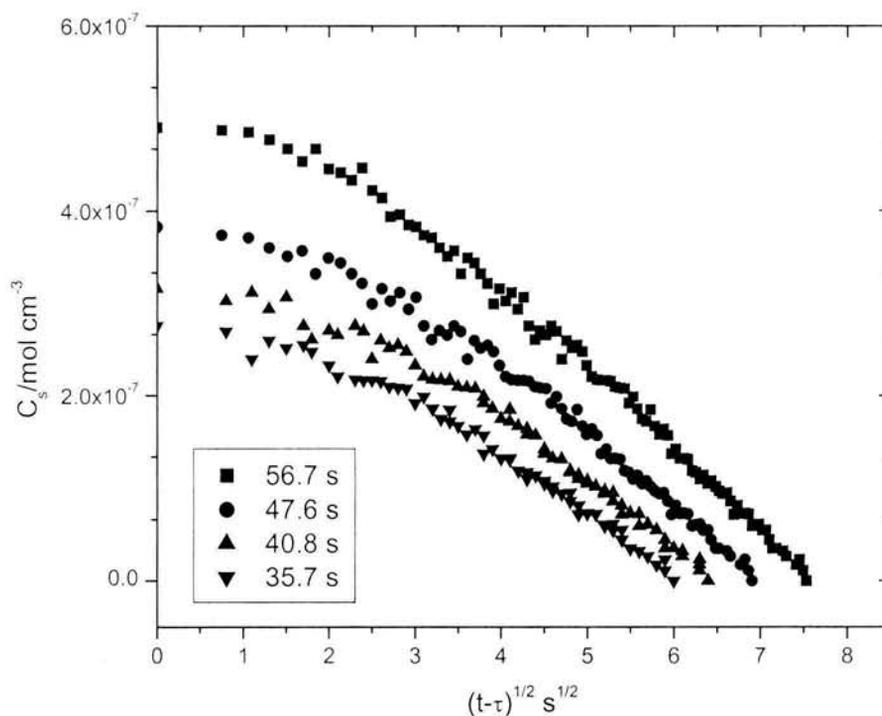


Figura 4.62. Gráfica de C_s vs $(t-\tau)^{1/2}$, a diferentes tiempos máximos (56.7; 47.6; 40.6 y 35.8 segundos), Área = $(2.34 \times 10^{-6}$; 1.70×10^{-6} ; 1.31×10^{-6} y 1.06×10^{-6}) $\text{mol s}^{1/2}/\text{cm}^3$, $D = (6.37 \times 10^{-10}$; 6.30×10^{-10} ; 6.52×10^{-10} y 6.77×10^{-10}) cm^2/s .

Siguiendo el mismo procedimiento, se calcularon los coeficiente de difusión de los tensoactivos no iónicos (Brji 92 y Twwen 80) a cada concentración y temperatura estudiadas en este trabajo, cuyos resultados se presentan en las Tablas 4.59 a 4.62.

Tabla 4.59. Coeficiente de difusión del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 1.16×10^{-6} mol cm^{-3} , a 313.15 K.

t s	$\left(\frac{P_1}{RT}\right)\left(\frac{\beta C_s}{1+\beta C_s}\right)$ $10^{10}(\text{mol cm}^{-3})$	$\left(\frac{2C_0 t^{1/2}}{\Pi^{1/2}}\right)$ $10^6(\text{mol cm}^{-3} \text{ s}^{1/2})$	$\left(\frac{2}{\Pi^{1/2}}\right)(\text{integral})$ $10^6(\text{mol cm}^{-3} \text{ s}^{1/2})$	D_{12} $10^{10}(\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})$
56.7	1.82	9.85	2.64	6.37
47.6	1.79	9.03	1.92	6.30
40.6	1.75	8.34	1.48	6.52
35.8	1.73	7.83	1.20	6.77
a 2.06×10^{-6} mol cm^{-3}				
26.7	1.91	12.0	5.06	7.51
22.7	1.89	11.1	3.90	6.95
17.3	1.88	9.67	2.74	7.35
14.7	1.87	8.91	2.17	7.68
a 3.55×10^{-6} mol cm^{-3}				
32	1.92	22.7	9.16	2.02
26	1.92	20.4	7.45	2.18
20	1.91	17.9	5.52	2.38
14	1.90	15.0	3.33	2.65

Tabla 4.60. Coeficiente de difusión del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 1.27×10^{-7} mol cm^{-3} , a 323.15 K.

t s	$\left(\frac{P_1}{RT}\right)\left(\frac{\beta C_s}{1+\beta C_s}\right)$ $10^{10}(\text{mol cm}^{-3})$	$\left(\frac{2C_0 t^{1/2}}{\Pi^{1/2}}\right)$ $10^6(\text{mol cm}^{-3} \text{ s}^{1/2})$	$\left(\frac{2}{\Pi^{1/2}}\right)(\text{integral})$ $10^7(\text{mol cm}^{-3} \text{ s}^{1/2})$	D_{12} $10^9(\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})$
249	0.974	2.26	4.23	2.81
201	0.965	2.03	2.97	3.09
150	0.930	1.76	1.88	3.53
99	0.787	1.43	0.846	3.45
60	0.623	1.11	0.339	3.35
a 2.55×10^{-7} mol cm^{-3}				
150	1.03	3.52	5.61	1.22
90	1.02	2.73	3.16	1.78
60	0.995	2.23	2.29	2.47

continúa

continúa

1.16x10 ⁻⁶ mol cm ⁻³				
198	1.11	18.45	90.0	0.140
100	1.11	13.1	35.9	0.137
70	1.11	11.0	17.6	0.145
40	1.08	8.28	5.99	0.199
30	1.07	7.17	3.68	0.247
a 2.93x10 ⁻⁶ mol cm ⁻³				
40.0	1.12	20.9	195.0	6.53
30.0	1.12	18.1	164.0	4.13
25.0	1.12	16.5	147.0	3.63
18.0	1.12	14.0	121.0	3.30
a 3.55x10 ⁻⁶ mol cm ⁻³				
50.0	1.12	19.3	90.3	0.154
40.0	1.12	16.1	92.0	0.149
35.5	1.12	14.8	90.9	0.153
28.0	1.12	12.0	92.4	0.148
18.0	1.12	7.90	91.0	0.152

Tabla 4.61. Coeficiente de difusión del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.03x10⁻⁶ mol cm⁻³, a 313.15 K.

t s	$\left(\frac{P_1}{RT}\right)\left(\frac{\beta C_s}{1+\beta C_s}\right)$ 10 ¹¹ (mol cm ⁻³)	$\left(\frac{2C_0t^{1/2}}{\Pi^{1/2}}\right)$ 10 ⁶ (mol cm ⁻³ s ^{1/2})	$\left(\frac{2}{\Pi^{1/2}}\right)(integral)$ 10 ⁶ (mol cm ⁻³ s ^{1/2})	D ₁₂ 10 ¹¹ (cm ² s ⁻¹)
30	5.22	6.37	3.76	40.0
24	5.22	5.69	2.20	22.4
18	5.22	4.93	1.15	19.1
14	5.22	4.35	0.762	21.2
12	5.22	4.03	0.501	22.0
a 1.16x10 ⁻⁶ mol cm ⁻³				
50	5.22	9.26	2.89	6.73
44	5.22	8.68	2.27	6.63
38	5.22	8.07	1.64	6.59
30	5.22	7.17	1.02	7.21
a 1.30x10 ⁻⁶ mol cm ⁻³ y a 313.15 K.				
50	5.22	10.4	3.01	5.04

continúa

continúa

40	5.22	9.28	2.47	5.89
36	5.22	8.80	2.17	6.20
32	5.22	8.30	1.77	6.41
26	5.22	7.48	1.50	7.63
a $1.47 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y a 313.15 K.				
50	5.22	11.7	4.20	4.81
40	5.22	10.5	3.39	5.40
36	5.22	9.95	2.96	5.58
32	5.22	9.38	2.45	5.67
26	5.22	8.46	2.01	6.56

Tabla 4.62. Coeficiente de difusión del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a $1.03 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$, a 323.15 K.

t s	$\left(\frac{P_1}{RT}\right)\left(\frac{\beta C_s}{1 + \beta C_s}\right)$ $10^{11}(\text{mol cm}^{-3})$	$\left(\frac{2C_0 t^{1/2}}{\Pi^{1/2}}\right)$ $10^6 \text{ mol cm}^{-3} \text{ s}^{1/2}$	$\left(\frac{2}{\Pi^{1/2}}\right)(\text{integral})$ $10^7(\text{mol cm}^{-3} \text{ s}^{1/2})$	D_{12} $10^{12}(\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})$
10.1	1.49	3.69	0.115	16.3
8.8	1.49	3.45	0.0613	18.7
8.0	1.49	3.29	0.0385	20.6
7.2	1.49	3.12	0.0223	22.8
6.4	1.49	2.94	0.0110	25.7
a $1.16 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$				
30	1.49	7.17	0.975	4.43
28	1.49	6.93	0.712	4.72
25	1.49	6.54	0.517	5.26
23	1.49	6.28	0.363	5.69
20	1.49	5.85	0.231	6.52
a $1.30 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$				
40.5	1.49	9.34	6.86	2.96
36.0	1.49	8.80	4.32	3.16
30.0	1.49	8.03	2.54	3.66
27.0	1.49	7.62	1.44	3.96
a $1.47 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$				
40	1.49	10.5	21.8	3.21
36	1.49	9.95	14.3	3.05
30	1.49	9.09	7.50	3.19
27	1.49	8.62	5.24	3.38
21	1.49	7.60	2.02	4.05

De los resultados derivados del coeficiente de difusión del sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa y para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura, se puede decir que la cinética de envejecimiento superficial no es responsabilidad estricta del tensoactivo en solución (Brij 92 o Tween 80) ya que la superficie ya está ocupada por las aminas que tienen la capacidad de estructurarse en la interfase. Asimismo, las moléculas de las aminas saturan la interfase; aún así, los tensoactivos bajo estudio fueron capaces de desplazar a las aminas en la superficie observándose claramente en los estudios de tensión superficial de equilibrio; es decir, se obtuvieron valores más pequeños de tensión superficial de equilibrio con la presencia de los tensoactivos bajo estudio, comprobándose de esta manera que un material con mayor actividad superficial (tensoactivo) desplaza al de menor actividad superficial (seudotensoactivo).

Rulison y Lochhead (1995) han estudiado interfases agua/aceite + polímeros solubles en agua (hidrofobicamente modificados) donde concluyen que el proceso de envejecimiento superficial está controlado por una barrera energética de adsorción (energía de activación), ya que los valores del coeficiente de difusión calculados con la ecuación de Joos y Rillaerts (1981) son muy pequeños. Por ejemplo, para el dodecil sulfato de sodio acuoso + ciclohexano tiene un coeficiente de difusión de $3.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, para el sistema formado por la etilhidroxi celulosa acuosa (hidrofobicamente modificada) + ciclohexano genera un coeficiente de difusión de $2.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ y para el ácido poliacrílico acuoso (sin purificar) + ciclohexano da un coeficiente de difusión de $6.8 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Eastoe y Dalton (2000) estudiaron interfases formadas por tensoactivos no iónicos + agua a diferentes temperaturas, en donde emplean el método de máxima presión de burbuja para determinar experimentalmente la tensión superficial dinámica y el método del anillo de Du Nouy para determinar experimentalmente la tensión superficial de equilibrio. Al derivar el coeficiente de difusión con la ecuación II.15 (ver Capítulo II) obtienen valores pequeños de dicho coeficiente, en donde concluyen que el proceso está gobernado por una barrera energética de adsorción (energía de activación). La tabla 4.63 presenta los valores obtenidos por Eastoe y Dalton (2000) del coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}) y del coeficiente de difusión ordinario (D_{ord}) para el di-(C6-Glu) + agua, a una concentración de

$5 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, en función de la temperatura. A 298.15 K Eastoe y Dalton (2000) obtuvieron el valor de $2.70 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ empleando la técnica de resonancia magnética nuclear.

Tabla 4.63. Pendientes obtenidas con valores de la tensión superficial dinámica y coeficientes de difusión, en función de la temperatura para di-(C6-Glu) + agua, a una concentración de $5 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$.

T (K)	Pendiente ($\text{mN m}^{-1} \text{ s}^{1/2}$)	$10^6 D_{\text{eff}}$ ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)	$10^6 D_{\text{ord}}$ ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)	$D_{\text{eff}}/D_{\text{ord}}$
283.15	15.1	0.032	1.74	0.018
293.15	9.6	0.086	2.24	0.038
303.15	6.6	0.20	3.04	0.068
313.15	3.7	0.66	3.93	0.168
323.15	2.0	2.32	4.83	0.480

Por lo anterior, fue necesario calcular la energía de activación de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa para corroborar y/o saber la magnitud de dicha barrera de estos sistemas, la cual se describe a continuación.

IV.14. Energía de activación de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua)

Liggieri et al. (1996) hacen una extensión del modelo difusional de Ward y Tordai y cuantifican esta barrera energética (energía de activación) en términos del coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}), mediante la ecuación siguiente:

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{exp}} \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (\text{IV.6})$$

donde D_{eff} representa el coeficiente de difusión efectivo, D_{exp} representa el coeficiente de difusión ordinario, E_a es la energía de activación, R es la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta. Con la ecuación IV.6 se calculó la energía de activación del sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa y del sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en

función de la concentración y la temperatura, cuyos valores se presentan en las Tablas 4.64 y 4.65.

Tabla 4.64. Energía de activación, E_a , del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15.

$10^7 C_{eq}$ (mol cm ⁻³)	$10^7 D_{ord}$ (cm ² s ⁻¹)	$10^{10} D_{eff}$ (cm ² s ⁻¹)	$\ln D_{eff}/D_{ord}$	$E_a/kJ mol^{-1}$
11.6	1.25	6.50	-5.26	13.69
20.6	1.25	7.38	-5.83	13.36
35.5	1.25	2.31	-6.99	16.39
a 323.15 K.				
1.27	2.94	3.36	-6.77	18.20
2.55	2.94	1.82	-5.08	13.66
11.6	2.94	1.55	-7.55	20.21
29.3	2.94	3.69	-6.68	17.95
35.5	2.94	2.31	-7.15	19.21

Tabla 4.65. Energía de activación, E_a , del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15.

C_{eq} $10^6(\text{mol cm}^{-3})$	$10^7 D_{ord}$ (cm ² s ⁻¹)	$10^{10} D_{eff}$ (cm ² s ⁻¹)	$\ln D_{eff}/D_{ord}$	$E_a/kJ mol^{-1}$
1.03	8.46	19.9	-6.05	15.76
1.16	8.46	8.11	-6.95	18.09
1.30	8.46	7.42	-7.04	18.32
1.47	8.46	5.92	-7.26	18.91
a 323.15 K.				
1.03	11.9	42.4	-5.64	15.14
1.16	11.9	10.3	-7.05	18.95
1.30	11.9	6.53	-7.51	20.17
1.47	11.9	6.13	-7.57	20.34

De estos resultados se concluye que la difusión no es el proceso controlante, de acuerdo a los valores obtenidos de la energía de activación, indicando que el proceso es lento y además el tensoactivo cuando llega a la superficie encuentra todos los espacios ocupados por las aminas, así que el proceso está gobernado por una barrera energética de adsorción considerable en ambos sistemas estudiados como se observa en las Tablas 4.64 y 4.65.

Otra manera de verificar que el proceso esta controlado por la adsorción ó barrera energética es a través de los tiempos de relajación, cuyos cálculos se indican a continuación.

IV.15. Tiempo de relajación de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 5 masa de agua) empleando la ecuación de Bleys y Joos, (1985)

Los valores experimentales, obtenidos en este proyecto doctoral, de la tensión superficial de equilibrio en función de la concentración fueron correlacionados con la ecuación de von Szyszkowski (1928), cuya ecuación está representada por:

$$\pi = \Gamma_s RT \ln \left(1 + \frac{C_0}{a} \right) \quad (\text{IV.7})$$

donde a es la constante de Langmuir-von Szyszkowski y es igual a ($a = k_2/k_1$); k_1 es la constante de velocidad para la adsorción (cm s^{-1}) y k_2 es la constante de velocidad para la desorción ($\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$). Cuando la cinética de envejecimiento superficial está controlado por la adsorción se puede hacer que $k_2 = a k_1$, donde el parámetro k_1 se obtiene ajustando los datos de tensión superficial dinámica en función del tiempo.

Para predecir cuando la difusión o la adsorción es el paso controlante de la cinética de envejecimiento superficial, es necesario comparar los tiempos característicos (Joos y Bleys, 1983). El tiempo característico cuando la difusión es el paso controlante, τ_D , propuesto por Bleys y Joos (1985) está dado por:

$$\tau_D = \frac{1}{D} \left(\frac{d\Gamma}{dC} \right)^2 \quad (\text{IV.8})$$

Considerando la isoterma de adsorción de Langmuir, la ecuación (IV.8) toma la siguiente forma:

$$\tau_D = \left(\frac{\Gamma_s}{a} \right)^2 \frac{1}{D \left(1 + \frac{C_0}{a} \right)^4} \quad (\text{IV.9})$$

donde Γ_s es la adsorción de saturación, a es la constante de Langmuir-von Zsyszkowski, D es el coeficiente de difusión del tensoactivo y C_0 es la concentración de bulto.

El tiempo característico cuando la adsorción es el paso controlante, τ_K , propuesto por Joos et al. (1982) está dado por:

$$\tau_K = k^{-1} = \frac{\Gamma_s}{k_2 \left(1 + \frac{C_0}{a} \right)} \quad (\text{IV.10})$$

En esta ecuación, k_2 es la constante de velocidad para la desorción. Con los dos tiempos característicos se obtienen el siguiente cociente:

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{\tau_D}{\tau_K} = \frac{\Gamma_s k_2}{a^2 D \left(1 + \frac{C_0}{a} \right)^3} \quad (\text{IV.11})$$

Cuando \mathfrak{R}_0 tiene un valor grande, el proceso está controlado por la difusión y cuando \mathfrak{R}_0 tienen un valor pequeño indica que el proceso está controlado por una barrera energética de adsorción (Bleys y Joos, 1985).

Las Tablas 4.66 y 4.67 muestran los valores de la adsorción de saturación, Γ_s , la constante de Langmuir-von Szyszkowski, a , la constante de la velocidad de adsorción, k_1 , la constante de la velocidad de desorción, k_2 , y el cociente de los dos tiempos, \mathfrak{R}_0 .

Tabla 4.66. Datos termodinámicos y cinéticos del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

$10^7 C_0$ (mol cm ⁻³)	$10^{10} \Gamma_s$ (mol cm ²)	$10^9 a$ (mol cm ³)	k_1 (cm s ⁻¹)	k_2 (mol cm ⁻² s ⁻¹)	\mathfrak{R}_0
11.6	1.96	37.2	28	1.04×10^{-6}	35
20.6	1.96	37.2	6.13	2.28×10^{-7}	1.44
35.5	1.96	37.2	3.79	1.41×10^{-7}	0.018

continúa

continúa

a 323.15 K.

1.27	1.13	4.87	222	1.08×10^{-6}	88.1
2.55	1.13	4.87	21.01	1.02×10^{-7}	10.9
11.6	1.13	4.87	25	1.22×10^{-7}	1.44
29.3	1.13	4.87	0.67	3.26×10^{-9}	0.0002
35.5	1.13	4.87	1.19	5.80×10^{-9}	0.0002

Tabla 4.67. Datos termodinámicos y cinéticos del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

$10^6 C_0$ (mol cm ⁻³)	$10^{11} \Gamma_s$ (mol cm ⁻²)	$10^{13} a$ (mol cm ⁻³)	k_1 (cm s ⁻¹)	k_2 (mol cm ⁻² s ⁻¹)	\mathfrak{R}_0
1.03	5.22	61.1	4.46	2.73×10^{-11}	9.41×10^{-9}
1.16	5.22	61.1	2.75	1.68×10^{-11}	4.06×10^{-9}
1.30	5.22	61.1	1.72	1.05×10^{-11}	1.80×10^{-9}
1.47	5.22	61.1	1.57	9.59×10^{-12}	1.14×10^{-9}

a 323.15 K.

1.03	4.32	8.54	1.12	9.56×10^{-13}	2.71×10^{-11}
1.16	4.32	8.54	1.35	1.15×10^{-12}	2.29×10^{-11}
1.30	4.32	8.54	1.07	9.14×10^{-13}	1.29×10^{-11}
1.47	4.32	8.54	0.74	6.32×10^{-13}	6.12×10^{-12}

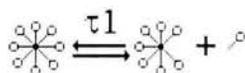
Como el cociente (\mathfrak{R}_0) es pequeño en las dos mezclas mostradas en las Tablas 4.66 y 4.67, significa que estos valores validan la hipótesis de que el proceso cinético de envejecimiento superficial está controlado por una barrera energética de adsorción.

Por otro lado, como el Brij 92 y el Tween 80 forman micelas es conveniente mostrar la importancia que tienen. Una micela inestable sus tiempos de relajación micelar son más grandes que una micela estable, por lo que se muestra en la siguiente sección.

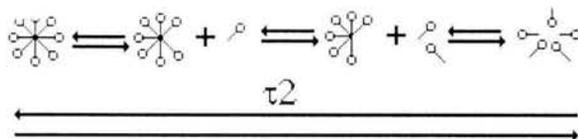
IV. 16. Tiempo de relajación micelar de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA (45 % masa de amina total y 55 % masa de agua)

Mijnlieff y Ditmarsch (1965) fueron los primeros en investigar la importancia que provoca la ruptura de una micela en los procesos que contemplan un incremento en el área interfacial y Patist et al. (2001) muestran dos procesos de relajación presentes en la solución micelar. El primero es un proceso de relajación rápido, cuyo tiempo de relajación, τ_1 , se obtienen en microsegundos y está asociado a los cambios rápidos del monómero entre las micelas y el bulto. El segundo tiempo de relajación, τ_2 , se obtiene de

milisegundos a minutos y se atribuye a la formación y la ruptura de la micela. Estos dos tiempos se muestran en la Figura 4.63 y dependen de la temperatura, la presión y la concentración.



Tiempo de relajación rápida, microsegundos



Tiempo de relajación lenta, de milisegundos a minutos

Figura 4.63. Mecanismos de los tiempos de relajación (τ_1 y τ_2) para una solución de tensoactivo en la CMC.

Patist et al. (2001) correlacionaron el tiempo de relajación micelar, τ_2 , con propiedades de equilibrio tales como la tensión superficial y la viscosidad superficial, pero han demostrado que la mejor correlación del tiempo de relajación, se realiza con propiedades dinámicas tales como la espumabilidad, el volumen de las burbujas, el tamaño de gotas emulsionadas y la velocidad de solubilización. Para aplicar esta hipótesis hicieron estudios de soluciones micelares con benceno (Shah, 1998). Por ejemplo, en la Figura 1.5 (Capítulo I) muestra la importancia que tiene la ruptura de la micela en el proceso de espumación. Al introducir una corriente de aire en una solución de tensoactivo se crea una nueva área interfacial. El área interfacial creada se puede estabilizar por una película adsorbida de moléculas de tensoactivo. Estas moléculas salen del bulto, las cuales contienen monómeros y micelas. Los monómeros se difunden en la nueva superficie creada y las micelas se rompen para proveer más monómeros en la superficie. Las micelas estables no son capaces de aumentar el flujo necesario para estabilizar la nueva interfase creada, por lo tanto la espumabilidad disminuye.

Para incrementar el área interfacial entre el aceite y el agua y producir gotas de aceite, se necesita aplicar al sistema una energía mecánica, provocando que la nueva superficie se

pueda estabilizar por la adsorción de los monómeros en la fase acuosa; sin embargo, al crear micelas más estables se provoca una pérdida del flujo de los monómeros, los cuales generan grandes tensiones interfaciales en la interfase aceite-agua.

La relación entre la tensión superficial o la tensión interfacial y la cantidad de área creada en las espumas o emulsiones esta dado por $W = \gamma\Delta A$, donde W es el trabajo realizado, γ es la tensión superficial o interfacial en la interfase aire-agua o aceite-agua y ΔA es el cambio en el área interfacial. Cuando se realiza la misma cantidad de trabajo, resulta una tensión superficial pequeña y una área interfacial grande, la cual se debe a la disminución del tamaño de las burbujas o a un incremento del volumen de la espuma, por lo que, cuando las micelas son estables se obtienen burbujas grandes.

Si la micela en la solución es muy estable, no se obtiene una cantidad considerable de monómeros en la superficie, produce una tensión superficial grande, genera volúmenes de espuma grandes, espumabilidad alta, tensiones superficiales dinámicas altas, gotas grandes y tiempos de mojado grandes (Oh y Shah, 1991; Oh et al., 1992). Por el contrario, si la micela es muy inestable, se obtienen monómeros en la superficie, resulta una tensión superficial pequeña, genera volúmenes de espuma pequeños, espumabilidad baja y tensiones superficiales dinámicas bajas. Este comportamiento está representado en la Figura 4.64.

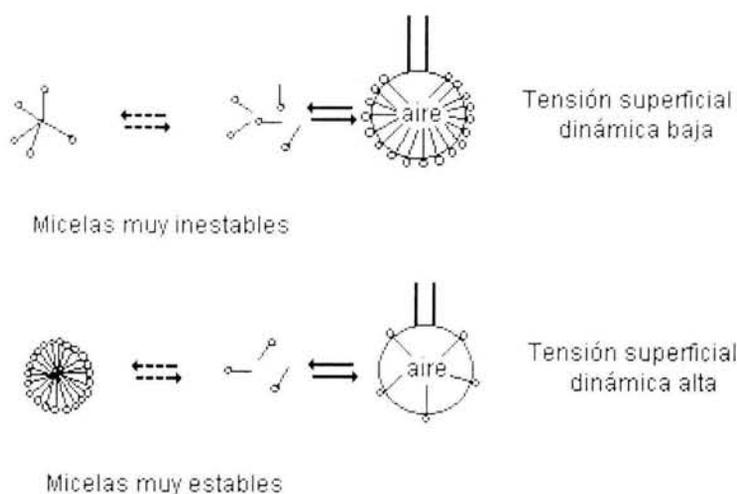


Figura 4.64. Efecto de la estabilidad micelar en la tensión superficial dinámica.

Patist et al. (2001) indican que una micela más estable da como resultado un flujo de monómeros pequeño y una espumación baja. Patist et al. (2001) estudiaron tres tensoactivos no iónicos conocidos como Symperonic A7 que tiene un tiempo de relajación de 150 s, Brij 35 con un tiempo de relajación de 80 s y el Symperonic A50, cuyo tiempo de relajación es de 40 s. La Figura 4.65 muestra el volumen de la espuma obtenido por dos métodos diferentes: en el primero se emplea la inyección de gas a través de un capilar sumergido en la solución (Figura 4.65 a) y el segundo se emplea una agitación vigorosa (Figura 4.65 b). Estos métodos generan resultados opuestos. Empleando el primer método, el Symperonic A7, produce un volumen de espuma mayor que con el segundo método, este resultado se puede explicar con los valores de tensión superficial dinámica que se muestran en la Figura 4.65 c; es decir, cuando los tiempos son grandes se produce espumabilidad baja y la tensión superficial dinámica se aproxima a la tensión superficial de equilibrio. La tensión superficial de equilibrio del Symperonic A7 es de 29 mN/m, el cual es más pequeño que del Brij 35 (38.7 mN/m) o del Symperonic A50 (49.5 mN/m) y el volumen de la espuma tiene el siguiente orden: Symperonic A7 > Brij 35 > Symperonic A50. El tiempo de rompimiento de las micelas determina el flujo de las moléculas del tensoactivo y la espumabilidad. Las micelas del Symperonic A7 son más estables (tiempo de relajación más grande), produce menos espuma (método de agitación vigorosa) que del Brij 35 y del Symperonic A50, cuya tensión superficial dinámica es más grande que el Symperonic A7.

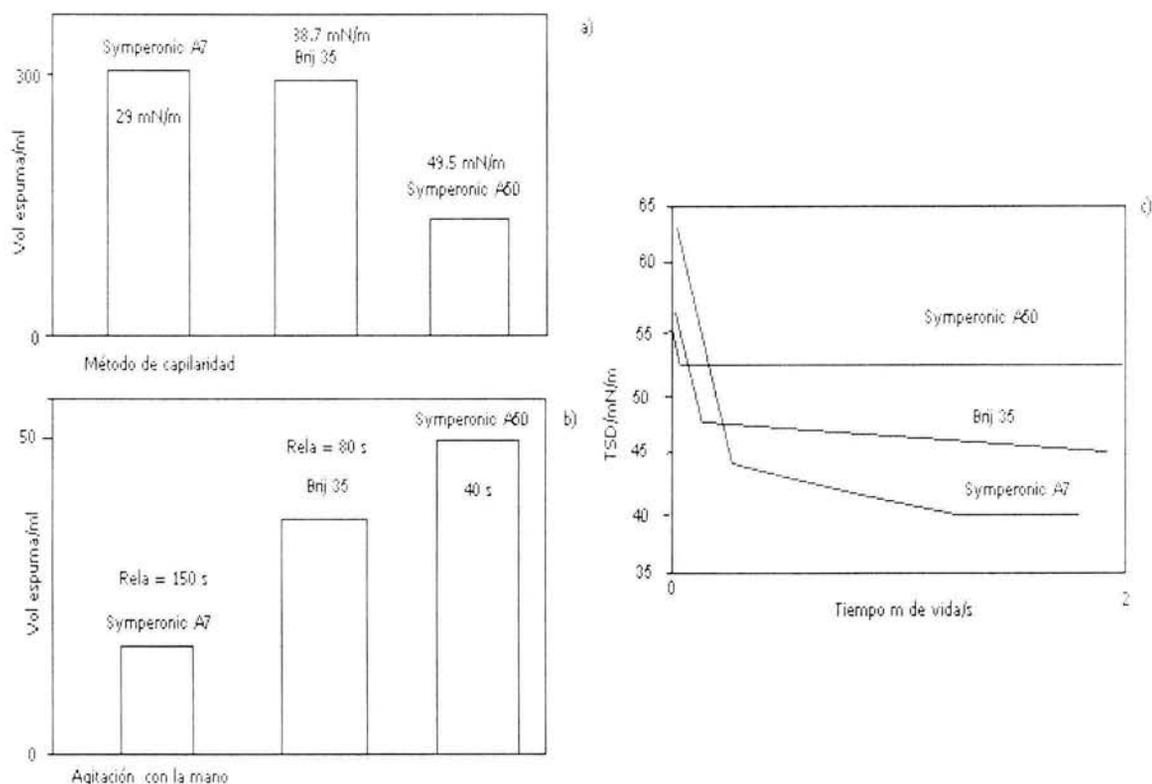


Figura 4.65. Efecto de la espumabilidad de una solución al 2 Mm de Simperonic A7, Brij 92 y Simperonic A50 (a y b), y tensión superficial dinámica en función del tiempo de vida de la burbuja a la misma concentración y los tres tensoactivos (c).

Así, de acuerdo a Eastoe y Dalton (2000), el tiempo de relajación, τ_2 , se puede calcular con la ecuación siguiente:

$$\tau_2 = \frac{1}{k_{mic}} \tag{IV.8}$$

donde k_{mic} está dado por:

$$k_{mic} = \frac{1}{\Pi} \left[\left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^{-1.2} \right]_{t \rightarrow \infty, c = CMC} \tag{IV.9}$$

Los resultados calculados del tiempo de relajación micelar para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K, se muestran en las Tablas 4.68 y 4.69.

Tabla 4.68. Tiempo de relajación micelar, τ_2 , del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

$10^7 C_0$ (mol cm ⁻³)	$(d\gamma/dt^{-1/2})$ mN m ⁻¹ s ^{-1/2}	$(d\gamma/dt^{-1})$ mN m ⁻¹ s ⁻¹	τ_2 Seg
11.6	61.2	245.7	50.7
20.6	26.9	34.8	5.3
35.5	27.8	52.7	11.3
a 323.15 K.			
1.27	61.4	396.8	131.2
2.55	26.5	156.7	109.8
11.6	58.9	282.0	72.0
29.3	8.6	9.3	3.7
35.5	12.4	20.8	8.8

Tabla 4.69. Tiempo de relajación micelar, τ_2 , del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

$10^6 C_0$ (mol cm ⁻³)	$(d\gamma/dt^{-1/2})$ mN m ⁻¹ s ^{-1/2}	$(d\gamma/dt^{-1})$ mN m ⁻¹ s ⁻¹	τ_2 Seg
1.03	17.7	22.8	5.2
1.16	14.1	20.2	6.4
1.30	13.5	17.7	5.4
1.47	128	17.0	5.5
a 323.15 K.			
1.03	9.1	13.4	6.8
1.16	11.1	19.3	9.5
1.30	8.7	9.8	3.4
1.47	7.2	6.6	2.6

Estos resultados están en concordancia con lo que propone Patist et al. (2001), Oh y Shah, (1991) y Oh et al. (1992). Significa que el Brij 92 forma micelas muy inestables y que el Tween 80 forma micelas estables. Así, el Brij 92 forma una espuma más pequeña y el Tween 80 forma una espuma grande. Los tiempos de relajación del Brij 92 son más grandes que del Tween 80. Este comportamiento está en concordancia con el módulo de elasticidad de Marangoni que a continuación se indica.

IV.17. Módulo de elasticidad de Marangoni, ϵ_m , derivado con datos de tensión superficial dinámica

La elasticidad de una película obtenida por medio de las mediciones dinámicas depende de las tensiones aplicadas al sistema. Este fenómeno se conoce como efecto Gibbs-Marangoni, el cual se puede medir por medio del módulo de elasticidad de Marangoni, ϵ_m , que está relacionado al cambio en la tensión superficial con el tiempo. La espuma se lleva a cabo bajo condiciones dinámicas presentándose en ella el efecto de extensión y compresión, generando, por lo tanto, gradientes de tensión superficial, es decir, durante la extensión la tensión superficial es grande y durante la compresión la tensión superficial es pequeña con respecto a los valores de equilibrio. Tanto el módulo de elasticidad de Marangoni como la tensión superficial dinámica dependen de la naturaleza de la tensión y el esfuerzo aplicado al sistema. En efecto, los valores de estos parámetros están gobernados por la frecuencia de los ciclos de dilatación-compresión los cuales dependen de los ciclos de extensión-contracción que ocurren en la película (Djuve et al., 2001).

Huang et al. (1986) derivaron una ecuación ($\epsilon_m = d\gamma/d\ln\omega$; donde ω es la frecuencia) para calcular el módulo de elasticidad de Marangoni empleando valores experimentales de tensión superficial dinámica de soluciones acuosa de tensoactivos. Huang (1985) demostró que la pendiente de la tensión superficial dinámica en función de la frecuencia tiene una relación directa con el módulo de elasticidad de Marangoni, misma que genera una buena correlación entre las propiedades superficiales y la estabilidad de espuma. Posteriormente, Djuve et al. (2001) derivan otra ecuación ($|\epsilon_m| = |2d\gamma/d\ln t|$) para calcular el módulo de elasticidad de Marangoni con valores experimentales de tensión superficial dinámica de soluciones acuosas de la etilhidroxi celulosa de etilo (EHEC) y soluciones acuosas de dodecil sulfato de sodio (SDS), observan que el valor máximo obtenido en el módulo de elasticidad de Marangoni es el parámetro para decir si el sistema forma una espuma estable o si el sistema no forma espuma, lo cual lo explican mediante el siguiente argumento: si el máximo en el módulo de elasticidad superficial se obtiene a tiempos muy cercanos de cero (0.05 s para el SDS), entonces el sistema tendrá una espuma estable, mientras que si el máximo en el módulo de elasticidad esta alejado de cero (0.05 -0.1 s para el EHEC) el sistema es antiespumante.

Por lo anterior, en este trabajo derivando la ecuación IV.5 se obtienen una ecuación para calcular el módulo de elasticidad de Marangoni, el cual está expresada por:

$$\varepsilon_m = \frac{d\pi(t)}{d \ln t} = \pi(eq) \left[\frac{\alpha t}{(1 + \alpha t)^2} \right] \quad (IV.10)$$

Dado que $\alpha = P_2$, entonces la ecuación IV.10 toma la forma siguiente:

$$\varepsilon_m = \pi(eq) \left[\frac{P_2 t}{(1 + P_2 t)^2} \right] \quad (IV.11)$$

IV.18. Módulo de elasticidad de Marangoni de seis sistemas binarios: DEA, MDEA, Brij 92, Tween 80, Surfínoil DF110-D y Surfínoil 485 en agua y de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 en MDEA/DEA (45% masa de amina total y 55 % masa de agua)

Las Figuras 4.66 a 4.79 muestran los módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua y MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura, para cuatro tensoactivos no iónicos: Brij 92, Tween 80, Surfínoil DF110-D y Surfínoil 485 + agua y dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K, respectivamente.

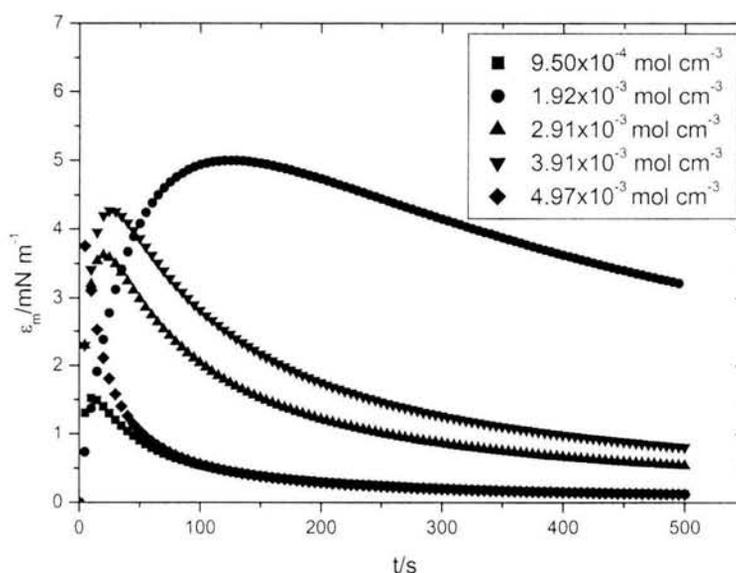


Figura 4.66. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.

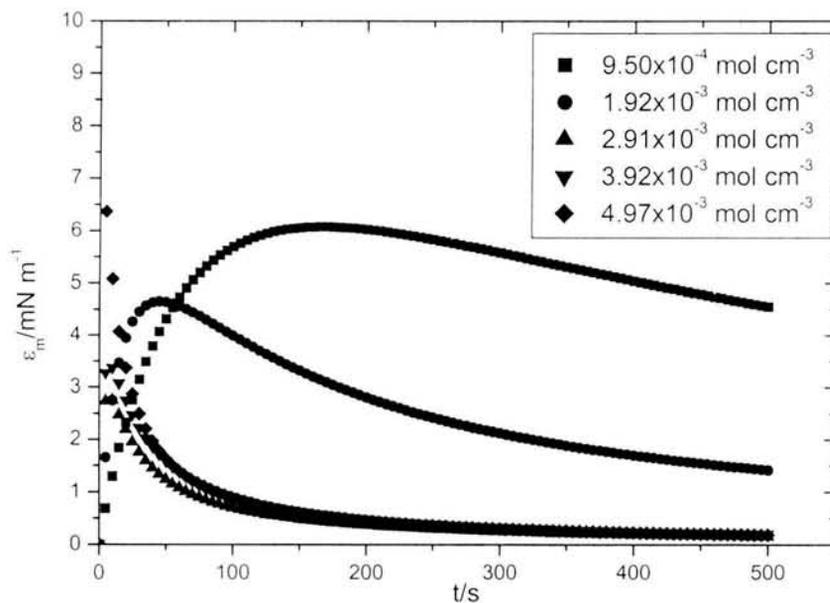


Figura 4.67. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función del tiempo, a 333.15 K.

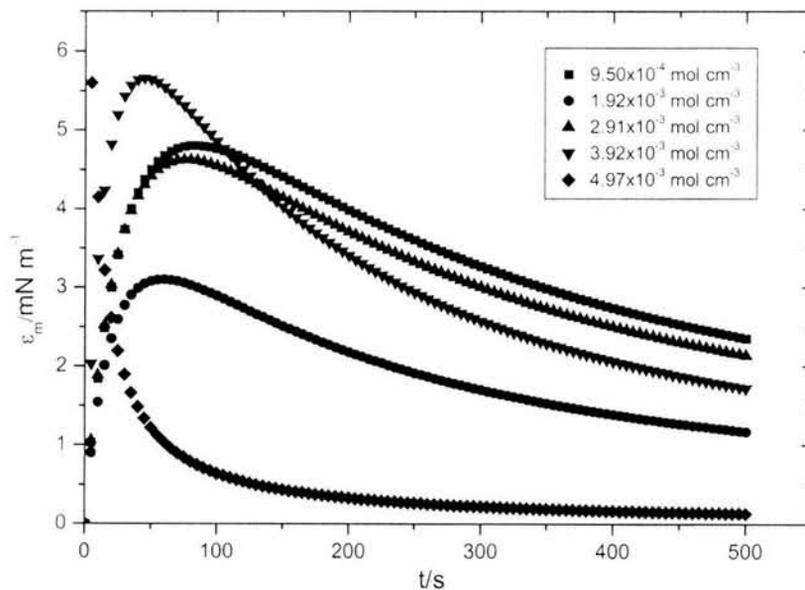


Figura 4.68. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función del tiempo, a 343.15 K.

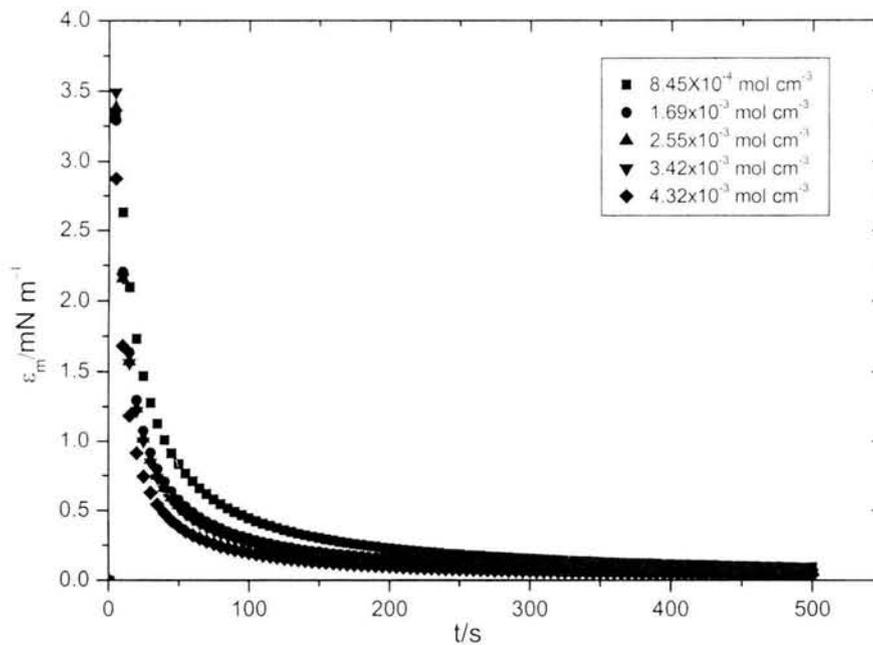


Figura 4.69. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.

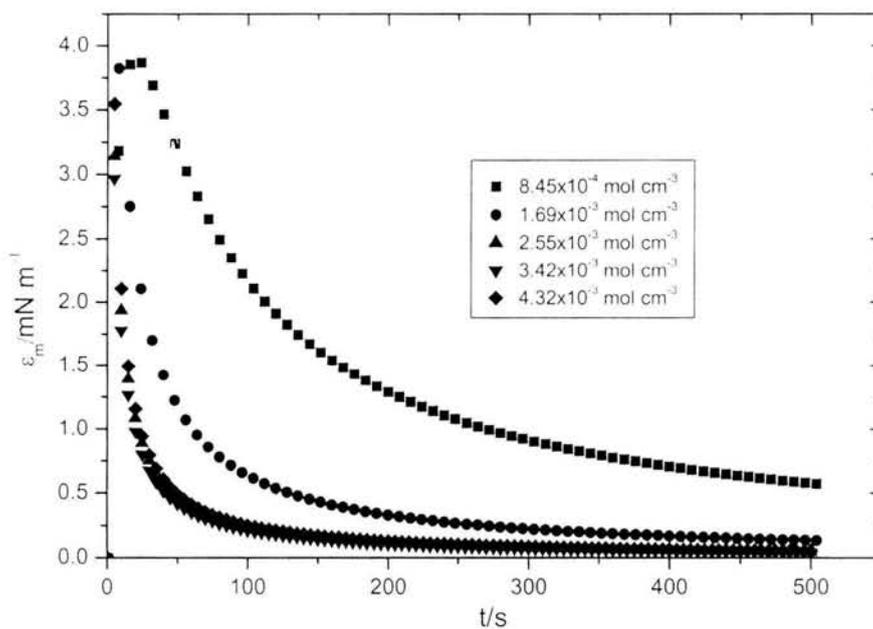


Figura 4.70. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función del tiempo, a 333.15 K.

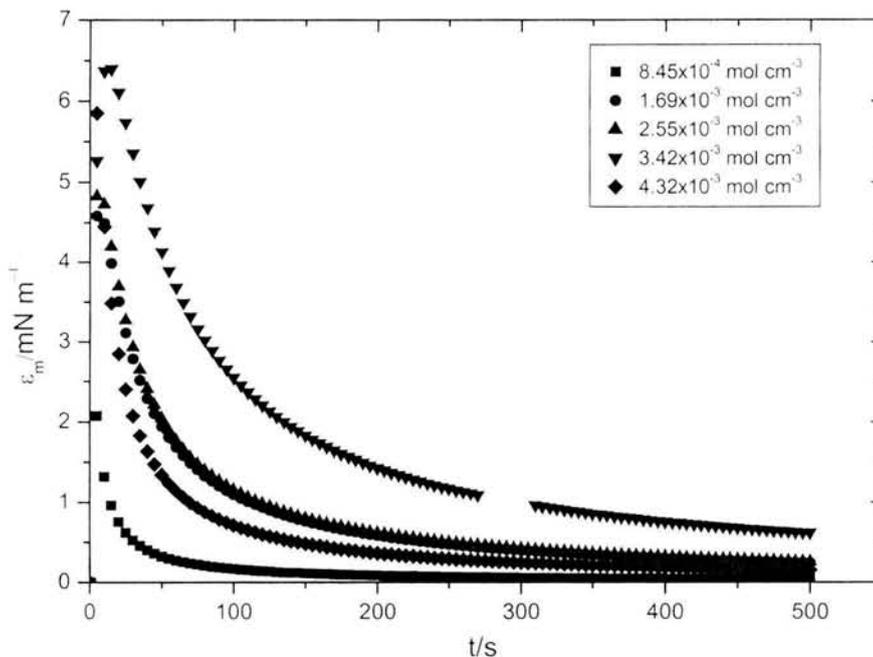


Figura 4.71. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función del tiempo, a 343.15 K.

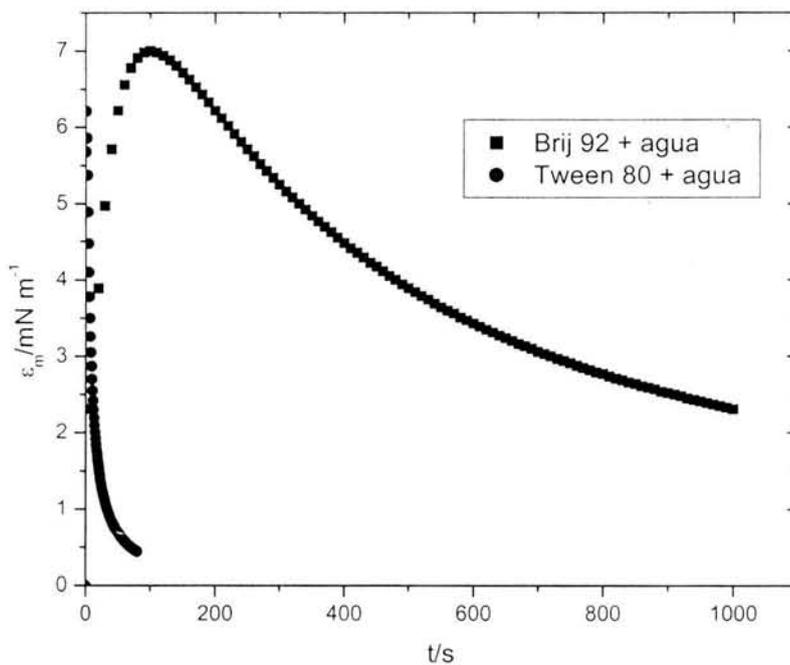


Figura 4.72. Módulo de elasticidad de Marangoni para el Brij 92, Tween 80 + agua, en función del tiempo, a 313.15 K.

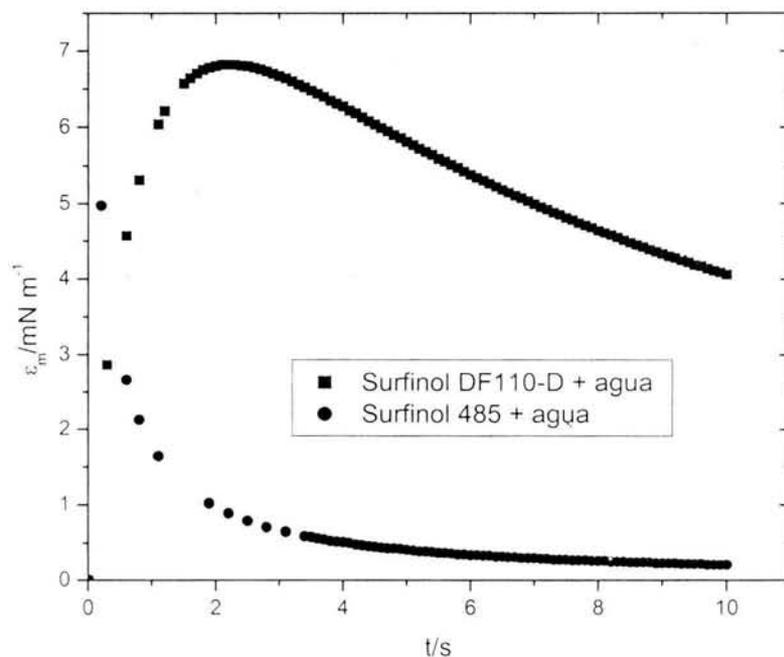


Figura 4.73. Módulo de elasticidad de Marangoni para el Surfinol DF110-D, Surfinol 485 + agua, en función del tiempo, a 313.15 K.

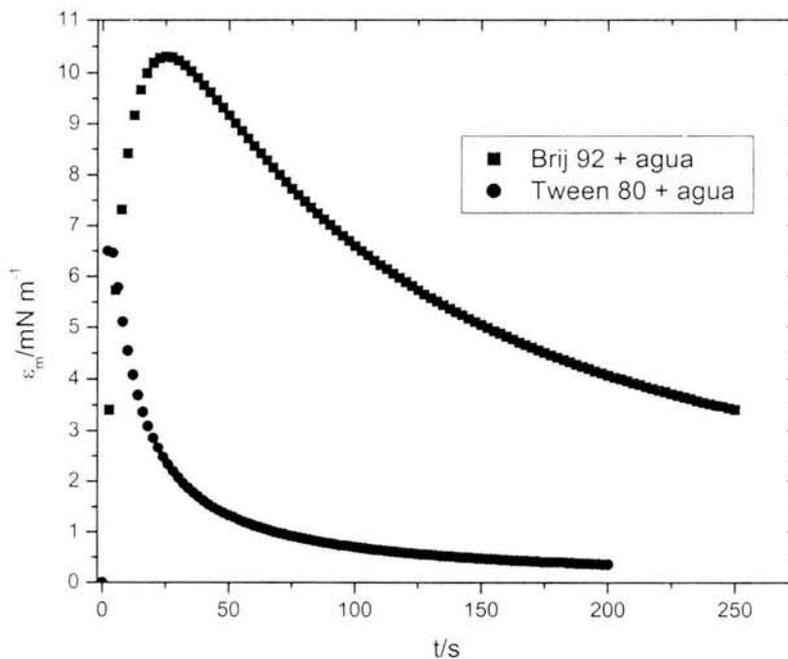


Figura 4.74. Módulo de elasticidad de Marangoni para el Brij 92, Tween 80 + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.

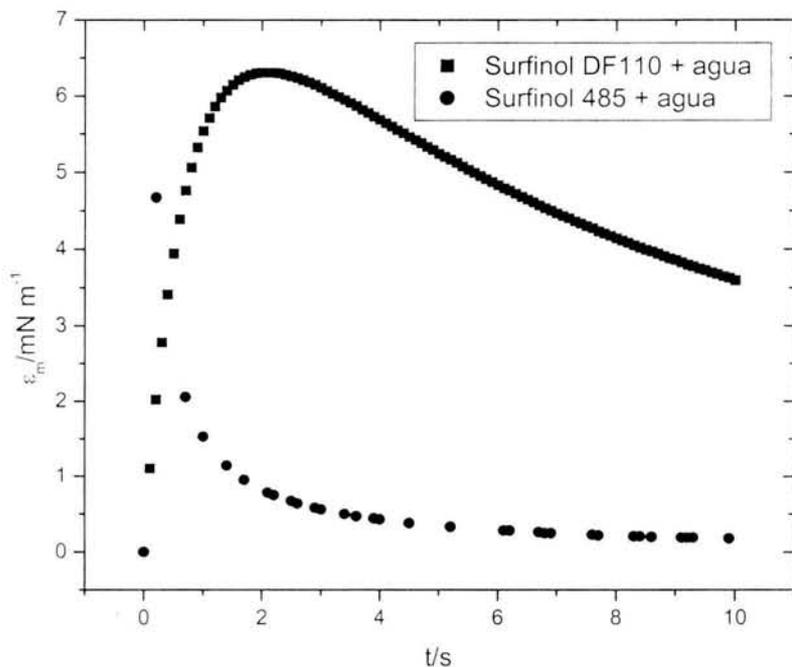


Figura 4.75. Módulo de elasticidad de Marangoni para el Surfinol DF110-D, Surfinol 485 + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.

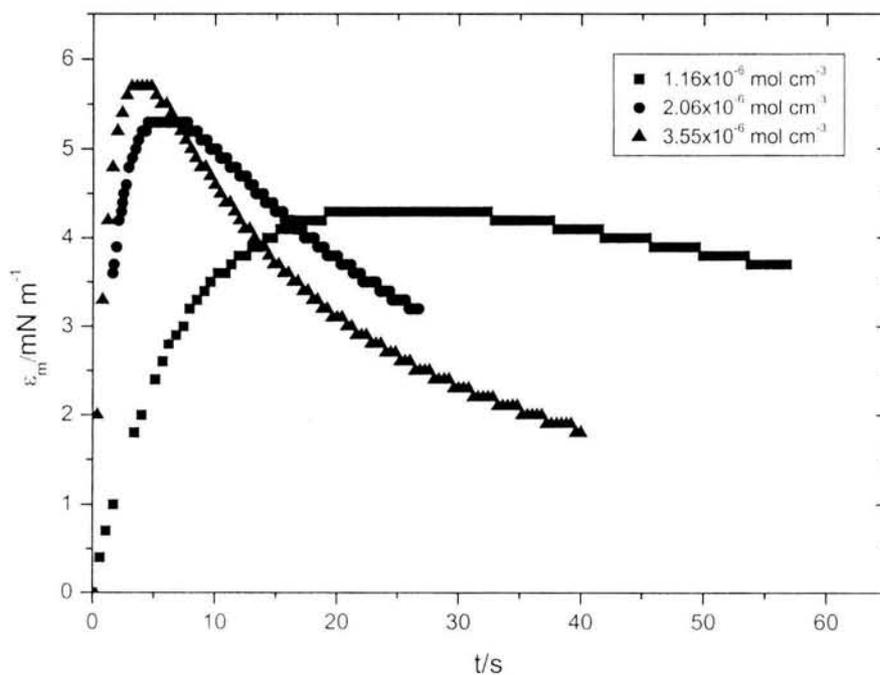


Figura 4.76. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 313.15 K.

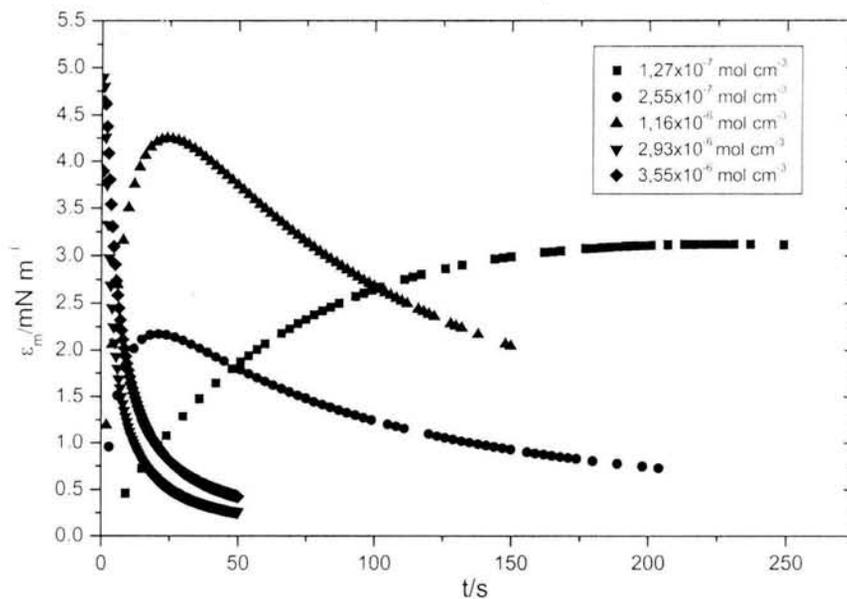


Figura 4.77. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 323.15 K.

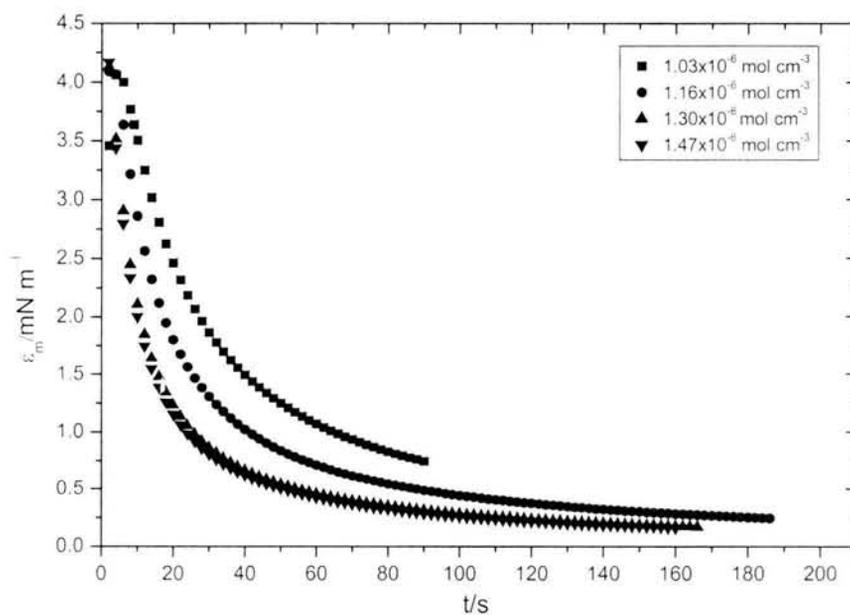


Figura 4.78. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 313.15 K.

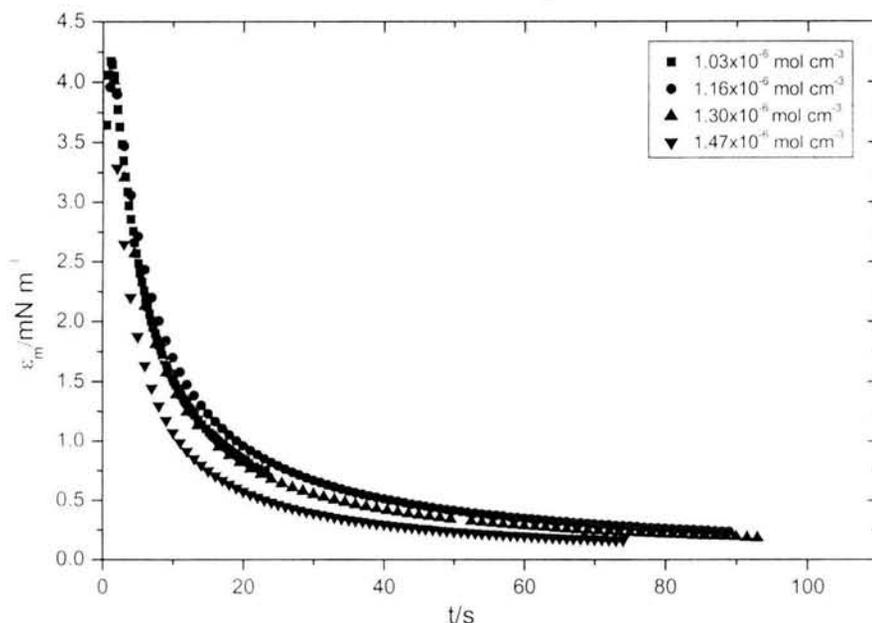


Figura 4.79. Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 323.15 K.

Las observaciones experimentales demuestran que la capacidad de formar una espuma está directamente relacionada con la tensión superficial dinámica, ya que la estabilidad de espuma está influenciada por el módulo de elasticidad de Marangoni en la interfase aire-líquido.

Las Figuras 4.66 a 4.71 muestran los resultados del módulo de elasticidad de Marangoni para la mezcla DEA + agua y MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura. Los resultados están en concordancia con lo que propone Djuve et al. (2001); es decir, que a tiempos cortos, el máximo del módulo de elasticidad de Marangoni es grande y la adsorción es pequeña, mientras que a tiempos largos el máximo del módulo de elasticidad de Marangoni es pequeño y la adsorción es grande. Asimismo, la MDEA tiene valores del módulo de elasticidad de Marangoni y de estabilidad de espuma más pequeños que la DEA (ver Tablas 4.70 y 4.71).

Tabla 4.70. Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

$10^3 C_{eq}$ (mol cm ⁻³)	t (s)	ϵ_{mmax} (mN m ⁻¹)	Σ (s)
323.15 K			
0.95	130	1.52	9.96
1.92	125	5.00	9.59
2.91	20	3.62	9.23
3.92	25	4.27	8.10
4.97	5	3.75	5.99
333.15 K			
0.95	165	6.08	8.56
1.92	45	4.65	7.93
2.91	10	4.75	7.34
3.92	10	3.37	4.94
4.97	5	6.37	3.45
343.15 K			
0.95	85	4.80	6.84
1.92	60	3.10	6.63
2.91	75	4.62	5.67
3.92	45	5.66	3.67
4.97	5	5.60	1.58

Tabla 4.71. Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.

$10^3 C_{eq}$ (mol cm ⁻³)	t (s)	ϵ_{mmax} (mN m ⁻¹)	Σ (s)
323.15 K			
0.85	5	3.33	8.28
1.69	5	3.29	7.52
2.55	5	3.38	7.26
3.42	5	3.49	6.59
4.32	5	2.87	3.91
333.15 K			
0.85	24	3.87	6.68
1.69	8	3.82	6.57
2.55	5	3.14	6.28
3.42	5	2.97	5.92
4.32	5	3.55	3.43
343.15 K			
0.85	5	2.07	4.40
1.69	5	4.58	4.20

continúa

continúa

2.55	5	4.82	4.00
3.42	15	6.40	3.31
4.32	5	5.85	1.47

Las Figuras 4.80 y 4.81 muestran los resultados del máximo del módulo de elasticidad de Marangoni en función de la altura de la espuma para DEA + agua y MDEA + agua, en el intervalo de temperatura de 323.15 a 343.15 K, respectivamente. Los resultados tienen el siguiente orden: 3.6, 5.0 y 4.8 mN m⁻¹ para DEA y de 3.3, 3.5 y 4.7 mN m⁻¹ para MDEA. También, se observa que los valores de estabilidad de espuma para la MDEA son menores que la DEA, significa que la MDEA tiene una actividad superficial mayor que la DEA.

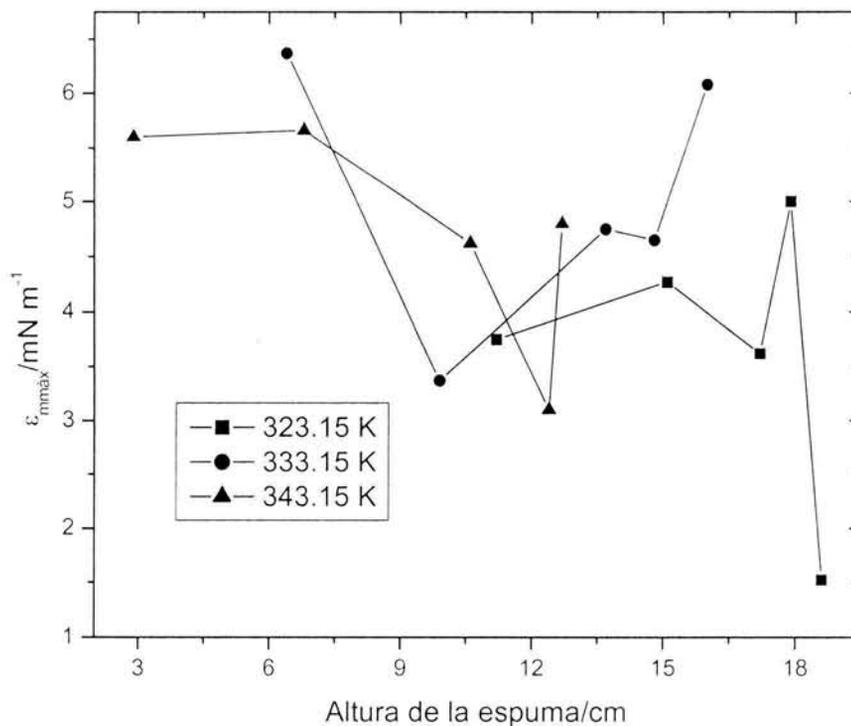


Figura 4.80. Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función de la altura de la espuma y la temperatura.

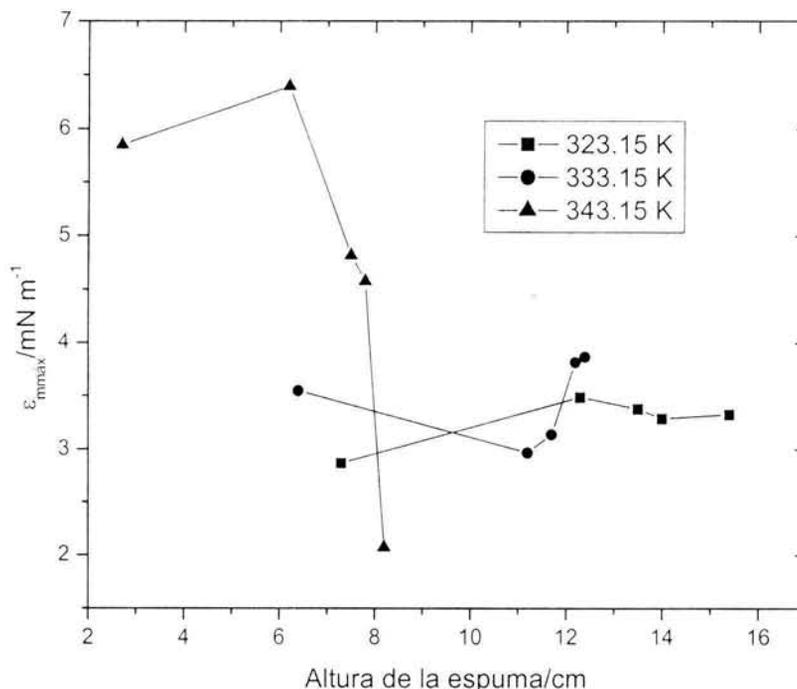


Figura 4.81. Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función de la altura de la espuma y la temperatura.

Las Figuras 4.72 a 4.75 y la Tabla 4.72 muestran el máximo del módulo de elasticidad de Marangoni del sistema Brij 92, Tween 80, Surfínoil 485 y Surfínoil DF110-D en agua, en función de la temperatura. Con los valores experimentales de la tensión superficial dinámica (ver Apéndice I) se derivó el módulo de elasticidad de Marangoni, cuyos valores máximos se muestran en la Tabla 4.72.

Tabla 4.72. Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni de cuatro tensoactivos no iónicos en agua.

$2.51 \times 10^{-7} C_{eq}$ (mol cm ⁻³)	t (s)	ε _{mmax} (mN m ⁻¹)	Σ (s)
313.15 K			
Surfínoil 485	0.2	5.01	6.42
Tween 80	27.2	6.33	4.58
Surfínoil DF110-D	10.0	0.15	2.02

continúa

continúa			
Brij 92	180	12.37	0.95
323.15 K			
Surfinol 485	0.2	4.45	5.35
Tween 80	2	6.74	4.54
Surfinol DF110-D	2.1	6.56	1.76
Brij 92	27.5	11.45	0.92

De los resultados mostrados en la Tabla 4.72, se observa que el máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el Brij 92 se obtiene a tiempos más grandes que el Tween 80, que el Surfinol 485 y que el Surfinol DF110-D, el cual pone en evidencia que el Brij 92 es un antiespumante. Significa que el Brij 92 tiene una actividad superficial mayor que el Tween 80, que el Surfinol 485 y que el Surfinol DF110-D.

Las Figuras 4.76 a 4.79 muestran los módulo de elasticidad de Marangoni del sistema Brij 92 y del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura. Los resultados confirman que el Brij 92 genera menos espuma que el Tween 80 porque los tiempos para alcanzar el máximo del módulo de elasticidad de Marangoni son más grandes que del Tween 80 aún cuando ésta presente dos aminas (ver Tabla 4.73).

Tabla 4.73. Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni del Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

$10^6 C_{eq}$ (mol cm ⁻³)	t (s)	ϵ_{mmax} (mN m ⁻¹)	Σ (s)
Brij 92, a 313.15 K			
1.16	25.5	4.3	2.43
2.06	5.9	5.3	1.62
3.55	3.6	5.7	1.53
Brij 92, a 323.15 K			
0.127	228	3.2	1.45
1.16	24	4.2	1.30
3.55	1	4.6	0.79
Tween 80, 313.15 K			
1.03	5	4.0	no
1.16	5	4.1	

continúa

continúa			
1.30	5	4.2	no
1.47	5	4.3	no
Tween 80, 323.15 K			
1.03	2	4.4	no
1.16	2	4.0	no
1.30	2	4.1	no
1.47	2	4.1	no

La Figura 4.82 contiene los máximos del módulo de elasticidad de Marangoni en función de la altura de la espuma del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa. Podemos observar que el máximo del módulo de elasticidad de Marangoni disminuye al aumentar la temperatura.

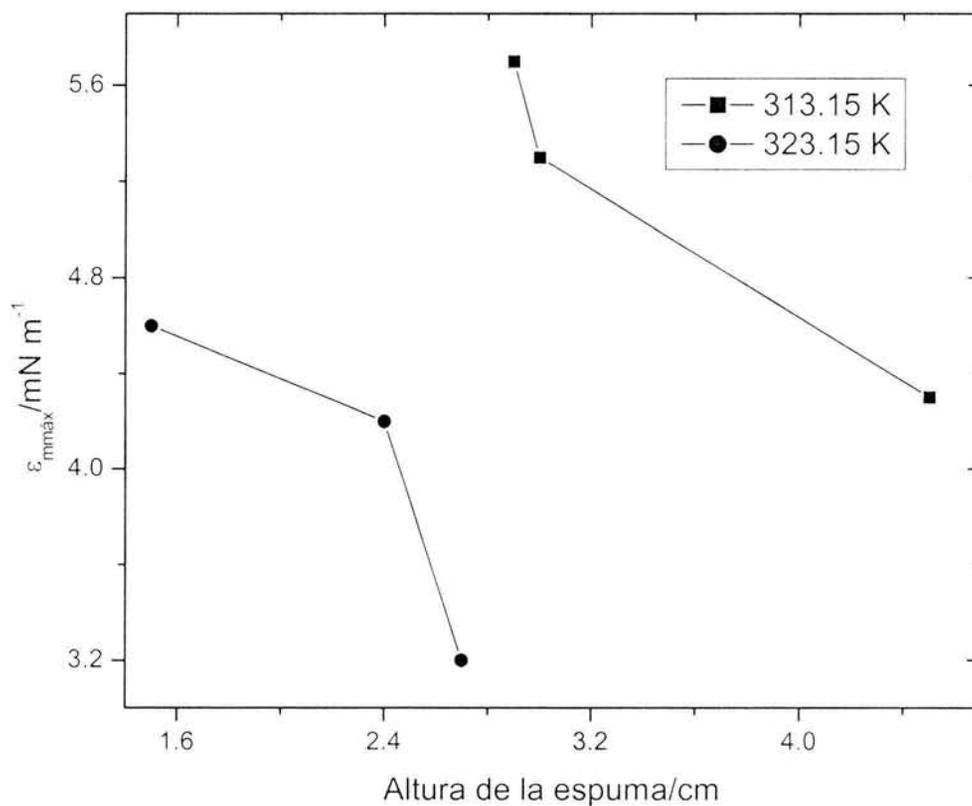


Figura 4.82. Módulo de elasticidad de Marangoni del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la altura de la espuma y la temperatura.

Las Figuras 4.83 y 4.84 muestran la altura de la espuma en función del tiempo para el sistema Brij 92, Tween 80, Surfínol DF110-D y Surfínol 485 + agua, a 313.15 y 323.15 K, respectivamente. El Brij 92 y el Surfínol DF110-D en todo el experimento su altura se mantienen constante no así para los tensoactivos Surfínol 485 y Tween 80, ya que su altura disminuye al aumentar el tiempo.

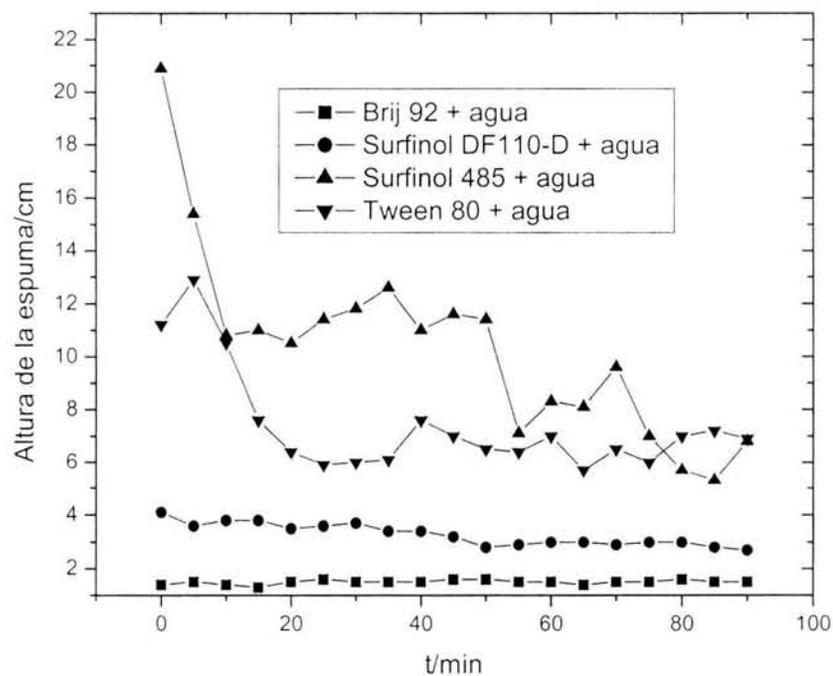


Figura 4.83. Altura de la espuma de cuatro tensoactivos no iónicos, en función del tiempo, a 313.15 K.

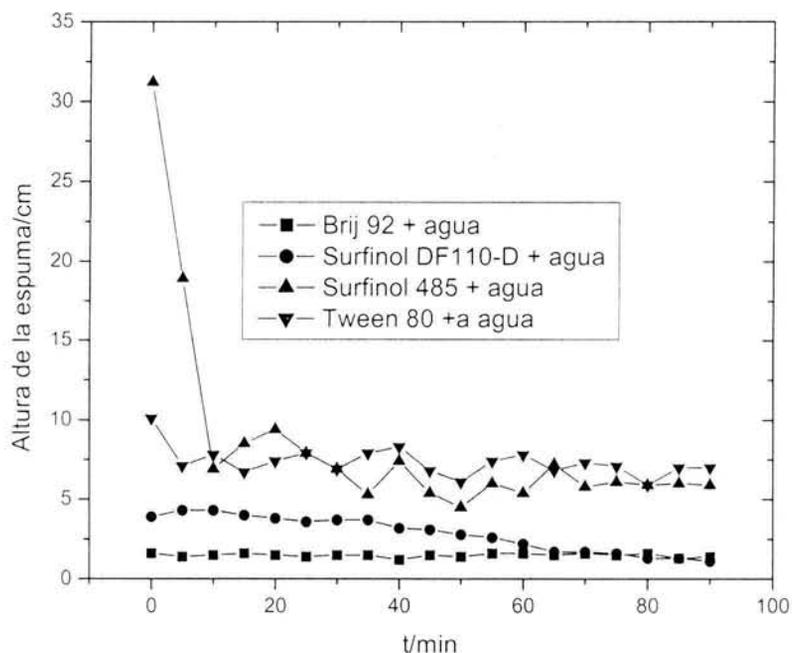


Figura 4.84. Altura de la espuma de cuatro tensoactivos no iónicos, en función del tiempo, a 323.15 K.

La Figura 4.85 muestra la tensión superficial de equilibrio en función de la concentración para dos sistemas binarios: DEA y MDEA + agua, a 313.15 K. Vemos que la MDEA tienen valores más pequeños que la DEA, la cual produce una espuma menor que la DEA como se observa en la Figura 4.86.

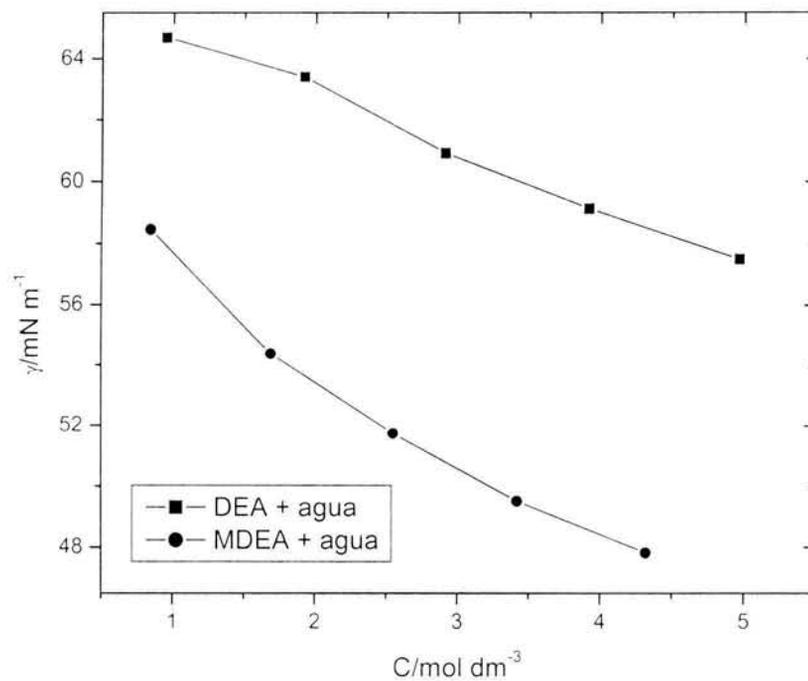


Figura 4.85. Tensión superficial de equilibrio de dos aminas en agua, en función de la concentración, a 313.15 K.

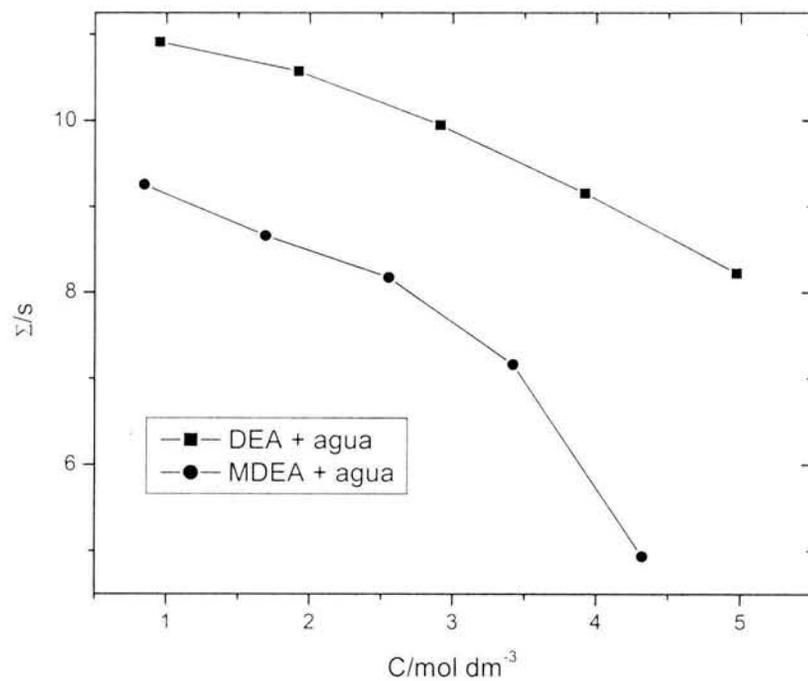


Figura 4.86. Índice de estabilidad de espuma de dos aminas en agua, en función de la concentración, a 313.15 K.

La Figura 4.87 muestra valores de la tensión superficial de equilibrio del surfínol 485, Surfínol DF110-D, Tween 80, Ocenol y Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K. Se observa que la tensión superficial tiene el siguiente orden: Surfínol 485 > Surfínol DF110-D > Tween 80 > Ocenol > Brij 92. La Figura 4.88 muestra valores de la estabilidad de espuma del Brij 92, Ocenol, Surfínol DF110-D y Surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, A 313.15 K, donde la estabilidad de espuma tiene el siguiente orden Surfínol 485 > Surfínol DF110-D > Ocenol > Brij 92. Se concluye que el Brij 92 es el mejor antiespumante y como sus propiedades de superficie y de bullo son similares al ocnol, se puede decir que el Brij 92 puede sustituir al ocnol para controlar la espuma en los procesos de endulzamiento de corrientes gaseosas.

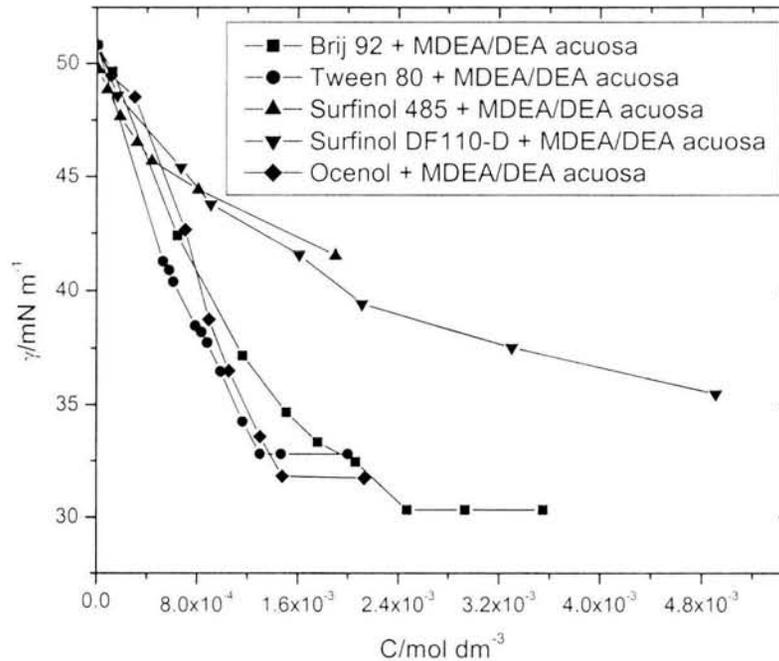


Figura 4.87. Tensión superficial de equilibrio de cinco tensoactivos + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

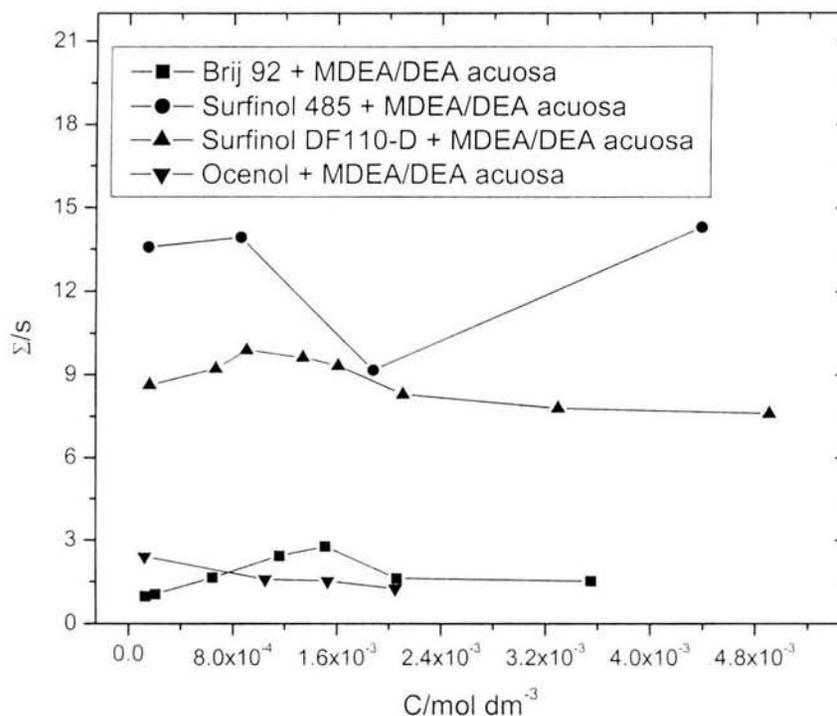


Figura 4.88. Índice de estabilidad de espuma de cuatro tensoactivos + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.

Tabla 4.74. Parámetros de ajuste para correlacionar la tensión superficial de componentes puros, sistemas binarios y sistemas ternarios.

Sistema	A	B	C	R ²	σ
Agua	122.36	-0.169		0.999	0.11
DEA (este trabajo)	78.17	-0.099		0.998	0.06
DEA (Vázquez et al., 1996)	96.38	-0.165		0.999	0.002
DEA (Ramírez-Verduzco, 2001)	73.34	-0.0836		0.999	0.0009
MDEA (este trabajo)	69.62	-0.102		0.996	0.18
MDEA (Alvarez et al., 1998)	335.009	-1.84	0.003	0.995	0.11
DEA (10 % masa, este trabajo)	61.10	0.12	-0.0004	0.977	0.30
DEA (10 % masa, Rinker et al., 1994)	29.38	0.31	-0.0007	0.993	0.20
DEA (20 % masa, este trabajo)	83.82	-0.0006	-0.0002	0.977	0.05

continúa

continúa

DEA (20 % masa, Rinker et al., 1994)	24.10	0.34	-0.0007	0.985	0.31
DEA (30 % masa, este trabajo)	81.10	-0.03	-0.0002	0.995	0.06
DEA (30 % masa, Rinker et al., 1994)	31.00	0.29	-0.0006	0.999	0.002
MDEA + DEA + agua (313.15 K)	54.73	-0.19	0.0009	0.998	0.02
MDEA + DEA + agua (323.15 K)	53.25	-0.16	0.0002	0.996	0.04
MDEA + DEA + agua (333.15 K)	52.77	-0.25	0.0021	0.995	0.05

CONCLUSIONES

1. La tensión superficial de equilibrio de las soluciones acuosas de las dos alcanolaminas (MDEA + agua y DEA + agua) es moderada, para los sistemas ternarios (DEA + agua + tensoactivo) es buena y para los sistemas multicomponentes (MDEA + DEA + agua + tensoactivo) es típica de tensoactivos declarados. En el sistema binario la MDEA reduce más la tensión superficial del agua que la DEA, implica que la capa superficial se encuentra mayoritariamente formada por MDEA en todas las temperaturas estudiadas. En el sistema ternario el Brij 92 presenta mayor actividad superficial que el Surfíno 485, Span 20 y Span 80 y en el sistema multicomponente, nuevamente, el Brij 92 reduce más la tensión superficial que el Tween 80, Surfíno DF110-D y Surfíno 485. Lo más trascendente, es que el Brij 92 presenta valores parecidos al del Ocenol (tensoactivo actualmente en uso en las plantas endulzadoras de gases).
2. La tensión superficial de equilibrio tanto de sistemas ternarios y multicomponentes indican que el Brij 92 presenta mayor actividad superficial que el resto de los tensoactivos.
3. La estabilidad de espuma de las soluciones acuosas de alcanolaminas es mayor que en los sistemas multicomponente (en presencia de Brij 92 y Ocenol) bajo las mismas condiciones de flujo, temperatura y de equilibrio.
4. La tensión superficial de equilibrio tanto de sistemas ternarios y multicomponentes disminuye al aumentar la concentración. El sistema multicomponente en presencia de Brij 92 y Tween 80 presentan concentración micelar crítica.
5. La ecuación de estado de Langmuir representa de manera satisfactoria la presión superficial de los sistemas binarios, ternarios y multicomponentes. Los parámetros de ajuste de los sistemas multicomponentes fueron empleados para calcular el coeficiente de difusión y el módulo de elasticidad de Marangoni.

CONCLUSIONES

6. La tensión superficial dinámica de las soluciones acuosas de las alcanolaminas muestran un comportamiento lineal en todo el intervalo de tiempo y disminuyen al aumentar la concentración y la temperatura sin mostrar un mínimo como lo hacen los sistemas multicomponentes (Brij 92, Tween 80 y Ocenol) o sistemas binarios (Brij 92, Tween 80, SurfínoI DF110-D y SurfínoI 485) en agua.
7. La tensión superficial dinámica de las soluciones acuosas de las alcanolaminas está controlada por una barrera energética de adsorción, a las tres temperaturas estudiadas.
8. La tensión superficial dinámica de los tensoactivos en agua está controlada por la difusión, a dos de las temperaturas estudiadas.
9. La tensión superficial dinámica de los sistemas multicomponentes (en presencia de Brij 92 y Tween 80) está controlada por una barrera energética de adsorción, indicando que la superficie se encuentra ocupada por las aminas.
10. Los datos de equilibrio muestran que el área superficial por molécula del tensoactivo Brij 92 en el sistema multicomponente es más grande que del sistema multicomponente en presencia de Tween 80 y aumenta al incrementar la temperatura. Las moléculas del Brij 92 se encuentran en la superficie en mayor proporción que las moléculas del Tween 80 y que al aumentar la temperatura las moléculas tienen mayor movimiento permitiendo que el área superficial por molécula aumente.
11. Los datos de equilibrio muestran que el módulo de elasticidad de Gibbs del tensoactivo Brij 92 en el sistema multicomponente, disminuye al aumentar la temperatura y la concentración del tensoactivo, significa que a cierta concentración y temperatura el módulo de elasticidad será igual a cero y la espuma desaparecerá, mientras que, en el sistema multicomponente en presencia del Tween 80 muestra un comportamiento inverso, significando que el Tween 80 formará una espuma estable.

CONCLUSIONES

12. El módulo de elasticidad de Marangoni explica el comportamiento de la tensión superficial dinámica. Un módulo de Marangoni pequeño implica una espuma menor para las aminas en agua y para un módulo de Marangoni grande, la espuma es menor para los tensoactivos en agua como para los sistemas multicomponentes (en presencia de Brij 92 y Tween 80).

13. Las propiedades de superficie y de estabilidad de espuma del Brij 92 son similares al del Ocenol. Se propone al Brij 92 como alternativa para el control de la espuma en las plantas endulzadoras de gases.

- Adamson, A. W. **1967**. Physical Chemistry of Surfaces. Interscience, New York, 2nd Edition, caps. I, II, III and IV.
- Aveyard, R., y Hayden, D.A. **1972**. An Introduction to the principles of surfaces chemistry. Cambridge.
- Águila-Hernández, J. **1987**. Tensión Superficial de Mezclas de n-Alcanos y de Cicloalcanos. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Puebla.
- Águila-Hernández, J. **1994**. Estudio de la viscosidad de mezclas binarias de disolventes físicos y químicos como función de la temperatura y composición. Tesis de Maestría, Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional.
- Águila-Hernández, J., Hernández, I., and Trejo A., **1995**. Temperature Dependence of the Surface Tension for Binary Mixture of n-Butanenitrile + n-Alakenes. Int. J. Thermophysics, 16(1), 45-52.
- Águila-Hernández, J., y Trejo A. **1995**. Aparato y procedimiento para determinar la tensión superficial de líquidos puros. Patente registrada ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. 9501985
- Águila-Hernández, J., Gómez-Quintana, R., Murrieta-Guevara, F., Romero-Martínez, A., Trejo, A. **2001**. Liquid Density of Aqueous Blended Alkanolamines and N-Methylpyrrolidone as a Function of Concentration and Temperature. J. Chem. Eng. Data, 46, 861-867.
- Águila-Hernández, J., Trejo, A., and Gracia-Fadrique, J. **2001**. Surface Tension of aqueous solutions of alkanolamines: single amines, blended amines and systems with nonionic surfactants. Fluid Phase Equilibria 185, 165-175.
- Águila-Hernández J y Trejo A. **2002**. Propiedades interfaciales de 2-amino-2-metil-1-propanol en solución acuosa de metildietanolamina + dietanolamina. XVII Congreso Nacional de Termodinámica. 9-13 de septiembre. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.
- Águila-Hernández J y Trejo A. **2002**. Aparato y procedimiento para determinar el volumen y la estabilidad de espuma de sistemas binarios y multicomponentes. Patente registrada

- ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Número de expediente PA/a/2002/011822 y número de folio PA/E/2002/053056.
- Águila-Hernández J y Trejo A. **2002**. Instrumentación para el estudio de la estabilidad de espuma de sistemas acuosos de alcanolaminas. II Congreso Internacional de Ingeniería Física. 29 de Julio al 2 de agosto. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.
- Alexander, A.E.; Napper, D.H. **1971**. Emulsion Polymerization. *Progress in Polymer Science*. 3, 147-197.
- Al-Ghawas, H. A., Hagewische, D. P., Ruiz-Ibañez, G. and Sandall, O. C. **1989**. Physicochemical Properties Important for Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Methyl-diethanolamine. *J. Chem. Eng. Data*. 34, 385-391.
- Andreas, J. M., Hauser, E. A., Tucker, W.B. **1938**. Boundary Tension by Pendant Drops. *J. Phys. Chem*, 42, 1001-1019.
- Adam, N. K. **1941**. *The Physical and Chemistry of Surfaces*. 3rd Ed. Oxford University Press, Oxford.
- Air Productos and Chemicals, Inc. **1992**.
- Alvarez, E., Rendo, E., Sanjurjo, B., Sánchez-Vilas, M., Navaza, J.M. **1998**. Surface Tension of Binary Mixtures of Water + N-Methyl-diethanolamine and Ternary Mixtures of This Amine and Water + Monoethanolamine, Diethanolamine, and 2-Amino -2-methyl-1-propanol from 25 °C to 50 °C. *J. Chem. Eng. Data*. Vol. 43 (6), 1027-1029.
- A.S.T.M. D-3519. **1982**. Reapproved. Blender Test.
- A.S.T.M. D-3601-77. **1982**. Reapproved. Bottle Test.
- Barigou, M. **2002**. Emulsions, Foams, and Thin Film. Edited by Mittal, K.L. and Kumar, K. *Chem. Eng. Research and Design*. 80(A1), 128-129.
- Bashforth, F., Adams J.C. **1883**. "An Attempt to Test the Theories of Capillary Action", Cambridge University Press, London.

- Brunauer, S., Emmett, P. H., and Teller, E. **1938**. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-319.
- Bikerman, J.J. **1973**. *Foams*, Springer Verlag, New York. pp 76, 203.
- Bleys, G., Joos, P. **1985**. Adsorption Kinetics of Bolaform Surfactants at the Air/Water Interface. *J. Phys. Chem.* 89, 1027-1032.
- Borwankar, R.P.; Wasan, D.T. **1983**. The Kinetics of Adsorption at Surface Active Agents at Gas-Liquid Surface. *Chem. Eng. Science.* 1637-1649.
- Clint, J. H.; Corkill, J. M.; Goodman, J. F.; Tate, J. R. **1968**. Adsorption of η -alkanols at the air/aqueous solution interface. *Hydrophobic Surfaces*, Kendall Award Symp. (1969), Meeting Date, 5 180-188.
- Clarkson, J.R.; Cui, Z.F.; Darton, R.C. **1999**. Protein Denaturation in Foam. *J. of Colloid and Interface Science.* 215, 323-332.
- Chattoraj, D.K., y Birdi, K.S., **1984**. *Adsorption and the Gibbs Surface Excess*. Plenum Press, New York.
- Donbrow, M. **1975**. Molecular Areas of Polyoxyethylene n-Hexadecanols and Relation of Area to Chain Length and Dispersion of Nonionic Surfactants. *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 53, No. 1145-147.
- Djuve, J., Pugh, R.J., Sjoblom, J. **2001**. Foaming and Dynamic Surface Tension of Aqueous Polymer/Surfactants Solutions 1: Ethyl(hydroxyethyl) Cellulose and Sodium Dodecyl Sulphate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 186, 189-202.
- De Visser C., Perron G., Desnoyers, J.E. **1977**. The Heat Capacities, Volumes, and Expansibilities of Ter-butyl alcohol- water Mixtures from 6 to 65 °C. *Can. J. Chem.*, 55: 856-862.
- Eastoe, J., Dalton, J.S., Philippe, G.A., Rogueda, E.R., Pitt, A.R., Simister, E.A. **1997**. Dynamic Surface Tension of Nonionic Surfactant Solutions. *J. Colloid and Interface Sci.* 188, 423-430.
- Eastoe, J., Dalton, J.S. **2000**. Dynamic Surface Tension and Adsorption Mechanisms of Surfactants at the Air-Water Interface. *Advances in Colloid and Interface Science* 85, 103-144.
- Elizalde F., Gracia J., Costas M. **1988**. Effect of Aggregates in Bulk and Surface Properties. Surface Tension, Foam Stability, and Heat Capacities for 2-Butoxyethanol + Water. *J. of Physical Chemistry.* 92: 3565-3568.
- Englert-Chwoles, A.; Prigogine, I. **1958**. Statistical theory of the surface tension of binary mixtures. *Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique.* 55, 16-25.
- Eckert, C. A.; Prausnitz, J. M. **1964**. Statistical surface thermodynamics of simple liquid mixtures. *AIChE Journal*, 10(5), 677-83.
- Erikson, T.A. **1965**. *J. Phys. Chem.* 69, 1809.
- Fathi, J., Baheri, H.R. **1995**. Amine Plant Simulation by Mass Transfer and Kinetic Approach. *Chem. Eng. Technol.* 18, 397-402.
- Fainerman, V. B., Makievski, A.V., Miller, R. **1994**. The Analysis of Dynamic Surface Tension of Sodium Alkyl Sulphate Solutions, Based on Asymptotic Equations of

- Adsorption Kinetic Theory. Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 87, 61-75.
- Fainerman, V. B. **1984**. Kinetics of the formation of mixed adsorption layers of alcohols on the surface of solutions. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 58(2), 428-433.
- Freundlich, H.. **1922** Kapillarchemie. New Ed. CAN 16:10945.
- Fowler, R. H., Guggenheim, E. A. **1952**. Statistical Thermodynamics, Cambridge University Press, London.
- Garfias-Ayala, F.J. **1964**. Time-Dependence of Surface Tension of Higher Alcohol Solutions. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Birmingham.
- Gibbs, J.W. **1928**. The collected works of J.W. Gibbs, Longmans, Green and Co., London, Vol.I. p. 119.
- Gracia Fadrique, J. **1999**. Langmuir-BET Surface Equation of State in Fluid-Fluid Interfaces. *Langmuir*, 15, 3279-3282.
- Gracia Fadrique, J. **1979**. Cinética de Adsorción Superficial (Sistema Solución Acuosa de N-Decanol-aire Saturado). Tesis de Maestría. Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guerasimov, Ya., Dreving, V., Eriomin, E., Kiseliiov, A., Lebedeu, V., Danchenkov, G., Shligvin. A., **1977**. Curso de Química Física. Ed. Mir. Moscu, 2^{da} Ed, Caps XVI y XVII.
- Goldstein A.M., Edelman A. M. **1985**. New Exxon Technology for Gas Treating: Energy-Efficient Processes For Acid Removal. Proceeding on Sulphur. 84 International Conference.311-315.
- Getzen, F. W. **1971**. Bulk –to- Surface Distribution Coefficients and Surface Activity Coefficients from Surface Tension Measurements. *J. Colloid Interface Sci.* 37, 668-677.
- Guggenheim, E.A., M.A., Sc. D., y F.R.S.**1957**. Thermodynamics an Advanced Treatment for Chemists and Physicists. North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Harkins, W.D.; Jordan, H.F. **1928**. Electrical Relations at Surfaces, the Spreading of Liquids, the Thickness of Surface Film, and the Drop-Weight and Ring Methods for the Determination of Surface Tension. *Colloid Symposium Monograph*. 16, 17-40.
- Hansen, R. S. **1964**. The Theory of Diffusion Controlled Absorption Kinetic with Accompanying Evaporation. *J. Phys. Chem.*, 60, 637.
- Holt, R.G.; McDaniel, J.G. **2002**. Rheology of Foam near the Order-Disorder Phase Transition. NASA Conference Publication, 2002-211212 (v.2, sixth Microgravity Fluid Physics and Trnaspport Phenomena Conference. 165-166.
- Huang, D.D., Nikolov, A., Wasan, D.T. **1986**. Foams: Basic Properties with Applications to Porous media. *Langmuir*, 2, 672-677.
- Huang, D.D. **1985**. PhD Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago IL.
- Hildebrand, J. B., Scott, R. L. **1964**. The Solubility of Non-electrolytes. 3^{ed} Ed. Dover, New York.

- Joos, P.; Bleys, G. **1983**. Desorption from a slightly soluble monolayer. *Colloid and Polymer Science*. 261(12), 1038-1042.
- Joos, P.; Bleys, G.; Petre, G. **1982**. Adsorption kinetics of nonanediol and nonane dicarbonic acid at the air/water interface. *Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique*. 79(4), 387-393.
- Joos, P., Rillaerts, E. **1981**. Theory on the Determination of the Dynamic Surface Tension with the Drop Volume and Maximum Bubble Pressure Methods. *J. Colloid Interface Sci.* 79, 96-100.
- Joos, P., Fang, J.P., Serrien, G. **1991**. Comments on Some Dynamic Surface Tension Measurements by the Dynamic Bubble Pressure Method. *J. Colloid and Interface Sci.* 151 (1), 144-149.
- Kratky, O.; Leopold, H.; Stabinger, H. **1973**. Determination of the partial specific volume of proteins by the mechanical oscillator technique. *Methods Enzymol.* 27 98-110.
- Kretzschmar, G. Miller, R. **1991**. Dynamic Properties of Adsorption Layers of Amphiphilic Substances at Fluid Interfaces. *Adv. Colloid Interface Sci.* 36, 65-124.
- Keh-Peng, S., Meng-Hui, L. **1992**. Solubility of Carbon Dioxide in Aqueous Mixtures of Monoethanolamine with Methyldiethanolamine. *J. Chem. Eng. Data.* 37: 96-100.
- Kittle, P.A. **1989**. Foamable Compositions as Barriers Between Substrates and the Atmosphere. U.S. Patent 4874641, 5 pp.
- Kanicky, J. R., López-Montilla, J. C., Pandey, S., Shah, D. O. **2001**. Handbook of Applied Surface and Colloid Chemistry, Edited by Krister Holmberg ISBN 0471 490830. John Wiley and Sons. Ltd.
- Kuschnir, P.; Eley, R.R.; Floyd, F.L. **1986**. Control of Foaming in Water-Borne Coatings. Presented at the 64th Annual Meeting of the Federation of Societies for Coatings Technology, In Atlanta, GA., on Nov. 5.
- Langmuir, I. **1917**. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids. II. Liquids. *J. Am. Chem. Soc.* 39, 1848-1906.
- Liggieri, L., Ravera, F., Passerone, A., **1996**. A Diffusion-Based Approach to Mixed Adsorption Kinetics. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 114, 351-359.
- Lin, S.-Y., McKeigue, K., Maldarelli, C. **1991**. Diffusion-Limited Interpretation of the Induction Period in the Relaxation in Surface Tension Due to the Adsorption of Straight Chain, Small Polar Group Surfactants: Theory and Experiment. *Langmuir* 7, 1055-1066.
- Lin, S.-Y., Lu, T.-L., Hwang, W.-B. **1995**. Adsorption Kinetic of Decanol at the Air-Water Interface. *Langmuir* 11, 555-562.
- Lu, D., Rhodes, D. G. **2000**. Mixed Composition Films of Spans and Tween 80 at the Air-Water Interface. *Langmuir*, 16, 8107-8112.
- Myers, Drew. **1991**. Surfaces, Interfaces, and Colloids. Principles and Applications. VCH Publishers, Inc. Caps. 8, 9 and 12.
- Miller, R., Kretzschmar, G. **1991**. Adsorption Kinetics of Surfactants at Fluid Interfaces. *Adv. Colloid Interface Sci.* 37(1-2), 97-121.

REFERENCIAS

- Mijnlieff, P. F.; Ditmarsch, R. **1965**. Rate of micelle formation of sodium alkyl sulfates in water. *Nature* (London, United Kingdom), 208(5013), 889-891.
- Mondragón Garduño, M. y Trejo, A. **1995**. Evaluación de un Antiespumante Empleado en el Tratamiento de Aguas Amargas. 35 Convención Nacional IMIQ. 4-6 de octubre, Morelia, México.
- Murrieta-Guevara, F., Trejo-Rodríguez, A. **1984**. Liquid Density as a Function of Temperature of Five Organic Solvents. *J. Chem. Eng. Data*. Vol. 29, 2, 204-206.
- Monin, D., Espert, A., Colin, A. **2000**. A New Analysis of Foam Coalescence: From Isolated Films to Three-Dimensional Foams. *Langmuir*, A-K.
- Mora Pale, J.F. Gracia Fadrique, J. **1999**. Tensión Superficial Dinámica. Difusión Controlante (Decanol-Agua a 20°C). *Memorias del XIV Coloquio Nacional de Termodinámica*. 15-23. Oaxaca, México.
- Oh, S. G., Shah D. O. **1991**. Relationship Between Micellar Lifetime and Foamability of Sodium Dodecyl Sulfate and Sodium Dodecyl Sulfate/1-Hexanol Mixtures. *Langmuir* 7, 1316-1318.
- Oh, Seong Geun; Klein, Scott Paul; Shah, D. O. **1992**. Effect of micellar life-time on the bubble dynamics in sodium dodecyl sulfate solutions. *AIChE Journal*, 38(1), 149-152.
- Patterson, R. E., Ross, S. **1979**. The Pendant-Drop Method to Determine Surface or Interfacial Tensions. *Surface Sci.* 81, 451- 463.
- Patist, A., Huibers, P. D. T., Beneka, B., Shah, D. O. **1998**. Effect of Tetraalkylammonium Chlorides on Foaming Properties of Sodium Dodecyl Sulfate Solutions. *Langmuir* 14, 4471-4474.
- Patist, A., Oh, S. G., Leung, R., Shah, D. O. **2001**. Kinetic of Micellization: Its Significance to Technological Processes. *J. Colloid and Science A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 176, 3-16.
- Patist, A., Kanicky, J. R., Shukla, P. K., Shah, D. O. **2002**. Importance of Micellar Kinetic in Relation to Technological Processes. *J. of Colloid and Interface Science*, 245, 1-15.
- Pinazo, A., Pérez, L., Infante, M. R., Franses, E. I. **2001**. Relation of Foam Stability to Solution and Surface Properties of Gemini Cationic Surfactants Derived from Arginine. *J. Colloid and Surface. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 189, 225-235.
- Pilon, L.; Fedorov, A.G.; Viskanta, R. **2001**. Steady-State Thickness of Liquid-Gas Foam. *J. of Colloid and Interface Science*. 242, 425-436.
- Prausnitz, J.M., Lichtenthaler, R.N., y Gomez de Azevedo, E., **2000**. *Termodinámica Molecular de los Equilibrios de Fases*. Prentice Hall.
- Rinker, E.B., Oelschlager, D.W., Colussi, A.T., Henry, K.R., Sandall, O.C. **1994**. Viscosity, Density, and Surface Tension of Binary Mixtures of Water and N-Methyldiethanolamine and Water and Diethanolamine and Ternary Mixtures of These Amines with Water over the Temperature Range 20-100 °C. *J. Chem. Eng. Data*. Vol. 39, 392-395.
- Riddick, J.A., and Bunger, W. **1970**. *Techniques of Organic Chemistry Solvents*. Vol. II 3rd Ed. Wiley -Interscience, New York.

- Rillaerts, E., Joos, P. **1982**. Rate of Demicellization from the Dynamic Surface Tension of Micelle Solutions. *J. Phys. Chem.*, 96, 3471.
- Ramírez-Verduzco, L. F. **2001**. Estudio de la Tensión Superficial del Sistema Ternario 2-Amino-2-Metil-1-Propanol + Ditanolamina + Agua en todo el Intervalo de Concentración y a Temperaturas entre (323.15 - 373.15) K. Tesis de Maestría. Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rastogi, A. K., **1969**. Ph D: Tesis Mc Gill University, Canada.
- Roux, G.; Perron, G.; Desnoyers, J. E. **1977**. Heat capacities and volumes of alkoxy ethanol-water mixtures at various temperatures. *Czech. Conf. Calorimetry*, [Lect. Short Commun.], 1st.
- Rosen, M. J. **1978**. *Surfactants and Interfacial Phenomena*. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons. New York. Caps. 1 and 2.
- Rosen, M. J., Cohen, A. W., Dahanayake, M., Xi-Yuan, H. **1982**. Relationship of Structure to Properties in Surfactants. 10. Surface and Thermodynamic Properties of 2-Dodecyloxypoly(ethenoxyethanol)s, $C_{12}H_{25}(OC_2H_4)_x OH$, in Aqueous Solutions. *J. Phys. Chem.* 86, 541-545.
- Ross, S., Townsend, D. F. **1981**. Foam Behavior in Partially Miscible Binary Systems. *Chem. Eng. Commun.* 11, 347-353.
- Rulison, C.J., Lochhead, R.Y. **1995**. *Surfactants Adsorption and Surface Solubilization*. Chapter 19, pp:281-313.
- Rowley, R. L., Oscarson, J. L. **1993**. Diffusion Coefficients and Heats of Mixing in Aqueous Alkanolamines. Annual report. For Gas Research Institute, and Gas Processors Association. Contract No. 5092-260-2356.
- Rowley, R. L., Adams, M. E., Marshall, T. L., Oscarson, J. L., Wilding, W. V., Anderson, D. J. **1997**. Measurement of Diffusion Coefficient Important in Modeling the Absorption Rate of Carbon Dioxide into Aqueous N-Methyldiethanolamine. *J. Chem. Eng. Data*, 42, 310-317.
- Shah, D.O., **1998**. In "Micelles, Microemulsions and Monolayers" (D.O. Shah, Ed.), Chap. 1. Dekker, New York,.
- Sharpe, D., Eastoe, J. **1996**. Properties of Surfactant Monolayers Studied by Surface Light Scattering. *Langmuir*, 12, 2303-2307.
- Sugden, S. **1921**. The Determination of Surface Tension from the Rise in Capillary Tubes. *J. Chem. Soc.* 1483-1492.
- Souchay, P. **1972**. *Química Física Termodinámica Química*. Toray-Masson, S.A. Spain. Primera Edición, Capítulo I.
- Sedev, R. **2001**. Limiting Area per Molecule of Nonionic Surfactants at the Water/Air Interface. *Langmuir*, 17, 562-564.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., y Abbott, M.M., **1997**. Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. Mc Graw Hill/Interamericana editores, S.A DE C.V. Quinta edición capítulo. 6.
- Tsonopoulos, C., Newman, J., Prausnitz, J. M., **1971**. Rapid Aging and Dynamic Surface Tension of Dilute Aqueous Solutions. *Chem. Eng. Sci.* 26, 817-827.

- Tovar Vegenas, Juan de Dios., **1987**. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional
- Tontiwachwuthikul, P., Meisen, A.; Lim, C.J. **1992**. CO₂ Absorption by NaOH, Monoethanolamine and 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol Solutions in a Packed Column. *Chem. Eng. Sci.* 47, 381-390.
- Thomas J. C. **1988**. Improved Selectivity Achieved with Ucarsol Innovator Solvent. 38 th Annual Laurance Reid Gas Conditioning Conferences U. Oklahoma. 105-118.
- Trejo, L. M., Kronbery, B. **1997**. Transient Foaminess, Surface Activity and Incompatibility in Non- Aqueous Binary Systems, Abstracts Book of the Fifth Chemical Congress of North America. 1132-Special Topics in Physical Chemistry (Area 11).
- Trejo, A.; Águila Henández, J.; Bocanega Sánchez R.; Eustaquio Rincón R.; García Flores B.; Jiménez Moreno A.; Rebolledo Libreros M.E.; Reza González J.; Romero Martínez A y Mondragón Garduño, M. **1999**. Informe de actividades del proyecto D.0038 "Estudio del comportamiento fisicoquímico de mezclas de disolventes para el endulzamiento de corrientes gaseosas y líquidas de hidrocarburos".
- Trejo, A.; Águila Henández, J.; Bocanega Sánchez R.; Eustaquio Rincón R.; García Flores B.; Jiménez Moreno A.; Rebolledo Libreros M.E.; Reza González J.; Romero Martínez A. **2001**. Informe de actividades y solicitud de renovación del proyecto D.0038 "Estudio del comportamiento fisicoquímico de mezclas de disolventes para el endulzamiento de corrientes gaseosas y líquidas de hidrocarburos".
- Thovert, J. **1914**. *Ann. d. Physik* [9]2, 369.
- Vargaftik, N.B. **1983**. Handbook of Physical Properties of Liquid and Gases: Pure Substances and Mixtures.
- Vázquez, G., Alvarez, E., Rendo, R., Romero, E. Navaza, J. M., **1996**. Surface Tension of Aqueous Solutions of Diethanolamine and Triethanolamine from 25 to 50 °C. *J. Chem. Eng. Data*. Vol. 41, 806-808.
- Vázquez, G., Alvarez, E., Navaza, J.M., Rendo, R. Romero, E. **1997**. Surface Tension of Binary Mixtures of Water + Monoethanolamine and Water + 2-Amino -2-methyl-1-Propanol and Tertiary Mixtures of These Amines with Water from 25 °C to 50 °C. *J. Chem. Eng. Data*. Vol. 42, 57-59.
- van Voorst Vader, F. 1960. Adsorption of detergents at the liquid-liquid interface. II. *Transactions of the Faraday Society*, 56, 1078-1084.
- Van den Bogaert, R., Joos, P. **1979**. Dynamic Surface Tensions of Sodium Myristate Solutions. *J. Phys. Chem.*, 83, 2244- 2248.
- Van Hunsel, J.; Joos, P. **1987**. Adsorption kinetics at the oil/water interface. *Colloids and Surfaces*. 24(2-3), 139-158.
- Van Hunsel, J.; Joos, P. **1989**. Study of the dynamic interfacial tension at the oil/water interface. *Colloid and Polymer Science*. 267(11), 1026-1035.
- Van Hunsel, J., Volhardt, D., Joos, P. **1989**. Compression of Adsorbed Monolayers at Oil/Water and Air/Water Interfaces Using a Reversed Funnel Method. *Langmuir*, Vol. 5, No, 2, 528-531.
- von Szyszkowski, Bohdan. **1928**. Complex formation among substances dissolved in non-associated solvents. *Z. physik. Chem*, 131, 175-188.

REFERENCIAS

- Vogler, E. A. **1992**. Practical Use of Concentration-Dependent Contact Angles as a Measure of Solid-Liquid Adsorption. 2. Experimental Aspects. *Langmuir*, Vol 8, No. 8, 2013-2020.
- Ward, A.F.H., Tordai, L. **1946**. Time-Dependence of Boundary Tensions of Solutions. I. The Role of Diffusion in Time-Effects. *J. Phys. Chem.* 14, 453-461.
- Woodward, R.P. Ph.D. **1995**. Dynamic Surface Tension and Dilational Stress Measurements Using the Drop Shape Method. First Ten Angstroms, 465 Dinwiddie Street, Portsmouth, VA23704.
- Xu, S.; Wang, Y.W.; Otto, F.D.; Mather, A.E. **1996**. Kinetics of the Reaction of Carbon Dioxide with 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol Solutions. *Chem. Eng. Sci.* 51, 841-850.
- Zhang, X.D.; Macosko, C.W.; Davis, H.T.; Nikolov, A.D.; Wasan, D.T. **1999**. Role of Silicone Surfactant in Flexible Polyurethane Foam. *J. of Colloid and Interface Science*, 215, 270-279.
- http://www.index_surf_chem.html
- http://www.kruss.info/Mainframe_e.html
- <http://www.sigma-aldrick.com.mx>
- <http://www.firsttenangstroms.com>
- http://www.lfp.uba.ar/Julio_Gratton//termo/15.EfectosSup.pdf
- <http://depa.pquim.unam.mx/~tunda/gralitensoactivos.html>

En este apéndice se presentan valores experimentales de tensión superficial dinámica de seis sistemas binarios: DEA, MDEA, Brij 92, Tween 80, Surfinol DF110-D y Surfinol 485 + agua, en función de la concentración y la temperatura.

Con estos valores se construyeron gráficos de presión superficial dinámica en función de la concentración de equilibrio multiplicado por la raíz cuadrada del tiempo, donde la pendiente de la zona lineal fue utilizada para derivar el coeficiente de difusión empleando la ecuación II.18 propuesta por Joos y Rillaerts (1981). Ver página 41 del capítulo II y las páginas 138, 139 y 140 del capítulo IV.

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 323.15 K.

Concentración 0.95 mol dm ⁻³				Concentración 1.92 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	65.39	255	62.58	0	61.17	255	54.45
5	63.54	260	62.2	5	60.97	260	54.33
10	63.4	265	62.39	10	60.58	265	54.61
15	63.61	270	62.38	15	61.16	270	54.23
20	63.74	275	62.74	20	60.58	275	53.62
25	63.91	280	62.23	25	61.24	280	53.71
30	63.56	285	62.5	30	60.78	285	53.73
35	63.46	290	62.81	35	61.5	290	53.71
40	63.45	295	62.59	40	61.04	295	53.82
45	63.17	300	62.89	45	60.69	300	53.6
50	63.11	305	62.29	50	60.61	305	53.79
55	63.4	310	62.3	55	60.64	310	53.14
60	63.22	315	62.35	60	60.55	315	53.18
65	63.55	320	61.96	65	60.12	320	53.38
70	63.59	325	62.43	70	60.29	325	52.9
75	63.36	330	62.23	75	60.24	330	53.6
80	63.49	335	62.09	80	60.15	335	52.7
85	63.39	340	62.29	85	60.16	340	52.96
90	63.5	345	62.4	90	59.8	345	52.69
95	63.35	350	62.05	95	59.8	350	53.1
100	63.69	355	62.11	100	59.53	355	52.44
105	63.34	360	62.11	105	60	360	52.22
110	63.44	365	62.26	110	59.23	365	52.17
115	63.75	370	62.18	115	59.05	370	52.25
120	63.73	375	61.86	120	58.41	375	52.37
125	63.08	380	61.97	125	58.71	380	52.18
130	63.35	385	61.96	130	58.43	385	52.24
135	63.14	390	61.88	135	58.16	390	52.38
140	63.39	395	62.13	140	58.25	395	52.18
145	63.22	400	62.32	145	57.5	400	52
150	63.19	405	61.97	150	57.52	405	51.79
155	63.13	410	62.06	155	56.97	410	52.03
160	63.51	415	61.92	160	56.7	415	51.71
165	63.55	420	61.6	165	56.68	420	51.74
170	63.22	425	61.62	170	56.94	425	51.06
175	63.04	430	61.47	175	56.09	430	50.84
180	63.15	435	61.58	180	56.33	435	51.05
185	62.95	440	61.5	185	56.49	440	51.19
190	63.23	445	61.75	190	56.36	445	50.83
195	62.5	450	61	195	56.16	450	50.6
200	63.37	455	61.1	200	56	455	50.82
205	62.85	460	60.49	205	56.03	460	50.74
210	63.35	465	61.38	210	55.88	465	50.68
215	62.98	470	61.32	215	55.95	470	50.99
220	62.9	475	60.79	220	55.49	475	50.36
225	62.97	480	60.59	225	55.47	480	50.14
230	62.47	485	60.61	230	54.95	485	50.28
235	62.76	490	60.96	235	54.38	490	50.06
240	63.37	495	60.35	240	54.6	495	50.27
245	62.89	500	60.42	245	54.48		
250	62.47			250	54.41		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 323.15 K.

Concentración 2.91 mol dm ⁻³				Concentración 3.92 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	59	255	54.83	0	57.15	255	53.06
5	59.09	260	55.06	5	57.03	260	52.74
10	59.26	265	54.74	10	57.13	265	52.51
15	59.55	270	54.32	15	57.17	270	52.95
20	58.93	275	54.73	20	57.24	275	53.16
25	59.49	280	54.1	25	58.38	280	53.06
30	59.32	285	53.94	30	57.26	285	52.81
35	57.86	290	54.5	35	57.39	290	53
40	58.01	295	54.62	40	56.95	295	52.93
45	57.98	300	54.37	45	56.88	300	52.8
50	57.75	305	54.35	50	56.81	305	52.35
55	57.26	310	54.45	55	57.09	310	52.15
60	57.56	315	54.19	60	57.29	315	52.11
65	57.29	320	53.96	65	57.15	320	51.9
70	57.1	325	54.06	70	56.83	325	51.62
75	57.88	330	54.28	75	56.98	330	51.28
80	56.9	335	53.86	80	56.64	335	51.32
85	57.41	340	53.9	85	56.56	340	52.46
90	57.14	345	53.82	90	56.38	345	51.78
95	57.33	350	53.64	95	56.22	350	52.22
100	57.67	355	53.6	100	56.16	355	51.36
105	56.73	360	53.92	105	56.25	360	51.53
110	56.64	365	53.63	110	56.09	365	51.24
115	56.79	370	53.7	115	55.96	370	50.86
120	56.7	375	53.6	120	56.02	375	50.91
125	56.58	380	53.76	125	55.69	380	51.28
130	56.54	385	53.34	130	55.68	385	50.93
135	56.56	390	53.71	135	55.54	390	51.2
140	56.64	395	53.12	140	54.5	395	51.25
145	56.61	400	53.02	145	54.89	400	51.01
150	56.34	405	53.24	150	54.7	405	51.05
155	56.28	410	53.09	155	55.05	410	51.17
160	56.25	415	53.21	160	54.9	415	50.87
165	56.37	420	52.55	165	55.01	420	50.58
170	56.07	425	52.93	170	54.86	425	50.63
175	56.38	430	53.02	175	54.79	430	50.2
180	56.06	435	53.17	180	54.73	435	50.34
185	56.14	440	53.48	185	54.21	440	50.12
190	55.85	445	52.75	190	54.05	445	50.44
195	55.98	450	52.78	195	54.16	450	50.55
200	55.94	455	53	200	54.29	455	50.12
205	55.34	460	52.46	205	53.96	460	50.12
210	55.51	465	52.79	210	53.95	465	50.37
215	55.47	470	52.46	215	53.96	470	50.39
220	55.03	475	52.1	220	53.89	475	50.06
225	55.42	480	52.21	225	53.69	480	49.96
230	54.86	485	52.47	230	53.81	485	49.84
235	55.12	490	52.5	235	54.08	490	49.83
240	55.15	495	52.05	240	53.99	495	49.85
245	54.29	500	52.31	245	53.47	500	49.8
250	54.39			250	53.6		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 323.15 K.

Concentración 4.97 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	54.71	255	52.9
5	54.98	260	53.01
10	54.68	265	52.6
15	54.9	270	53.04
20	54.79	275	52.96
25	55.09	280	52.77
30	55.23	285	52.92
35	54.73	290	52.67
40	54.69	295	53.54
45	54.66	300	52.59
50	54.58	305	52.39
55	54.91	310	53.8
60	54.78	315	52.11
65	55.06	320	54.09
70	56.04	325	52.33
75	58.38	330	52.15
80	55.13	335	52.19
85	54.48	340	52.15
90	54.71	345	52
95	54.87	350	52.09
100	54.31	355	52.06
105	54.18	360	52.15
110	54.48	365	51.72
115	54.26	370	51.61
120	54.27	375	52.85
125	53.99	380	51.52
130	53.98	385	51.26
135	54.26	390	51.47
140	53.93	395	51.38
145	54.42	400	51.43
150	53.94	405	51.32
155	53.9	410	51.84
160	54.09	415	51.23
165	53.91	420	50.72
170	53.78	425	51.09
175	53.71	430	50.7
180	53.66	435	50.37
185	53.65	440	50.55
190	53.45	445	50.21
195	53.3	450	50.34
200	53.7	455	50.33
205	56.65	460	50.46
210	53.55	465	50.3
215	53.4	470	49.69
220	53.17	475	49.45
225	53.25	480	49.18
230	53.4	485	49.35
235	53.1	490	49.34
240	54.36	495	49.07
245	54.57	500	49.13
250	52.94		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 333.15 K.

Concentración 0.95 mol dm ⁻³				Concentración 1.92 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	62.45	255	51.6	0	57.81	255	51.22
5	61.94	260	51.49	5	57.32	260	51.22
10	61.57	265	51.07	10	57.55	265	50.93
15	61.34	270	51.52	15	57.61	270	51.22
20	61.55	275	51.28	20	57.44	275	50.67
25	61.03	280	51.32	25	57.01	280	50.38
30	61.03	285	50.88	30	57.24	285	50.83
35	60.69	290	50.77	35	56.89	290	50.34
40	60.32	295	50.32	40	56.51	295	50.53
45	60.26	300	51.13	45	56.58	300	50.43
50	60.41	305	50.54	50	55.58	305	50.82
55	60.1	310	50.55	55	56.79	310	50.34
60	60.26	315	50.49	60	55.95	315	50.65
65	59.78	320	50	65	55.41	320	50.13
70	59.26	325	50.11	70	55.67	325	49.86
75	58.72	330	50.18	75	55.6	330	49.98
80	58.26	335	49.97	80	55.12	335	49.88
85	58.14	340	49.92	85	55.03	340	50.12
90	57.84	345	49.9	90	55.07	345	49.41
95	57.58	350	49.85	95	54.47	350	49.77
100	57.11	355	49.74	100	54.66	355	50.05
105	57.34	360	49.62	105	54.1	360	49.8
110	56.89	365	49.83	110	54.35	365	49.35
115	56.25	370	48.63	115	54.06	370	49.43
120	55.87	375	48.89	120	54.13	375	49.66
125	55.33	380	48.98	125	53.53	380	49.04
130	55.25	385	49.13	130	53.56	385	49.37
135	55.24	390	48.76	135	53.49	390	49.77
140	54.44	395	48.62	140	53.59	395	49.2
145	55.03	400	48.78	145	53.34	400	48.78
150	54.57	405	48.69	150	53.29	405	48.84
155	54.59	410	48.59	155	53.16	410	49.19
160	54.14	415	48.19	160	52.91	415	48.79
165	54.14	420	48.47	165	52.92	420	49.05
170	53.79	425	48.62	170	52.42	425	49.12
175	54	430	48.53	175	52.57	430	48.74
180	53.57	435	48.11	180	52.15	435	48.82
185	53.62	440	48.12	185	52.69	440	48.3
190	52.93	445	47.97	190	52.11	445	48.77
195	52.89	450	48.26	195	52.24	450	48.57
200	52.75	455	47.8	200	52.28	455	48.56
205	52.83	460	48.03	205	52.18	460	48.41
210	52.51	465	47.71	210	51.73	465	48.55
215	52.53	470	48.02	215	51.74	470	48.27
220	52.13	475	47.72	220	51.72	475	48.23
225	51.98	480	47.88	225	52.01	480	47.52
230	52.26	485	47.51	230	51.75	485	48.15
235	51.99	490	47.82	235	51.57	490	47.99
240	52.31	495	47.83	240	51.65	495	47.93
245	52.23	500	47.68	245	51.48	500	47.75
250	51.98			250	51.49		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 333.15 K.

Concentración 2.91 mol dm ⁻³				Concentración 3.92 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	56.2	255	55.01	0	55.36	255	53.21
5	56.96	260	55.16	5	55.42	260	52.85
10	57.36	265	55.43	10	55.32	265	52.59
15	56.93	270	55.11	15	54.65	270	52.68
20	56.98	275	55.14	20	54.73	275	52.3
25	57.43	280	54.93	25	55.2	280	52.64
30	57.67	285	54.84	30	55.4	285	52.71
35	57.19	290	54.77	35	55.4	290	52.51
40	56.84	295	54.7	40	55.16	295	51.96
45	56.9	300	54.8	45	55	300	52.73
50	56.81	305	54.73	50	55.53	305	52.24
55	57.37	310	55.42	55	55.79	310	52.4
60	56.79	315	55.3	60	54.87	315	52.24
65	57.09	320	54.68	65	54.93	320	52.13
70	56.54	325	54.63	70	55.3	325	51.96
75	57.08	330	55.21	75	54.94	330	51.75
80	57.07	335	55.04	80	55.12	335	51.79
85	56.95	340	54.54	85	55.08	340	52.04
90	57.1	345	54.51	90	54.91	345	51.96
95	56.91	350	54.87	95	54.94	350	51.52
100	56.69	355	54.5	100	54.6	355	51.28
105	56.41	360	54.28	105	54.46	360	51.46
110	56.63	365	54.44	110	54.78	365	51.48
115	57.13	370	54.26	115	54.38	370	51.49
120	56.55	375	54.41	120	54.65	375	51.62
125	56.5	380	54.31	125	54.5	380	51.26
130	56.52	385	54.33	130	54.5	385	51.03
135	56.5	390	54.19	135	54.25	390	51.24
140	56.04	395	54.42	140	54.12	395	50.96
145	56.43	400	53.94	145	54.25	400	51.16
150	55.97	405	54.2	150	54.43	405	51.04
155	56.41	410	53.91	155	54.26	410	51.02
160	56.11	415	53.96	160	53.92	415	51.21
165	55.93	420	54.01	165	53.79	420	50.91
170	55.93	425	53.38	170	53.55	425	50.49
175	55.94	430	53.31	175	53.53	430	50.5
180	56.14	435	53.5	180	53.5	435	50.86
185	55.99	440	53.48	185	53.74	440	51
190	55.69	445	53.27	190	53.57	445	50.81
195	55.74	450	53.03	195	53.62	450	50.49
200	55.43	455	53.26	200	53.46	455	50.56
205	55.65	460	53.63	205	53.5	460	50.5
210	55.63	465	53.22	210	54.51	465	50.38
215	55.59	470	53.23	215	53.56	470	50.43
220	55.53	475	52.97	220	53.39	475	50.5
225	55.25	480	52.95	225	53.02	480	50.4
230	55.35	485	53	230	53.2	485	50.75
235	54.85	490	53.17	235	53.56	490	50.24
240	55.15	495	53.1	240	53.4	495	50.3
245	55.15	500	53.13	245	52.99	500	50.3
250	55.49			250	53.06		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 333.15 K.

Concentración 4.97 mol dm⁻³

Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	44.58	255	40.6
5	44.27	260	40.55
10	44.36	265	39.98
15	44.03	270	40.31
20	44.08	275	40
25	44.08	280	39.89
30	43.49	285	39.64
35	43.65	290	39.93
40	43.3	295	39.71
45	43.38	300	39.62
50	43.43	305	39.83
55	43.12	310	39.58
60	42.95	315	39.36
65	43.39	320	39.29
70	42.85	325	39.53
75	42.76	330	39.46
80	42.8	335	38.94
85	42.47	340	38.76
90	42.42	345	38.6
95	42.62	350	38.87
100	42.39	355	38.62
105	42.63	360	38.49
110	42.48	365	38.35
115	42.17	370	38.45
120	42.21	375	38.56
125	42.1	380	38.44
130	42.04	385	38.42
135	41.54	390	38.26
140	42.04	395	38.19
145	42.14	400	38.04
150	41.74	405	38.21
155	41.62	410	38.07
160	41.65	415	37.98
165	41.34	420	38.09
170	41.56	425	37.91
175	41.6	430	37.87
180	41.24	435	37.7
185	41.11	440	37.92
190	40.96	445	37.84
195	41.11	450	37.84
200	41.24	455	37.62
205	40.86	460	37.42
210	40.99	465	37.41
215	41.12	470	37.09
220	40.96	475	37.16
225	40.75	480	37.19
230	40.5	485	37.12
235	40.43	490	37.18
240	40.6	495	36.95
245	40.37	500	37.29
250	40.36		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 343.15 K.

Concentración 0.95 mol dm ⁻³				Concentración 1.92 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	58.84	255	50.58	0	57.98	255	54.92
5	58.15	260	50.32	5	57.72	260	54.94
10	58.06	265	50.27	10	57.93	265	54.45
15	57.76	270	50.18	15	57.89	270	54.87
20	57.95	275	49.94	20	57.77	275	54.69
25	57.27	280	49.9	25	57.61	280	54.42
30	56.9	285	50.02	30	57.69	285	54.44
35	56.86	290	50.02	35	58.08	290	54.47
40	56.8	295	49.9	40	57.95	295	54.28
45	56.89	300	49.69	45	57.52	300	54.2
50	56.5	305	49.72	50	57.52	305	54.22
55	55.68	310	49.81	55	57.59	310	53.9
60	55.54	315	49.63	60	57.56	315	53.78
65	55.1	320	49.46	65	57.43	320	53.86
70	55.44	325	49.26	70	57.36	325	53.99
75	55.25	330	48.89	75	57	330	53.53
80	54.96	335	49.35	80	57.37	335	53.76
85	54.93	340	48.99	85	58.31	340	53.32
90	54.31	345	49.07	90	57.43	345	53.91
95	54.2	350	49	95	56.94	350	53.67
100	53.65	355	48.42	100	57.07	355	53.26
105	54.14	360	48.6	105	57.06	360	53.25
110	53.8	365	48.74	110	57.43	365	53.3
115	53.46	370	48.08	115	57.48	370	53.46
120	53.24	375	48.5	120	57.26	375	53.05
125	53.45	380	48.38	125	56.85	380	53.15
130	53.5	385	48.17	130	56.72	385	53.21
135	53.14	390	47.67	135	56.57	390	51.62
140	52.96	395	48.14	140	56.84	395	52.73
145	53.34	400	47.97	145	56.66	400	52.54
150	53	405	47.62	150	56.33	405	52.94
155	52.97	410	47.78	155	56.47	410	52.6
160	52.76	415	47.61	160	56.02	415	52.99
165	52.76	420	47.71	165	56.33	420	52.28
170	52.46	425	47.61	170	55.9	425	52.68
175	52.36	430	47.42	175	55.78	430	52.3
180	52.68	435	47.42	180	56.11	435	52.11
185	52.33	440	47.67	185	55.82	440	52.4
190	52.11	445	47.39	190	55.74	445	51.79
195	52.12	450	47.29	195	55.78	450	51.75
200	51.84	455	47.3	200	55.73	455	51.77
205	51.92	460	46.96	205	55.61	460	51.83
210	51.7	465	46.94	210	55.38	465	51.82
215	51.48	470	46.81	215	55.3	470	51.73
220	51.74	475	46.42	220	55.17	475	51.73
225	51.19	480	46.24	225	55.35	480	51.42
230	51.09	485	46.64	230	55.12	485	51.7
235	50.8	490	46.24	235	55.24	490	51.56
240	50.62	495	46.44	240	54.81	495	51.45
245	51.07	500	46.37	245	55.03	500	51.05
250	50.24			250	54.6		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 343.15 K.

Concentración 2.91 mol dm ⁻³				Concentración 3.92 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	56.44	255	50.99	0	54.64	255	46.78
5	56.08	260	50.96	5	54.11	260	47.19
10	56.39	265	50.97	10	54.15	265	46.93
15	56.25	270	51.21	15	54.11	270	47.03
20	56.3	275	51.2	20	53.84	275	46.8
25	56.15	280	50.66	25	53.73	280	46.95
30	56.23	285	50.75	30	53.44	285	47.05
35	55.85	290	50.61	35	53.1	290	46.83
40	55.76	295	50.55	40	53.02	295	47.03
45	55.59	300	50.33	45	52.86	300	46.59
50	55.78	305	50.19	50	53.05	305	46.17
55	55.59	310	49.88	55	52.61	310	46.52
60	55.39	315	49.74	60	52.17	315	46.23
65	55.56	320	49.63	65	52	320	46.25
70	55.32	325	49.99	70	51.53	325	46.02
75	55.4	330	49.78	75	51.6	330	46.2
80	54.88	335	49.82	80	51.75	335	45.84
85	54.49	340	49.53	85	51.06	340	45.65
90	55	345	49.14	90	50.73	345	46
95	54.93	350	49.39	95	50.36	350	45.69
100	54.95	355	49.45	100	50.47	355	45.62
105	54.77	360	49.1	105	50.31	360	45.57
110	54.77	365	49.59	110	49.94	365	45.46
115	54.58	370	49.16	115	49.83	370	45.56
120	54.57	375	49.24	120	49.63	375	45.42
125	54.8	380	48.85	125	49.71	380	45.27
130	54.53	385	48.44	130	49.5	385	45.26
135	54.49	390	48.16	135	49.28	390	44.96
140	54.02	395	48.19	140	49.02	395	45.06
145	53.82	400	48.07	145	49.05	400	44.73
150	53.48	405	48.12	150	49.04	405	44.71
155	53.61	410	48.18	155	49.09	410	44.7
160	53.51	415	48.13	160	49.08	415	44.35
165	53.08	420	47.87	165	48.7	420	44.38
170	53.22	425	47.99	170	48.58	425	44.29
175	52.85	430	47.57	175	48.44	430	44.16
180	53.04	435	47.68	180	48.23	435	44.03
185	52.81	440	47.6	185	48.35	440	43.58
190	53.13	445	47.72	190	48.08	445	43
195	52.64	450	47.83	195	48.17	450	42.84
200	52.38	455	47.54	200	48.16	455	42.63
205	52.34	460	47.36	205	47.76	460	42.51
210	52.44	465	47.34	210	47.54	465	42.31
215	52.29	470	47.36	215	47.27	470	42.12
220	51.9	475	47.04	220	47.22	475	41.87
225	51.85	480	46.84	225	47.38	480	41.92
230	51.41	485	46.91	230	47	485	41.97
235	51.29	490	46.41	235	47.29	490	41.67
240	51.67	495	46.4	240	47.05	495	41.53
245	51.52	500	46.83	245	47.14	500	41.26
250	51.48			250	46.78		

Tensión superficial dinámica de DEA + agua, a 343.15 K.

Concentración 4.97 mol dm⁻³

Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	44.01	255	40.26
5	42.79	260	40.01
10	43.63	265	40.02
15	43.01	270	40.06
20	43.25	275	39.78
25	43.09	280	40.05
30	43.05	285	39.91
35	42.74	290	39.71
40	42.76	295	39.44
45	42.95	300	39.2
50	42.45	305	39.75
55	42.64	310	39.5
60	42.67	315	39.48
65	42.71	320	39.12
70	42.59	325	38.98
75	42.3	330	38.64
80	42.23	335	38.97
85	42.55	340	38.88
90	42.4	345	38.91
95	42.46	350	38.78
100	42.26	355	38.42
105	41.89	360	38.58
110	41.94	365	38.33
115	42.22	370	38.21
120	42.18	375	38.3
125	42.06	380	38.26
130	41.68	385	38.21
135	41.77	390	38.36
140	41.83	395	38.32
145	41.79	400	38.05
150	41.91	405	38.09
155	41.53	410	38.1
160	41.53	415	38.49
165	41.31	420	37.95
170	41.15	425	37.98
175	41.16	430	37.9
180	41.28	435	37.81
185	41.28	440	38.17
190	41.28	445	37.66
195	41.07	450	37.53
200	40.89	455	37.91
205	40.96	460	37.51
210	40.68	465	37.5
215	40.98	470	37.33
220	40.63	475	37.48
225	40.6	480	37.48
230	40.6	485	37.32
235	40.57	490	37.35
240	40.44	495	37.36
245	40.4	500	37.03
250	40.32		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 323.15 K.

Concentración 0.845 mol dm ⁻³				Concentración 1.69 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	55,86	255	53,96	0	52,83	255	51,2
5	56	260	54,08	5	52,75	260	51,06
10	56,32	265	54,27	10	52,89	265	51,32
15	56,26	270	54,43	15	52,94	270	51,52
20	56,18	275	54,42	20	52,98	275	51,36
25	56,2	280	54,32	25	53,29	280	51,48
30	56,32	285	54,29	30	53,36	285	51,62
35	56,38	290	54,09	35	52,86	290	51,27
40	56,04	295	53,7	40	52,67	295	51,07
45	55,88	300	53,43	45	52,83	300	51,15
50	56,16	305	53,1	50	52,82	305	50,95
55	56,12	310	52,98	55	52,8	310	50,81
60	55,89	315	53,47	60	52,82	315	51,15
65	55,98	320	53,92	65	52,99	320	51,53
70	56,02	325	53,62	70	53,2	325	51,38
75	55,85	330	53,27	75	53,14	330	51,32
80	55,75	335	53,74	80	53,2	335	51,54
85	55,84	340	53,91	85	53,4	340	51,2
90	56,01	345	53,3	90	53,2	345	51
95	55,88	350	53,04	95	53,02	350	51,15
100	55,75	355	53,07	100	53,45	355	51,03
105	56,08	360	53,04	105	53,66	360	51,11
110	56,2	365	53,21	110	52,96	365	51,23
115	56,2	370	53,47	115	52,7	370	51,21
120	56,43	375	53,54	120	52,92	375	50,82
125	56	380	53,33	125	52,6	380	50,11
130	55,51	385	53,21	130	52,25	385	50,12
135	55,46	390	53,51	135	52,1	390	50,32
140	55,3	395	53,52	140	52,25	395	50,23
145	55,43	400	53,27	145	52,41	400	50,3
150	55,61	405	53,29	150	52,39	405	50,46
155	55,61	410	53,38	155	52,24	410	50,56
160	55,66	415	53,57	160	51,92	415	50,35
165	55,44	420	53,61	165	51,96	420	50,12
170	55,12	425	53,57	170	51,99	425	50,32
175	54,81	430	53,49	175	52,08	430	50,66
180	54,61	435	53,34	180	52,43	435	50,67
185	54,79	440	53,19	185	52,26	440	50,37
190	54,93	445	52,98	190	51,94	445	50,1
195	55,01	450	52,78	195	51,93	450	49,94
200	55,18	455	52,52	200	51,95	455	49,72
205	55,07	460	52,62	205	51,96	460	49,38
210	54,72	465	52,61	210	51,78	465	49,09
215	54,61	470	52,27	215	51,39	470	49,26
220	54,88	475	52,52	220	51,12	475	49,61
225	54,87	480	53,34	225	51,16	480	49,46
230	54,55	485	53,36	230	51,37	485	49,36
235	54,66	490	52,68	235	51,49	490	49,43
240	54,89	495	52,56	240	51,34	495	49,46
245	54,48	500	52,63	245	51,04	500	49,57
250	54			250	51,12		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 323.15 K.

Concentración 2.55 mol dm ⁻³				Concentración 3.42 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	50,53	255	49,17	0	48,26	255	46,09
5	50,72	260	49,16	5	48,19	260	46,01
10	50,68	265	49,04	10	47,99	265	46,09
15	50,73	270	48,71	15	47,87	270	46,21
20	50,99	275	48,67	20	47,94	275	46,02
25	51,05	280	49,02	25	48,07	280	45,91
30	50,54	285	49,34	30	48,03	285	46,17
35	50,39	290	49,21	35	48,09	290	46,25
40	50,9	295	48,81	40	48,11	295	46,22
45	51,12	300	48,72	45	47,95	300	46,32
50	50,69	305	48,69	50	47,95	305	46,19
55	50,18	310	48,59	55	47,97	310	46,03
60	50,13	315	48,63	60	47,89	315	46,04
65	50,19	320	48,74	65	47,8	320	46,01
70	50,38	325	48,82	70	47,78	325	46,03
75	50,52	330	48,62	75	47,82	330	46,1
80	50,35	335	48,26	80	47,73	335	45,95
85	50,31	340	48,17	85	47,61	340	45,78
90	50,13	345	48,37	90	47,75	345	45,78
95	49,76	350	48,54	95	47,87	350	45,74
100	49,64	355	48,53	100	47,75	355	45,65
105	49,79	360	48,62	105	47,5	360	45,75
110	49,95	365	48,75	110	47,27	365	45,77
115	49,75	370	48,85	115	47,13	370	45,53
120	49,46	375	48,76	120	47,24	375	45,46
125	49,54	380	48,31	125	47,33	380	45,49
130	49,82	385	47,8	130	47,19	385	45,39
135	50,07	390	47,48	135	47,28	390	45,48
140	49,97	395	47,56	140	47,44	395	45,78
145	49,73	400	47,85	145	47,29	400	45,79
150	49,9	405	48,04	150	47,01	405	45,43
155	49,92	410	47,96	155	46,8	410	45,38
160	49,82	415	48	160	46,75	415	45,57
165	49,8	420	48,47	165	46,8	420	45,53
170	49,54	425	48,64	170	46,77	425	45,36
175	49,3	430	48,52	175	46,69	430	45,29
180	49,47	435	48,6	180	46,71	435	45,39
185	49,7	440	48,69	185	46,67	440	45,48
190	49,39	445	48,27	190	46,49	445	45,58
195	49,09	450	47,82	195	46,38	450	45,62
200	49,24	455	47,74	200	46,22	455	45,34
205	49,53	460	47,66	205	46,21	460	45,15
210	49,64	465	47,97	210	46,52	465	45,32
215	49,45	470	48,05	215	46,87	470	45,42
220	49,25	475	47,69	220	46,89	475	45,34
225	49,24	480	47,76	225	46,57	480	45,12
230	49,21	485	47,87	230	46,14	485	45,09
235	49,24	490	48,01	235	46,01	490	45,27
240	49,43	495	48,17	240	46,17	495	45,11
245	49,36	500	47,92	245	46,14	500	44,8
250	49,2			250	46,09		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 323.15 K.

Concentración 4.32 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	46,79	255	45,53
5	46,85	260	45,54
10	46,91	265	45,62
15	46,76	270	45,58
20	46,69	275	45,51
25	46,91	280	45,56
30	47,04	285	45,6
35	46,98	290	45,56
40	46,95	295	45,49
45	47	300	45,46
50	47,02	305	45,28
55	46,9	310	45,1
60	46,76	315	45,17
65	46,77	320	45,24
70	46,85	325	45,31
75	46,82	330	45,31
80	46,67	335	45,17
85	46,57	340	45,2
90	46,44	345	45,39
95	46,28	350	45,42
100	46,16	355	45,42
105	46,1	360	45,43
110	46,04	365	45,36
115	46,11	370	45,33
120	46,27	375	45,18
125	46,18	380	44,92
130	46	385	44,86
135	46,04	390	44,93
140	46,19	395	44,98
145	46,19	400	44,94
150	45,97	405	44,89
155	45,82	410	44,95
160	45,8	415	45,09
165	45,73	420	45,08
170	45,76	425	44,82
175	45,74	430	44,74
180	45,65	435	44,9
185	45,75	440	44,81
190	45,87	445	44,58
195	45,96	450	44,44
200	45,98	455	44,36
205	45,84	460	44,36
210	45,75	465	44,33
215	45,76	470	44,24
220	45,89	475	44,28
225	46,11	480	44,2
230	46,12	485	43,97
235	45,83	490	44
240	45,67	495	44,19
245	45,7	500	44,23
250	45,63		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 333.15 K.

Concentración 0.845 mol dm ⁻³				Concentración 1.69 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	55.83	408	49.63	0	51.66	408	47.86
8	55.21	416	49.27	8	51.13	416	48.13
16	55.56	424	49.45	16	51.69	424	47.59
24	55.4	432	49.58	24	51.39	432	47.39
32	55.48	440	49.33	32	51.37	440	47.23
40	55.15	448	48.83	40	51.37	448	47.03
48	54.92	456	48.79	48	51.81	456	46.91
56	55.32	464	48.65	56	51.27	464	46.92
64	54.59	472	48.56	64	51.21	472	46.49
72	54.77	480	48.85	72	50.9	480	47.14
80	54.97	488	48.05	80	51.16	488	46.52
88	54.28	496	48.24	88	51.61	496	46.06
96	54.27	504	48.03	96	51.02	504	45.87
104	54.25			104	50.83		
112	53.79			112	51.29		
120	53.66			120	50.53		
128	53.82			128	50.83		
136	53.84			136	50.67		
144	53.2			144	50.52		
152	53.35			152	50.45		
160	53.02			160	50.5		
168	53.52			168	50.37		
176	53.12			176	50.66		
184	53.08			184	50.17		
192	52.52			192	50.44		
200	53.22			200	50.28		
208	52.54			208	50.47		
216	52.58			216	50.1		
224	52.83			224	50.28		
232	51.74			232	50.45		
240	52.38			240	49.44		
248	52.03			248	50.25		
256	52.27			256	49.6		
264	51.56			264	49.72		
272	51.59			272	49.23		
280	51.36			280	49.35		
288	51.19			288	49.39		
296	51.14			296	49.3		
304	51.2			304	49.59		
312	51.22			312	49.65		
320	50.99			320	49.21		
328	51.07			328	49.35		
336	51.03			336	49.42		
344	50.55			344	49.07		
352	50.17			352	48.86		
360	50.28			360	49.05		
368	50.14			368	49.27		
376	49.68			376	48.49		
384	49.91			384	48.54		
392	49.72			392	48.25		
400	49.76			400	48.09		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 333.15 K.

Concentración 2.55 mol dm ⁻³				Concentración 3.42 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	49.14	255	46.22	0	46.79	255	44.38
5	48.71	260	46.27	5	46.74	260	44.51
10	48.92	265	46.28	10	46.76	265	44.34
15	48.87	270	46.07	15	46.79	270	44.28
20	48.91	275	46.05	20	46.87	275	44.27
25	48.81	280	46.16	25	46.43	280	44.27
30	49.04	285	45.91	30	46.31	285	44.59
35	48.67	290	45.82	35	46.34	290	44.25
40	48.65	295	46.03	40	46.33	295	44.18
45	48.73	300	45.84	45	46.26	300	44.1
50	48.4	305	45.77	50	46.29	305	43.94
55	48.44	310	45.56	55	46.11	310	44.29
60	48.62	315	45.85	60	46.14	315	44.09
65	48.66	320	45.69	65	46.21	320	43.97
70	48.68	325	45.82	70	45.98	325	43.69
75	48.22	330	45.74	75	45.89	330	43.88
80	48.52	335	45.59	80	45.6	335	43.72
85	48.14	340	45.72	85	45.58	340	43.8
90	48.64	345	45.67	90	45.69	345	43.51
95	48.37	350	45.66	95	45.63	350	43.74
100	48.19	355	45.55	100	45.52	355	43.38
105	48.26	360	45.43	105	45.46	360	43.01
110	47.99	365	45.41	110	45.4	365	42.95
115	47.63	370	45.56	115	45.53	370	43.15
120	48.7	375	44.88	120	45.29	375	43.27
125	48.37	380	45.23	125	45.36	380	42.97
130	47.53	385	44.63	130	45.23	385	43.34
135	47.54	390	44.85	135	45.19	390	43.18
140	47.58	395	44.63	140	45.39	395	43.34
145	47.46	400	44.68	145	45.26	400	43.17
150	47.72	405	44.59	150	45.07	405	43
155	47.48	410	45.05	155	44.86	410	43.01
160	47.32	415	44.75	160	45.07	415	42.95
165	47.47	420	45.12	165	45.22	420	42.95
170	47.13	425	44.78	170	45.01	425	42.95
175	47.24	430	44.57	175	44.98	430	42.95
180	47.51	435	44.7	180	44.75	435	42.67
185	47.23	440	44.7	185	45.01	440	42.59
190	47.01	445	44.57	190	44.9	445	42.49
195	47.27	450	45.05	195	44.87	450	42.5
200	47.17	455	44.6	200	45.03	455	42.53
205	47.14	460	44.26	205	44.74	460	42.53
210	46.99	465	44.77	210	44.74	465	42.48
215	46.95	470	44.38	215	44.96	470	42.22
220	46.75	475	44.42	220	44.74	475	42.35
225	46.84	480	44.67	225	44.55	480	42.29
230	46.75	485	44.41	230	44.41	485	42.12
235	46.44	490	44.39	235	44.5	490	42.04
240	46.53	495	44.57	240	44.51	495	41.95
245	46.58	500	43.81	245	44.54	500	41.98
250	46.27			250	44.44		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 333.15 K.

Concentración 4.32 mol dm⁻³

Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	41.06	255	40.54
5	40.14	260	40.49
10	40.23	265	40.44
15	40.53	270	40.63
20	40.81	275	40.62
25	40.15	280	40.63
30	40.4	285	40.75
35	40.48	290	40.35
40	40.45	295	40.63
45	40.58	300	40.23
50	40.44	305	40.59
55	40.26	310	40.52
60	40.61	315	40.42
65	40.53	320	40.5
70	40.58	325	40.43
75	40.45	330	40.35
80	40.47	335	40.8
85	40.17	340	40.55
90	40.51	345	40.72
95	40.79	350	40.57
100	40.62	355	40.55
105	40.37	360	40.56
110	40.7	365	40.34
115	40.47	370	40.38
120	40.57	375	40.08
125	40.54	380	40.71
130	40.61	385	40.64
135	40.77	390	40.23
140	40.6	395	40.11
145	40.87	400	40.45
150	40.81	405	39.85
155	40.74	410	39.98
160	40.95	415	39.69
165	40.59	420	39.79
170	40.51	425	39.8
175	40.9	430	39.66
180	40.57	435	39.82
185	40.56	440	39.71
190	40.69	445	39.52
195	40.79	450	39.55
200	40.94	455	39.56
205	40.61	460	39.47
210	40.65	465	39.6
215	40.68	470	39.52
220	40.71	475	39.48
225	40.92	480	39.25
230	40.56	485	39.72
235	40.47	490	39.63
240	40.92	495	39.81
245	40.44	500	39.36
250	40.39		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 343.15 K.

Concentración 0.845 mol dm ⁻³				Concentración 1.69 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	54.09	255	52.71	0	50.88	255	46.49
5	54.52	260	52.68	5	50.32	260	46.03
10	54.05	265	52.75	10	50.69	265	46.45
15	54.69	270	52.46	15	50.14	270	46.13
20	54.01	275	52.59	20	49.82	275	46.89
25	54.59	280	52.68	25	49.84	280	46.19
30	54.45	285	52.52	30	49.77	285	46.03
35	54.11	290	52.49	35	50.02	290	45.85
40	54.89	295	52.3	40	49.28	295	46.04
45	54.53	300	52.19	45	49.3	300	46.04
50	54.39	305	52.37	50	49.23	305	45.76
55	54.15	310	52.29	55	48.95	310	46.18
60	54.92	315	52.09	60	48.66	315	45.45
65	54.25	320	52.56	65	49.05	320	45.55
70	54.26	325	52.04	70	48.89	325	45.9
75	54.52	330	52.18	75	48.89	330	45.31
80	54.54	335	51.94	80	48.84	335	45.4
85	54.9	340	51.68	85	48.75	340	45.8
90	55.19	345	51.87	90	48.65	345	45.49
95	54.38	350	51.86	95	49.07	350	45.4
100	54.27	355	51.81	100	48.89	355	45.41
105	54.05	360	51.69	105	48.3	360	45.12
110	53.86	365	51.59	110	48.58	365	45.26
115	53.95	370	51.72	115	48.74	370	45.1
120	54.28	375	51.86	120	48.57	375	45.35
125	54.17	380	51.58	125	48.73	380	44.89
130	54.14	385	51.66	130	47.98	385	45.08
135	54.12	390	51.52	135	47.84	390	45.02
140	53.57	395	51.78	140	48.15	395	44.85
145	53.8	400	51.47	145	48.73	400	44.19
150	53.61	405	51.99	150	48.11	405	44.8
155	53.34	410	51.39	155	48.09	410	44.21
160	53.49	415	51.25	160	47.97	415	44.64
165	53.52	420	51.45	165	47.78	420	43.83
170	53.65	425	51.44	170	47.67	425	44.85
175	53.03	430	50.78	175	47.48	430	44.19
180	53.61	435	50.81	180	47.5	435	44.8
185	53.48	440	50.57	185	47.38	440	44.21
190	53.55	445	50.21	190	47.37	445	44.64
195	53.08	450	50.58	195	47.4	450	44.64
200	53.41	455	50.62	200	47.25	455	43.83
205	53.31	460	50.69	205	46.8	460	44.19
210	53.35	465	50.44	210	47.06	465	44.8
215	53.29	470	50.79	215	47.03	470	44.21
220	53.13	475	50.3	220	46.8	475	44.64
225	53.35	480	50.58	225	46.9	480	43.83
230	53.21	485	50.56	230	46.58	485	44.85
235	53.76	490	50.07	235	46.87	490	44.19
240	52.85	495	50.22	240	46.95	495	44.8
245	52.24	500	50.27	245	46.95	500	44.21
250	52.55			250	47.01		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 343.15 K.

Concentración 2.55 mol dm ⁻³				Concentración 3.42 mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	48.5	255	45.05	0	45.13	255	40.72
5	48.53	260	45.1	5	45.18	260	40.59
10	48.6	265	45.04	10	45.98	265	40.72
15	48.51	270	44.91	15	45.74	270	40.67
20	48.6	275	44.83	20	45.94	310	39.38
25	48.32	280	44.68	25	45.61	315	39.2
30	48.54	285	44.87	30	45.14	320	39.2
35	48.47	290	44.83	35	45.48	325	38.99
40	48.42	295	44.7	40	45.66	330	38.99
45	48.41	300	44.19	45	45.11	335	39.11
50	48.23	305	44.41	50	44.97	340	38.58
55	48.34	310	44.09	55	45.03	345	38.32
60	48.24	315	44.14	60	44.9	350	38.36
65	48.35	320	44.21	65	45.09	355	38.37
70	48.41	325	44.54	70	45.2	360	38.22
75	48.4	330	44.15	75	44.66	365	38.17
80	48.05	335	44.23	80	44.8	370	37.65
85	48.35	340	44.23	85	44.68	375	37.72
90	48.17	345	44.3	90	44.27	380	37.85
95	48.04	350	44.17	95	44.38	385	37.55
100	48.03	355	44.1	100	44.35	390	37.51
105	47.88	360	43.63	105	44.05	395	37.25
110	47.49	365	44	110	44.3	400	36.95
115	48.3	370	44.03	115	44.26	405	36.92
120	47.7	375	43.75	120	43.82	410	36.74
125	47.85	380	43.67	125	43.98	415	36.65
130	47.17	385	43.54	130	43.59	420	36.28
135	47.64	390	43.22	135	42.98	425	36.38
140	47.28	395	43.19	140	43.08	430	36.4
145	46.93	400	43.15	145	42.77	435	36.42
150	46.78	405	43.08	150	42.6	440	36.19
155	46.69	410	42.87	155	42.7	445	36.37
160	46.49	415	42.89	160	42.64	450	35.95
165	46.56	420	42.4	165	42.32	455	36.26
170	46.79	425	42.42	170	42.44	460	35.88
175	46.43	430	42.6	175	42.54	465	35.47
180	46.41	435	42.71	180	42.2	470	35.33
185	46.23	440	42.74	185	42.41	475	35.62
190	45.97	445	42.4	190	42.16	480	35.15
195	45.95	450	42.62	195	41.75	485	35.29
200	45.94	455	42.6	200	41.38	490	34.85
205	46.05	460	42.32	205	41.53	495	34.96
210	45.81	465	42.24	210	41.29	500	34.79
215	45.75	470	42.25	215	41.56		
220	45.87	475	42.54	220	41.28		
225	45.77	480	41.47	225	41.32		
230	45.25	485	41.19	230	41.37		
235	45.44	490	41.04	235	41.23		
240	45.44	495	40.44	240	40.89		
245	45.13	500	40.82	245	40.93		
250	45.1			250	40.7		

Tensión superficial dinámica de MDEA + agua, a 343.15 K.

Concentración 4.32 mol dm⁻³

Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	43.3	255	39.19
5	42.99	260	39.19
10	43.22	265	38.97
15	42.95	270	39.13
20	43.08	275	38.96
25	43.07	280	38.98
30	42.81	285	38.97
35	42.92	290	38.9
40	42.7	295	38.92
45	42.39	300	38.66
50	42.75	305	38.8
55	42.6	310	38.68
60	42.44	315	38.66
65	42.05	320	38.54
70	42.31	325	38.63
75	42.34	330	38.27
80	42.07	335	38.41
85	41.87	340	38.41
90	42.02	345	38.26
95	41.8	350	38.13
100	41.6	355	38.07
105	41.85	360	38.15
110	41.69	365	38.07
115	41.35	370	38.08
120	41.33	375	37.9
125	41.22	380	37.43
130	41.04	385	37.87
135	41.08	390	37.58
140	40.94	395	37.82
145	41.06	400	37.79
150	40.76	405	37.3
155	40.82	410	37.64
160	40.97	415	37.44
165	40.75	420	37.08
170	40.75	425	37.24
175	40.66	430	37.13
180	40.4	435	37.16
185	40.71	440	37.05
190	40.44	445	37.22
195	40.41	450	36.95
200	39.96	455	36.78
205	39.99	460	36.79
210	40.21	465	36.79
215	39.98	470	36.71
220	40.09	475	36.42
225	40.13	480	36.62
230	39.71	485	36.51
235	39.56	490	36.46
240	39.33	495	36.39
245	39.63	500	36.31
250	39.33		

Tensión superficial dinámica del Brij 92 + agua

Concentración 2.51×10^{-4} mol dm $^{-3}$ (313.15 k)				Concentración 2.51×10^{-4} mol dm $^{-3}$ (323.15 k)			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
10	68.81	520	31.36	2.5	57.62	130	28.58
20	67.61	530	31.13	5	57.71	132.5	28.38
30	65.57	540	31.23	7.5	56.74	135	28.41
40	63.5	550	31.03	10	55.69	137.5	28.33
50	61.16	560	31.24	12.5	54.65	140	28.58
60	59.39	570	30.95	15	53.38	142.5	28.66
70	57.37	580	31.08	17.5	52.2	145	28.37
80	56.41	590	30.98	20	50.27	147.5	28.45
90	53.87	600	30.84	22.5	49.4	150	28.14
100	52.22	610	30.78	25	47.47	152.5	28.24
110	51.78	620	30.61	27.5	46.81	155	28.29
120	50.47	630	30.43	30	45.4	157.5	28.19
130	49.27	640	30.27	32.5	44.65	160	28.24
140	47.94	650	30.3	35	43.65	162.5	28.3
150	46.81	660	30.37	37.5	42.51	165	28.2
160	46.28	670	29.87	40	41.61	167.5	28.33
170	45.85	680	30.43	42.5	40.45	170	28.11
180	44.4	690	29.98	45	40.02	172.5	27.99
190	43.93	700	29.85	47.5	39.12	175	28.03
200	43.18	710	29.53	50	38.63	177.5	28.05
210	42.19	720	29.75	52.5	38.06	180	28.24
220	41.7	730	29.84	55	37.63	182.5	28.13
230	40.92	740	29.55	57.5	36.99	185	28.1
240	40.67	750	29.77	60	36.08	187.5	28.06
250	39.74	760	29.65	62.5	35.73	190	28.13
260	38.93	770	29.46	65	35.3	192.5	27.85
270	38.79	780	29.59	67.5	35.2	195	27.79
280	38.15	790	29.66	70	34.39	197.5	27.92
290	37.77	800	29.6	72.5	34.15	200	27.84
300	37.3	810	29.31	75	33.34	202.5	27.78
310	36.55	820	29.1	77.5	33.36	205	27.83
320	36.19	830	29.26	80	32.92	207.5	27.77
330	35.84	840	29.42	82.5	32.5	210	27.82
340	35.64	850	29.06	85	32.28	212.5	27.66
350	35.24	860	29.01	87.5	32.02	215	27.61
360	35.01	870	29.17	90	31.53	217.5	27.78
370	34.34	880	29.01	92.5	31.11	220	27.78
380	34.24	890	28.95	95	30.75	222.5	27.72
390	34.23	900	29.02	97.5	30.6	225	27.57
400	33.91	910	28.82	100	30.59	227.5	27.67
410	33.82	920	28.85	102.5	30.52	230	27.79
420	33.02	930	28.97	105	30.03	232.5	27.59
430	32.79	940	29.1	107.5	29.81	235	27.83
440	32.89	950	29.25	110	29.57	237.5	27.66
450	32.64	960	28.94	112.5	29.44	240	27.75
460	32.35	970	28.49	115	29.22	242.5	27.9
470	32.38	980	28.7	117.5	29.11	245	27.62
480	31.93	990	29.13	120	29.33	247.5	27.69
490	31.87	1000	28.74	122.5	28.7	250	27.7
500	31.73			125	28.68		
510	31.47			127.5	28.5		

Tensión superficial dinámica del Tween 80 + agua

Concentración 2.51×10^{-4} mol dm ⁻³ (313.15 k)				Concentración 2.51×10^{-4} mol dm ⁻³ (323.15 k)			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	64.62	40.8	45.36	0	65.37	102	42.1
0.8	54.05	41.6	45.39	2	55.14	104	42.04
1.6	55.25	42.4	45.3	4	49.53	106	42.01
2.4	52.57	43.2	45.01	6	48.26	108	41.77
3.2	52	44	45.38	8	47.96	110	41.83
4	50.83	44.8	45.08	10	46.94	112	41.89
4.8	51.26	45.6	45.17	12	46.54	114	41.54
5.6	50.56	46.4	45.38	14	46.32	116	41.56
6.4	50.23	47.2	44.97	16	46	118	41.62
7.2	49.89	48	45.15	18	45.88	120	41.7
8	49.66	48.8	45.01	20	45.59	122	41.88
8.8	49.32	49.6	45.07	22	45.23	124	41.93
9.6	48.66	50.4	44.65	24	45.07	126	41.62
10.4	49.19	51.2	45.01	26	44.68	128	41.72
11.2	48.41	52	44.64	28	44.59	130	41.73
12	48.37	52.8	44.76	30	44.44	132	41.7
12.8	48.21	53.6	44.95	32	44.26	134	41.83
13.6	48.19	54.4	44.64	34	44.12	136	41.68
14.4	48.07	55.2	44.52	36	44.1	138	41.62
15.2	48.07	56	44.69	38	43.9	140	41.98
16	47.66	56.8	44.91	40	43.95	142	41.39
16.8	47.28	57.6	44.62	42	43.63	144	41.58
17.6	47	58.4	44.87	44	43.94	146	41.59
18.4	47.42	59.2	44.5	46	43.21	148	41.36
19.2	47.61	60	44.66	48	43.24	150	41.48
20	47.07	60.8	44.33	50	43.43	152	41.31
20.8	47.2	61.6	44.3	52	43.21	154	41.26
21.6	46.55	62.4	44.42	54	43.21	156	41.42
22.4	46.91	63.2	44.5	56	42.83	158	41.45
23.2	46.85	64	44.42	58	43.09	160	41.24
24	46.71	64.8	44.79	60	43.08	162	41.26
24.8	46.93	65.6	44.45	62	42.86	164	41.24
25.6	46.47	66.4	44.64	64	42.73	166	41.14
26.4	46.4	67.2	44.53	66	42.88	168	41.05
27.2	46.41	68	44.43	68	42.85	170	41.12
28	46.13	68.8	44.25	70	42.81	172	40.95
28.8	46.44	69.6	44.56	72	42.79	174	41.09
29.6	46.42	70.4	44.3	74	42.83	176	41.01
30.4	46.47	71.2	44.27	76	42.83	178	40.58
31.2	45.86	72	44.35	78	42.75	180	40.69
32	46.1	72.8	44.06	80	42.53	182	40.85
32.8	46.33	73.6	44.23	82	42.78	184	40.69
33.6	46	74.4	44.33	84	42.49	186	40.81
34.4	46.11	75.2	43.85	86	42.55	188	40.69
35.2	45.59	76	44.25	88	42.39	190	40.58
36	46.04	76.8	44.07	90	42.21	192	40.87
36.8	45.36	77.6	44.09	92	42.32	194	40.64
37.6	45.74	78.4	44.33	94	41.99	196	40.88
38.4	45.64	79.2	43.98	96	42.04	198	40.63
39.2	45.41	80	43.83	98	42.15	200	40.37
40	45.38			100	41.88		

Tensión superficial dinámica del Surfínol DF110-D + agua

Concentración 2.51×10^{-4} mol dm ⁻³ (313.15 k)				Concentración 2.51×10^{-4} mol dm ⁻³ (323.15 k)			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	70.39	6	49.29	0.1	65.75	5.2	49.18
0.3	68.09	6.1	49.11	0.2	64.82	5.3	49.41
0.6	66.27	6.2	49.25	0.3	64.64	5.4	49.19
0.8	65.57	6.3	49.15	0.4	63.94	5.5	48.85
1.1	63.48	6.4	48.95	0.5	64.09	5.6	48.97
1.2	62.47	6.5	48.94	0.6	63.81	5.7	48.71
1.5	60.98	6.6	48.9	0.7	62.68	5.8	48.58
1.6	60.44	6.7	48.95	0.8	61.8	5.9	49.01
1.7	59.04	6.8	48.99	0.9	61.23	6	48.88
1.8	57.24	6.9	48.8	1	60.13	6.1	48.85
1.9	56.23	7	48.8	1.1	59.91	6.2	48.55
2	56.13	7.1	48.85	1.2	59.74	6.3	48.52
2.1	55.83	7.2	48.82	1.3	59.02	6.4	48.71
2.2	55.83	7.3	48.64	1.4	58.14	6.5	48.76
2.3	55.17	7.4	48.63	1.5	58.31	6.6	48.92
2.4	55.13	7.5	48.63	1.6	57.92	6.7	48.09
2.5	54.97	7.6	48.41	1.7	56.82	6.8	48.23
2.6	54.14	7.7	48.48	1.8	56.55	6.9	48.33
2.7	53.57	7.8	48.55	1.9	55.91	7	48.15
2.8	53.13	7.9	48.43	2	55.61	7.1	48.43
2.9	52.47	8	48.38	2.1	55.21	7.2	48.18
3	52.29	8.1	48.34	2.2	54.43	7.3	48.5
3.1	52.4	8.2	48.15	2.3	54.02	7.4	48.38
3.2	52.12	8.3	48.49	2.4	53.64	7.5	48.26
3.3	52.23	8.4	48.47	2.5	53.42	7.6	47.95
3.4	52.33	8.5	48.52	2.6	52.94	7.7	48.02
3.5	51.96	8.6	48.1	2.7	52.53	7.8	48.01
3.6	51.4	8.7	48.25	2.8	52.76	7.9	47.74
3.7	50.93	8.8	48.19	2.9	52.56	8	47.6
3.8	50.93	8.9	48.1	3	52.17	8.1	47.63
3.9	51.28	9	48.05	3.1	52.13	8.2	47.65
4	50.91	9.1	48.24	3.2	51.94	8.3	47.39
4.1	50.94	9.2	48.04	3.3	51.62	8.4	47.94
4.2	50.72	9.3	48.25	3.4	51.38	8.5	47.65
4.3	50.56	9.4	48.29	3.5	51.31	8.6	47.57
4.4	50.53	9.5	48.29	3.6	51.1	8.7	47.8
4.5	50.72	9.6	48.07	3.7	50.91	8.8	47.45
4.6	50.38	9.7	47.98	3.8	51.04	8.9	47.61
4.7	50.21	9.8	48.01	3.9	50.62	9	47.36
4.8	49.96	9.9	47.76	4	50.47	9.1	47.4
4.9	49.98	10	48.09	4.1	50.48	9.2	47.5
5	50			4.2	50.15	9.3	47.38
5.1	49.84			4.3	50.05	9.4	47.4
5.2	49.94			4.4	49.87	9.5	47.4
5.3	49.74			4.5	50.04	9.6	47.59
5.4	49.6			4.6	49.88	9.7	47.14
5.5	49.66			4.7	49.71	9.8	46.84
5.6	49.62			4.8	49.51	9.9	46.96
5.7	49.7			4.9	49.54	10	47.11
5.8	49.33			5	49.33		
5.9	49.34			5.1	49.49		

Tensión superficial dinámica del SurfínoI 485 + agua

Concentración 2.51×10^{-4} mol dm $^{-3}$ (313.15 k)				Concentración 2.51×10^{-4} mol dm $^{-3}$ (323.15 k)	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	54.03	7.3	46.92	0	51.09
0.2	52.04	7.4	46.21	0.2	49.67
0.6	51.54	7.5	46.64	0.7	47.73
0.8	49.19	7.6	46.59	1	46.94
1.1	49.14	7.7	46.67	1.4	46.04
1.9	48.15	7.8	46.62	1.7	45.84
2.2	48.31	7.9	46.16	2.1	45.86
2.5	47.57	8	46.88	2.2	45.28
2.8	47.44	8.1	46.61	2.5	45.07
3.1	47.12	8.2	46.7	2.6	45.31
3.4	46.95	8.3	46.88	2.9	45.19
3.5	46.49	8.4	47.15	3	45.2
3.6	45.87	8.5	46.81	3.4	44.98
3.7	46.72	8.6	46.7	3.6	44.95
3.8	46.3	8.7	46.59	3.9	44.75
3.9	46.39	8.8	46.35	4	44.73
4	46.28	8.9	46.57	4.5	44.74
4.1	46.8	9	46.93	5.2	44.4
4.2	45.92	9.1	46.55	6.1	44.42
4.3	46.25	9.2	46.42	6.2	44.3
4.4	46.82	9.3	46.63	6.7	44.31
4.5	46.43	9.4	46.61	6.8	44.11
4.6	46.1	9.5	46.99	6.9	44.13
4.7	46.93	9.6	46.68	7.6	44.08
4.8	46.74	9.7	46.59	7.7	44.41
4.9	46.25	9.8	46.46	8.3	44.21
5	46.29	9.9	46.69	8.4	44.18
5.1	46.89	10	46.47	8.6	44.64
5.2	46.62	7.5	46.64	9.1	44.54
5.3	46.66	7.6	46.59	9.2	44.14
5.4	46.51	7.7	46.67	9.3	44.46
5.5	46.53	7.8	46.62	9.9	44.48
5.6	46.05	7.9	46.16	10	44.43
5.7	46.38	8	46.88		
5.8	46.63	8.1	46.61		
5.9	46.6	8.2	46.7		
6	46.37	8.3	46.88		
6.1	46.76	8.4	47.15		
6.2	46.5	8.5	46.81		
6.3	46.51	8.6	46.7		
6.4	46.51	8.7	46.59		
6.5	46.77	8.8	46.35		
6.6	46.75	8.9	46.57		
6.7	46.89	10	46.47		
6.8	46.94				
6.9	46.51				
7	46.62				
7.1	46.52				
7.2	46.8				

En este apéndice se presentan resultados experimentales de tensión superficial dinámica de cinco sistemas multicomponentes: Brij 92, Tween 80, Ocenol, SurfínoI DF110-D y SurfínoI 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.

Se presentan gráficos de presión superficial dinámica en función del tiempo de dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, empleando la ecuación IV.5 (ver capítulo IV), con la finalidad de obtener, con la ordenada al origen, la presión superficial de equilibrio. Una vez obtenida la presión superficial de equilibrio está se ajusto en función de la concentración de equilibrio empleando la ecuación de estado de Langmuir, cuyos gráficos también se presentan aquí.

Se empleó el método gráfico (área bajo la curva) para resolver la integral de la ecuación de Ward y Tordai. Se presentan en este apéndice, la concentración del substrato (C_s) y los diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura. Ver la Figura 4.51 del Capítulo IV, página 143, cuyos valores de los dos sistemas multicomponentes, a dos temperaturas, están en las tablas 4.59, 4.60, .4.61 y 4.62, respectivamente del capítulo IV.

Para calcular el coeficiente de difusión de los dos sistemas multicomponentes: Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 y 323.15 K y varias concentraciones, se utilizó el procedimiento empleado por Mora Pale y Gracia Fadrique (1999), el cual se indica a continuación.

Ward y Tordai (1946) han sugerido un modelo para la concentración superficial, Γ , de tensoactivos a tiempo, t , cuando la adsorción está controlada por la difusión:

$$\Gamma - \Gamma^0_{t=0} = 2 \left(\frac{D_{12}t}{\Pi} \right)^{1/2} \left[c_{eq} t^{1/2} - \int_0^{t/2} c_s(\tau) d(t-\tau)^{1/2} \right] \quad (\text{II.7})$$

C_{eq} = Concentración de equilibrio

C_s = Concentración del substrato

Γ = Concentración superficial (mol/cm^2)

$\Pi = 3.1416$

τ = todo tiempo menor o igual a t (s)

Esta ecuación considera la existencia de un equilibrio local entre la concentración en el substrato, C_s , y la concentración superficial, Γ , a todo tiempo.

En la ecuación (II.7), se indica el término de concentración superficial cuando el tiempo es igual a cero, esto aplica para sistemas que en un inicio no se encuentran limpios de material tensoactivo. Por otro lado, del lado derecho de la igualdad, se hace notar la diferencia entre el proceso difusivo ($C_{eq} t^{1/2}$) y el contradifusivo que está representado por el término de la integral.

Al existir un equilibrio local en la región del substrato, se relaciona la concentración del substrato, C_s , con la presión superficial, $\pi(t)$, por medio de la ecuación de Langmuir.

$$\pi(t) = \Gamma_s RT \ln(1 + \beta C_s) \quad (1)$$

Γ_s = concentración de saturación de superficie (mol/cm²)

R = Constante universal de los gases (erg/mol K).

T = Temperatura del sistema (K).

β = Es una constante para cada sistema que cuantifica el efecto hidrófobico.

La presión superficial, es la diferencia entre la tensión superficial del disolvente puro, γ_0 , y la tensión superficial de la solución evaluado a un tiempo dado, $\gamma(t)$.

$$\pi = \gamma_0 - \gamma(t) \quad (2)$$

Conociendo la concentración de bulto en las distintas soluciones y los valores de la presión superficial de equilibrio, se presenta equilibrio mediante la ecuación de Langmuir; a partir de ésta se construye la curva de equilibrio:

$$\pi(eq) = \Gamma_s RT \ln(1 + \beta C_{eq}) \quad (3)$$

La curva de equilibrio del sistema, se construye a partir de los datos experimentales y se ajusta matemáticamente con la ecuación (3). El resultado de este ajuste nos permitirá conocer los parámetros constantes de la ecuación de Langmuir, que son el término de $\Gamma_s RT$ y β , para simplificar definiremos un parámetro P_1 que está dado por:

$$P_1 = \Gamma_s RT \tag{4}$$

Teniendo la curva de equilibrio, por medio de la ecuación de Langmuir, podemos reorganizar la ecuación (1) empleando la ecuación de adsorción de Gibbs:

$$\Gamma = \frac{C_s}{RT} \left(\frac{d\pi(t)}{dC_s} \right) \tag{5}$$

Derivando la ecuación (1) con respecto a C_s y sustituyendo en la ecuación (5) obtenemos:

$$\Gamma = \left(\frac{P_1}{RT} \right) \left(\frac{\beta C_s}{(1 + \beta C_s)} \right) \tag{6}$$

Esta expresión modificada de la ecuación de adsorción de Gibbs se sustituye en la ecuación (II.7), donde la expresión final considera que al tiempo cero, la superficie recién formada se encuentra limpia de material tensoactivo, es decir que el término de $\Gamma^0|_{t=0}$ es igual a cero o se considera un valor despreciable. La expresión de la ecuación (II.7) queda:

$$\left(\frac{P_1}{RT} \right) \left(\frac{\beta C_s}{(1 + \beta C_s)} \right) = 2 \left(\frac{D_{12}}{\Pi} \right)^{1/2} \left(C_{eq} t^{1/2} - \int C_s d(t-\tau)^{1/2} \right) \tag{7}$$

Los límites de la integral van a ir desde $t=0$ hasta $t^{1/2}$.

La solución del término de la integral, que representa el término contradifusivo, presenta problemas si se intenta resolver analíticamente ya que la concentración en el sustrato es una función del tiempo. La solución de esta integral se obtiene graficando C_s vs $(t-\tau)^{1/2}$ y evaluando el área bajo la curva que resulte de ésta. Mediante los valores de la presión superficial reportados a cada tiempo y usando la ecuación (1), podemos despejar y obtener los valores de C_s , ya que los términos P_1 y β son constantes y conocidos una vez que fue construida la curva de equilibrio.

La nueva expresión que se presenta en la ecuación (7), nos va a permitir despejar y calcular el coeficiente de difusión, D_{12} , ya que todos los demás parámetros se conocen o se pueden calcular a partir de las ecuaciones anteriores.

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 1.16×10^{-6} mol cm⁻³ y 313.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
0.6	49.46	24.9	41.94	47.6	38.46
1.1	48.33	25.5	41.69	48.2	38.43
1.7	48.85	26.1	41.39	48.7	38.30
3.4	48.04	26.6	41.55	49.3	38.32
4.0	47.6	27.2	41.20	49.9	38.09
5.1	47.40	27.8	41.19	50.4	38.01
5.7	47.41	28.3	41.17	51.0	37.74
6.2	46.79	28.9	41.05	51.6	37.88
6.8	46.18	29.5	41.03	52.1	37.8
7.4	46.19	30.0	41.03	52.7	37.76
7.9	45.83	30.6	41.01	53.3	37.53
8.5	45.87	31.2	40.94	53.8	37.67
9.1	45.95	31.7	40.72	54.4	37.53
9.6	45.31	32.3	40.43	55.0	37.43
10.2	45.26	32.9	40.31	55.5	37.35
10.8	45.28	33.4	40.37	56.1	37.33
11.3	44.91	34.0	40.22	56.7	37.30
11.9	45.33	34.6	40.58		
12.5	44.70	35.1	40.05		
13.0	44.35	35.7	39.96		
13.6	44.38	36.3	40.13		
14.2	44.28	36.8	40.04		
14.7	44.08	37.4	40.21		
15.3	43.88	38.0	39.95		
15.9	44.00	38.5	39.47		
16.4	43.68	39.1	39.67		
17.0	43.80	39.7	39.40		
17.6	43.56	40.2	39.53		
18.1	43.51	40.8	39.35		
18.7	43.14	41.4	39.58		
19.3	43.09	41.9	39.26		
19.8	43.10	42.5	39.12		
20.4	42.80	43.1	38.96		
21.0	42.95	43.6	38.89		
21.5	42.40	44.2	39.12		
22.1	42.22	44.8	38.78		
22.7	42.38	45.3	38.86		
23.2	42.14	45.9	38.75		
23.8	41.70	46.5	38.61		
24.4	42.01	47.0	38.57		

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 2.06×10^{-6} mol cm^{-3} y 313.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
1.6	48.43	10.9	36.40	21.6	33.81
1.7	47.53	11.2	36.37	21.9	33.80
1.9	46.95	11.5	35.94	22.1	33.72
2.1	46.33	11.7	36.14	22.4	33.67
2.3	45.69	12.0	36.11	22.7	33.76
2.4	45.37	12.3	35.90	22.9	33.71
2.7	44.71	12.5	36.11	23.2	33.60
2.5	44.2	12.8	35.95	23.5	33.75
2.9	43.69	13.1	35.86	23.7	33.44
3.2	43.20	13.3	35.62	24.0	33.46
3.5	42.66	13.6	35.55	24.3	33.18
3.7	42.70	13.9	35.41	24.5	33.39
4.0	42.03	14.1	35.55	24.8	32.84
4.1	41.69	14.4	35.39	25.1	32.94
4.3	41.55	14.7	35.08	25.3	32.50
4.5	41.20	14.9	35.20	25.6	32.40
4.8	40.82	15.2	35.08	25.9	32.44
5.1	40.54	15.5	34.94	26.1	32.36
5.3	40.26	15.7	35.04	26.4	32.45
5.6	39.81	16.0	34.95	26.7	32.45
5.9	39.66	16.3	34.69		
6.1	39.30	16.5	34.93		
6.3	39.25	16.8	34.74		
6.4	39.03	17.1	34.71		
6.7	39.01	17.3	34.55		
6.9	38.76	17.6	34.71		
7.2	38.69	17.9	34.62		
7.5	38.32	18.1	34.48		
7.7	38.04	18.4	34.48		
8.0	38.00	18.7	34.24		
8.3	37.76	18.9	34.32		
8.5	37.69	19.2	34.17		
8.8	37.49	19.5	34.18		
9.1	37.48	19.7	34.08		
9.3	37.61	20.0	34.14		
9.6	37.28	20.3	34.03		
9.9	37.07	20.5	34.07		
10.1	36.95	20.8	34.02		
10.4	36.88	21.1	34.13		
10.7	36.71	21.3	34.09		

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 3.55×10^{-6} mol cm^{-3} y 313.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
0.4	46.20	16.4	32.27	32.4	30.77
0.8	44.92	16.8	31.87	32.8	30.96
1.2	44.68	17.2	32.15	33.2	30.73
1.6	43.82	17.6	32.12	33.6	30.60
2.0	42.52	18.0	32.04	34.0	30.61
2.4	42.27	18.4	31.90	34.4	30.75
2.8	41.72	18.8	31.79	34.8	30.57
3.2	40.77	19.2	31.80	35.2	30.61
3.6	40.33	19.6	31.85	35.6	30.64
4.0	39.94	20.0	31.88	36.0	30.50
4.4	39.02	20.4	31.63	36.4	30.69
4.8	38.98	20.8	31.67	36.8	30.78
5.2	38.25	21.2	31.67	37.2	30.67
5.6	37.70	21.6	31.52	37.6	30.53
6.0	37.68	22.0	31.54	38.0	30.59
6.4	37.04	22.4	31.44	38.4	30.69
6.8	36.51	22.8	31.56	38.8	30.51
7.2	36.39	23.2	31.43	39.2	30.62
7.6	36.08	23.6	31.3	39.6	30.53
8.0	35.78	24.0	31.40	40.0	30.42
8.4	35.54	24.4	31.14		
8.8	35.50	24.8	31.02		
9.2	35.01	25.2	31.28		
9.6	34.8	25.6	31.19		
10.0	34.58	26.0	31.14		
10.4	34.61	26.4	31.09		
10.8	34.28	26.8	31.23		
11.2	34.09	27.2	31.05		
11.6	33.79	27.6	31.14		
12.0	33.69	28.0	31.02		
12.4	33.57	28.4	30.95		
12.8	33.47	28.8	30.94		
13.2	33.16	29.2	30.82		
13.6	33.11	29.6	30.88		
14.0	33.08	30.0	30.86		
14.4	32.90	30.4	30.88		
14.8	32.53	30.8	31.08		
15.2	32.47	31.2	30.80		
15.6	32.35	31.6	30.80		
16.0	32.35	32.0	30.80		

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 1.27×10^{-7} mol cm^{-3} y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
0.0	50.34	186.0	43.52
9.0	49.29	189.0	43.67
12.0	49.15	192.0	43.58
15.0	48.43	195.0	43.61
21.0	48.30	198.0	43.50
24.0	48.15	201.0	43.28
30.0	47.97	207.0	43.24
36.0	47.69	213.0	43.18
42.0	47.6	216.0	43.25
48.0	47.27	219.0	43.10
51.0	46.83	222.0	43.03
54.0	46.70	225.0	43.10
57.0	46.76	228.0	43.17
60.0	46.74	231.0	43.07
66.0	46.42	237.0	43.03
69.0	46.48	249.0	43.09
72.0	46.49		
75.0	45.90		
78.0	45.90		
81.0	46.05		
84.0	45.76		
87.0	45.62		
93.0	45.62		
96.0	45.48		
99.0	45.54		
102.0	45.26		
111.0	45.01		
114.0	44.79		
117.0	44.73		
126.0	44.65		
132.0	44.54		
144.0	44.13		
147.0	43.90		
150.0	43.87		
162.0	43.91		
165.0	43.72		
168.0	43.53		
177.0	43.79		
180.0	43.83		
183.0	43.49		

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 2.55×10^{-7} mol cm^{-3} y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
0.0	50.12	132.0	41.79
3.0	48.03	135.0	41.62
6.0	47.29	138.0	41.51
9.0	46.48	141.0	41.61
12.0	46.02	144.0	41.48
15.0	45.5	147.0	41.54
18.0	45.27	150.0	41.54
21.0	44.68	156.0	41.44
24.0	44.48	159.0	41.51
27.0	44.16	162.0	41.46
30.0	44.00	165.0	41.13
33.0	43.78	168.0	41.40
36.0	43.57	171.0	41.14
39.0	43.16	174.0	41.28
42.0	43.53	180.0	41.21
45.0	43.10	189.0	41.08
51.0	43.01	198.0	41.07
54.0	43.09	204.0	41.06
57.0	42.88	207.0	41.03
60.0	42.65	216.0	40.96
63.0	42.54	222.0	40.81
66.0	42.3	225.0	40.89
69.0	42.37	228.0	40.94
72.0	42.30	234.0	40.96
75.0	42.17	240.0	40.87
78.0	42.09	243.0	40.58
81.0	42.14	246.0	40.71
84.0	42.15	249.0	40.66
87.0	42.09	252.0	40.62
90.0	42.05	264.0	40.34
93.0	42.08	279.0	40.33
96.0	42.12	300.0	40.27
99.0	42.10		
105.0	41.93		
108.0	41.86		
111.0	41.99		
120.0	41.71		
123.0	41.91		
126.0	41.69		
129.0	41.55		

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 1.16×10^{-6} mol cm^{-3} y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
2	46	82	35.74
4	45.08	84	35.77
6	44.31	86	35.65
8	44.1	88	35.42
10	43.55	90	35.39
12	43.03	92	35.48
14	42.44	94	35.32
16	41.93	96	35.44
18	41.83	98	35.23
20	41.59	100	35.26
22	41.22	102	35.03
24	41.16	104	35.28
26	40.64	106	34.88
28	40.16	108	34.89
30	40.06	110	34.99
32	39.83	112	34.97
34	39.58	116	34.99
36	39.52	118	34.82
38	39.23	120	34.84
40	39.18	122	34.81
42	38.78	128	34.83
44	38.68	130	34.74
46	38.34	132	34.61
48	38.19	138	34.6
50	38.4	148	34.32
52	38.14	150	34.19
54	37.72	198	34.66
56	37.62		
58	37.57		
60	37.2		
62	37.47		
64	36.98		
66	36.7		
68	36.68		
70	36.48		
72	36.4		
74	35.98		
76	35.85		
78	35.79		
80	35.8		

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 2.93×10^{-6} mol cm^{-3} y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
0.5	40.78	20.5	29.97	40.5	29.74
1	37.96	21	29.91	41	29.46
1.5	36.16	21.5	29.75	41.5	29.51
2	34.61	22	29.72	42	29.81
2.5	33.63	22.5	29.71	42.5	30.01
3	32.99	23	29.88	43	29.73
3.5	32.4	23.5	29.94	43.5	29.36
4	32.06	24	29.91	44	29.47
4.5	31.1	24.5	29.88	44.5	29.86
5	31.55	25	29.91	45	29.52
5.5	30.84	25.5	29.9	45.5	29.56
6	30.61	26	30.01	46	29.72
6.5	30.57	26.5	30.02	46.5	29.6
7	30.38	27	29.91	47	29.61
7.5	30.23	27.5	29.93	47.5	29.57
8	30.34	28	29.68	48	29.59
8.5	30.3	28.5	29.79	48.5	29.42
9	30.22	29	29.88	49	29.56
9.5	30.33	29.5	29.84	49.5	29.64
10	30.23	30	29.91	50	29.48
10.5	30.09	30.5	29.92		
11	29.97	31	30		
11.5	30.04	31.5	29.93		
12	29.56	32	29.75		
12.5	29.6	32.5	29.83		
13	29.71	33	29.97		
13.5	30.09	33.5	29.83		
14	30.1	34	29.68		
14.5	29.97	34.5	29.78		
15	30.04	35	29.81		
15.5	29.89	35.5	30.01		
16	29.75	36	29.86		
16.5	29.76	36.5	29.6		
17	29.83	37	29.72		
17.5	29.68	37.5	29.76		
18	29.77	38	29.67		
18.5	29.98	38.5	29.84		
19	29.85	39	29.65		
19.5	29.85	39.5	29.71		
20	29.84	40	29.67		

Tensión superficial dinámica del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 3.55×10^{-6} mol cm⁻³ y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
0.5	42.33	20.5	30.73	40.5	30.27
1	40.11	21	30.67	41	30.29
1.5	38.35	21.5	30.35	41.5	29.95
2	36.86	22	30.53	42	29.99
2.5	35.91	22.5	30.8	42.5	30.1
3	34.95	23	30.71	43	30.07
3.5	34.5	23.5	30.52	43.5	29.94
4	34.15	24	30.53	44	30.01
4.5	33.6	24.5	30.31	44.5	29.97
5	33.55	25	30.43	45	29.94
5.5	33.22	25.5	30.48	45.5	29.97
6	32.98	26	30.4	46	29.89
6.5	32.85	26.5	30.41	46.5	30.1
7	32.69	27	30.33	47	29.94
7.5	32.41	27.5	30.43	47.5	29.86
8	32.29	28	30.15	48	29.61
8.5	32.02	28.5	30.29	48.5	30.01
9	31.92	29	30.38	49	30.13
9.5	31.61	29.5	30.34	49.5	29.85
10	31.52	30	30.38	50	29.86
10.5	31.8	30.5	30.32		
11	31.37	31	30.24		
11.5	31.47	31.5	30.3		
12	31.3	32	30.18		
12.5	31.03	32.5	30.08		
13	31.12	33	30.2		
13.5	31.09	33.5	30.05		
14	31.01	34	30.1		
14.5	30.93	34.5	30.1		
15	30.95	35	30.02		
15.5	30.88	35.5	29.98		
16	30.95	36	30.26		
16.5	30.88	36.5	30.04		
17	30.85	37	29.99		
17.5	30.73	37.5	30.02		
18	30.83	38	30.1		
18.5	30.8	38.5	30.16		
19	30.47	39	30		
19.5	30.62	39.5	30.14		
20	30.81	40	30.38		

Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.03×10^{-6} mol cm⁻³ y 313.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
2	44.86	82	35.41
4	42.65	84	35.24
6	41.37	86	35.51
8	40.61	88	35.42
10	40.01	90	35.4
12	39.47		
14	38.99		
16	38.61		
18	38.4		
20	38.16		
22	37.62		
24	37.56		
26	37.28		
28	37.28		
30	37.22		
32	36.98		
34	37.07		
36	36.85		
38	36.71		
40	36.72		
42	36.56		
44	36.36		
46	36.25		
48	36.27		
50	36.36		
52	36.07		
54	35.9		
56	36.07		
58	35.95		
60	35.91		
62	35.97		
64	35.66		
66	35.85		
68	35.91		
70	35.47		
72	35.4		
74	35.53		
76	35.41		
78	35.47		
80	35.49		

Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.16×10^{-6} mol cm⁻³ y 313.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
2.0	42.27	82.0	34.53	162.0	34.44
4.0	40.32	84.0	34.51	164.0	34.40
6.0	39.16	86.0	34.66	166.0	34.27
8.0	38.45	88.0	34.47	168.0	34.30
10.0	37.99	90.0	34.37	170.0	34.28
12.0	37.73	92.0	34.73	172.0	34.26
14.0	37.47	94.0	34.85	174.0	34.30
16.0	37.04	96.0	35.03	176.0	34.16
18.0	36.85	98.0	34.90	178.0	34.05
20.0	36.96	100.0	34.91	180.0	34.22
22.0	36.44	102.0	34.78	182.0	34.08
24.0	36.28	104.0	34.77	184.0	34.07
26.0	36.09	106.0	34.70	186.0	34.20
28.0	36.18	108.0	34.73		
30.0	36.06	110.0	34.61		
32.0	35.90	112.0	34.60		
34.0	35.90	114.0	34.54		
36.0	35.74	116.0	34.63		
38.0	35.59	118.0	34.45		
40.0	35.35	120.0	34.58		
42.0	35.26	122.0	34.42		
44.0	35.51	124.0	34.41		
46.0	35.30	126.0	34.50		
48.0	35.32	128.0	34.44		
50.0	34.99	130.0	34.35		
52.0	35.21	132.0	34.48		
54.0	35.11	134.0	34.56		
56.0	35.04	136.0	34.46		
58.0	35.05	138.0	34.54		
60.0	34.84	140.0	34.36		
62.0	34.99	142.0	34.34		
64.0	34.88	144.0	34.46		
66.0	34.91	146.0	34.36		
68.0	34.89	148.0	34.48		
70.0	34.50	150.0	34.42		
72.0	34.95	152.0	34.30		
74.0	34.44	154.0	34.35		
76.0	34.47	156.0	34.49		
78.0	34.24	158.0	34.24		
80.0	34.34	160.0	34.39		

Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.30×10^{-6} mol cm⁻³ y 313.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
2.0	40.44	82.0	34.56	162.0	32.74
4.0	39.03	84.0	34.45	164.0	32.74
6.0	37.88	86.0	34.66	166.0	32.82
8.0	37.41	88.0	34.62		
10.0	37.16	90.0	34.41		
12.0	36.65	92.0	34.48		
14.0	36.60	94.0	34.37		
16.0	36.38	96.0	34.40		
18.0	36.44	98.0	34.27		
20.0	36.00	100.0	34.22		
22.0	36.03	102.0	34.15		
24.0	35.94	104.0	34.00		
26.0	35.70	106.0	34.14		
28.0	35.82	108.0	34.11		
30.0	35.70	110.0	33.97		
32.0	35.59	112.0	34.20		
34.0	35.50	114.0	33.96		
36.0	35.58	116.0	33.99		
38.0	35.45	118.0	34.02		
40.0	35.49	120.0	33.89		
42.0	35.50	122.0	33.99		
44.0	35.24	124.0	33.98		
46.0	35.35	126.0	34.05		
48.0	35.17	128.0	33.92		
50.0	35.28	130.0	33.08		
52.0	35.17	132.0	33.00		
54.0	35.10	134.0	32.90		
56.0	34.94	136.0	32.87		
58.0	34.95	138.0	32.73		
60.0	35.11	140.0	32.74		
62.0	35.02	142.0	32.86		
64.0	34.83	144.0	32.75		
66.0	34.87	146.0	32.74		
68.0	34.78	148.0	32.61		
70.0	34.81	150.0	32.64		
72.0	34.67	152.0	32.79		
74.0	34.88	154.0	32.64		
76.0	34.65	156.0	32.72		
78.0	34.61	158.0	32.80		
80.0	34.59	160.0	32.61		

Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.47×10^{-6} mol cm⁻³ y 313.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
2.0	40.14	82.0	34.26
4.0	38.32	84.0	34.18
6.0	37.82	86.0	34.17
8.0	36.95	88.0	34.19
10.0	36.65	90.0	34.18
12.0	36.26	92.0	34.03
14.0	36.13	94.0	34.04
16.0	36.00	96.0	34.07
18.0	35.78	98.0	34.04
20.0	35.73	100.0	33.88
22.0	35.65	102.0	33.99
24.0	35.45	104.0	33.99
26.0	35.40	106.0	33.84
28.0	35.40	108.0	33.82
30.0	35.31	110.0	33.81
32.0	34.99	112.0	33.97
34.0	35.08	114.0	33.73
36.0	35.22	116.0	33.74
38.0	35.13	118.0	33.71
40.0	35.09	120.0	33.56
42.0	34.89	122.0	33.37
44.0	34.90	124.0	33.26
46.0	34.69	126.0	33.08
48.0	34.74	128.0	33.00
50.0	34.79	130.0	32.87
52.0	34.78	132.0	32.73
54.0	34.68	134.0	32.74
56.0	34.67	136.0	32.86
58.0	34.52	138.0	32.75
60.0	34.53	140.0	32.74
62.0	34.49	142.0	32.61
64.0	34.41	144.0	32.64
66.0	34.49	146.0	32.79
68.0	34.39	148.0	32.64
70.0	34.30	150.0	32.72
72.0	34.25	152.0	32.80
74.0	34.22	154.0	32.61
76.0	34.27	156.0	32.74
78.0	34.28	158.0	32.74
80.0	34.06	160.0	32.82

Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.03×10^{-6} mol cm⁻³ y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
0.5	42.27	11.2	34.36
0.8	41.10	11.5	34.33
1.1	40.59	11.7	34.31
1.3	40.10	12.0	34.08
1.6	39.45	12.3	34.25
1.9	39.05	12.5	34.23
2.1	38.87	12.8	34.33
2.4	38.29	13.1	33.99
2.7	38.05	13.6	33.97
2.9	37.68	14.1	33.84
3.2	37.48	14.7	33.77
3.5	37.24	15.2	33.87
3.7	37.04	15.5	33.93
4.0	36.81	15.7	33.73
4.3	36.44	16.0	33.82
4.5	36.38	16.3	33.70
4.8	36.05	16.5	33.94
5.1	36.12	16.8	33.80
5.3	36.21	17.1	33.63
5.6	35.66	17.3	33.61
5.9	35.53	17.6	33.54
6.1	35.87	17.9	33.63
6.4	35.43	18.1	33.58
6.7	35.49	18.4	33.63
6.9	35.46	18.7	33.57
7.2	35.14	18.9	33.60
7.5	35.21	19.2	33.68
7.7	35.02	19.5	33.43
8.0	35.15	19.7	33.47
8.3	34.97	20.0	33.49
8.5	34.95	20.3	33.43
8.8	34.97	20.8	33.40
9.1	34.75	21.6	33.33
9.3	35.11	22.1	33.34
9.6	34.64	22.7	33.35
9.9	34.81	22.9	33.29
10.1	34.77	23.2	33.27
10.4	34.71		
10.7	34.68		
10.9	34.39		

Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.16×10^{-6} mol cm⁻³ y 323.15 K.

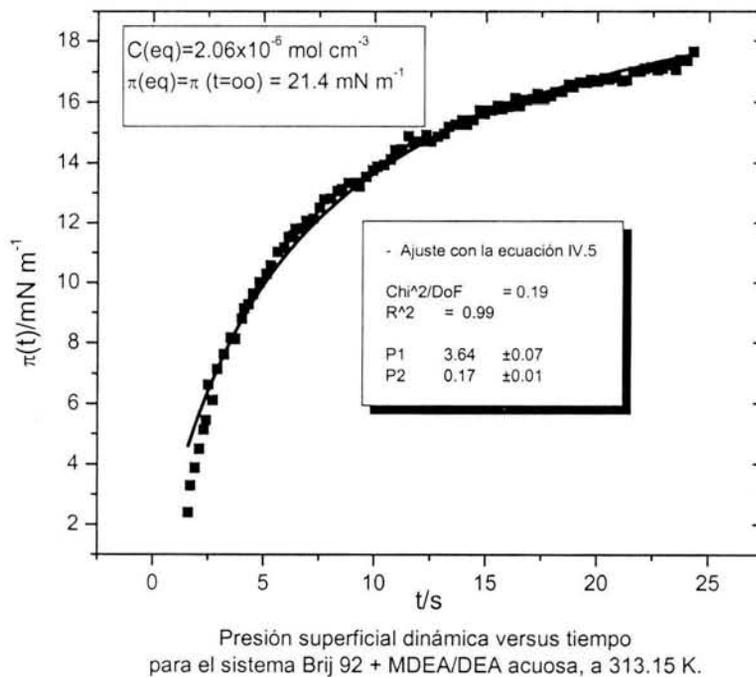
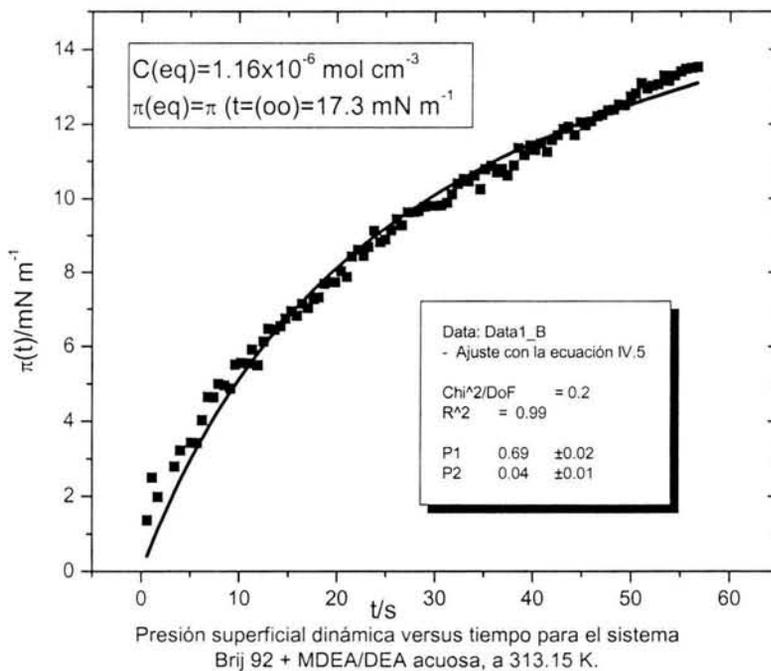
Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
1.0	39.64	41.0	33.85	81.0	32.76
2.0	38.35	42.0	33.71	82.0	32.39
3.0	37.74	43.0	33.72	83.0	32.43
4.0	37.08	44.0	33.65	84.0	32.56
5.0	36.78	45.0	33.60	85.0	32.26
6.0	36.40	46.0	33.53	86.0	32.29
7.0	36.00	47.0	33.57	87.0	32.31
8.0	35.85	48.0	33.53	88.0	32.29
9.0	35.69	49.0	33.41	89.0	32.26
10.0	35.63	50.0	33.39		
11.0	35.42	51.0	33.40		
12.0	35.29	52.0	33.34		
13.0	35.30	53.0	33.32		
14.0	35.02	54.0	33.37		
15.0	35.00	55.0	33.37		
16.0	34.94	56.0	33.36		
17.0	34.79	57.0	33.31		
18.0	34.72	58.0	33.29		
19.0	34.67	59.0	33.22		
20.0	34.58	60.0	33.23		
21.0	34.53	61.0	33.20		
22.0	34.49	62.0	33.16		
23.0	34.36	63.0	33.08		
24.0	34.35	64.0	33.05		
25.0	34.31	65.0	33.25		
26.0	34.36	66.0	33.11		
27.0	34.14	67.0	33.10		
28.0	34.28	68.0	32.81		
29.0	34.22	69.0	32.90		
30.0	34.04	70.0	33.05		
31.0	34.10	71.0	32.92		
32.0	34.03	72.0	32.82		
33.0	34.04	73.0	32.71		
34.0	34.05	74.0	32.75		
35.0	33.90	75.0	32.88		
36.0	33.82	76.0	32.94		
37.0	33.83	77.0	32.81		
38.0	33.83	78.0	32.84		
39.0	33.90	79.0	32.64		
40.0	33.86	80.0	32.67		

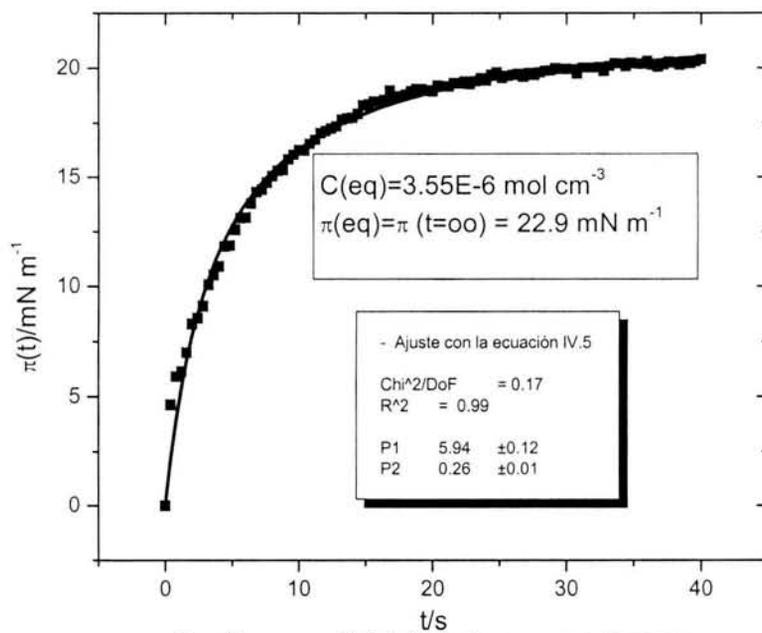
Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.30×10^{-6} mol cm⁻³ y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
1.5	37.68	64.5	32.81
3.0	36.82	66.0	32.62
4.5	35.89	67.5	32.71
6.0	35.55	69.0	32.66
7.5	35.41	70.5	32.64
9.0	35.13	72.0	32.68
10.5	34.89	73.5	32.53
12.0	34.73	75.0	32.55
13.5	34.58	76.5	32.59
16.5	34.32	78.0	32.50
18.0	34.29	79.5	32.36
19.5	34.16	81.0	32.47
21.0	34.18	82.5	32.41
22.5	34.13	84.0	32.45
24.0	34.12	85.5	32.36
25.5	34.01	87.0	32.28
27.0	33.78	88.5	32.37
28.5	33.73	90.0	32.37
30.0	33.66	91.5	32.18
31.5	33.59	93.0	32.33
33.0	33.66		
34.5	33.54		
36.0	33.46		
37.5	33.38		
39.0	33.42		
40.5	33.37		
42.0	33.33		
43.5	33.22		
45.0	33.23		
46.5	33.15		
48.0	33.14		
49.5	33.19		
52.5	32.88		
54.0	32.96		
55.5	32.96		
57.0	32.92		
58.5	32.92		
60.0	32.86		
61.5	32.89		
63.0	32.88		

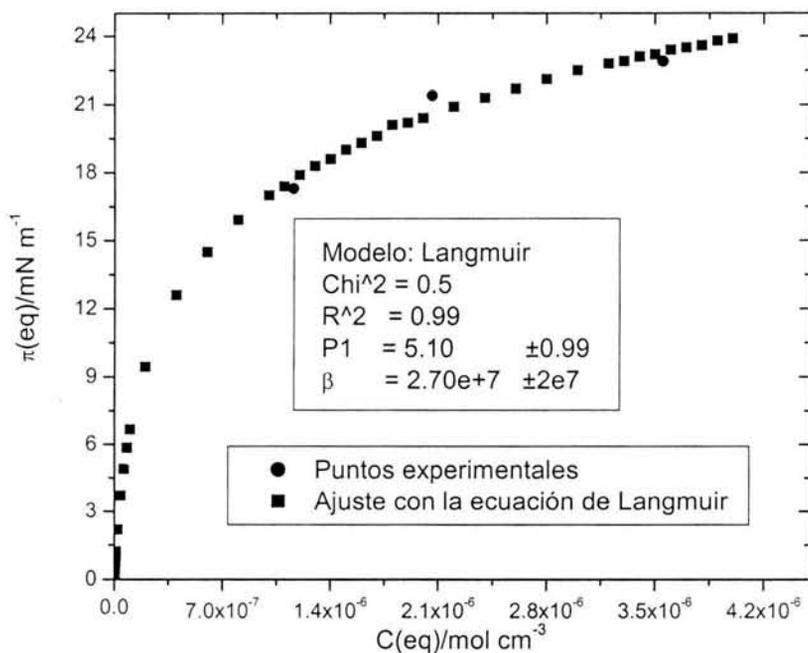
Tensión superficial dinámica del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.47×10^{-6} mol cm⁻³ y 323.15 K.

Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma/\text{mN m}^{-1}$
1.0	37.45	41.0	32.84
2.0	36.53	42.0	32.84
3.0	36.01	43.0	32.79
4.0	35.63	44.0	32.79
5.0	35.21	45.0	32.66
6.0	35.01	46.0	32.65
7.0	34.95	47.0	32.62
8.0	34.66	48.0	32.61
9.0	34.50	49.0	32.73
10.0	34.38	50.0	32.67
11.0	34.23	51.0	32.53
12.0	34.11	52.0	32.49
13.0	34.06	53.0	32.51
14.0	34.22	54.0	32.70
15.0	34.00	55.0	32.44
16.0	34.34	56.0	32.36
17.0	33.78	57.0	32.34
18.0	33.91	58.0	32.44
19.0	33.84	59.0	32.28
20.0	34.01	60.0	32.46
21.0	33.88	61.0	32.32
22.0	33.56	62.0	32.28
23.0	33.48	63.0	32.34
24.0	33.56	64.0	32.21
25.0	33.69	65.0	32.28
26.0	33.24	66.0	32.20
27.0	33.30	67.0	32.37
28.0	33.48	68.0	32.03
29.0	33.24	69.0	32.14
30.0	33.41	70.0	32.20
31.0	32.97	71.0	32.04
32.0	33.14	72.0	32.16
33.0	33.00	73.0	32.05
34.0	33.35	74.0	32.00
35.0	33.02		
36.0	33.03		
37.0	33.07		
38.0	32.92		
39.0	32.89		
40.0	32.94		

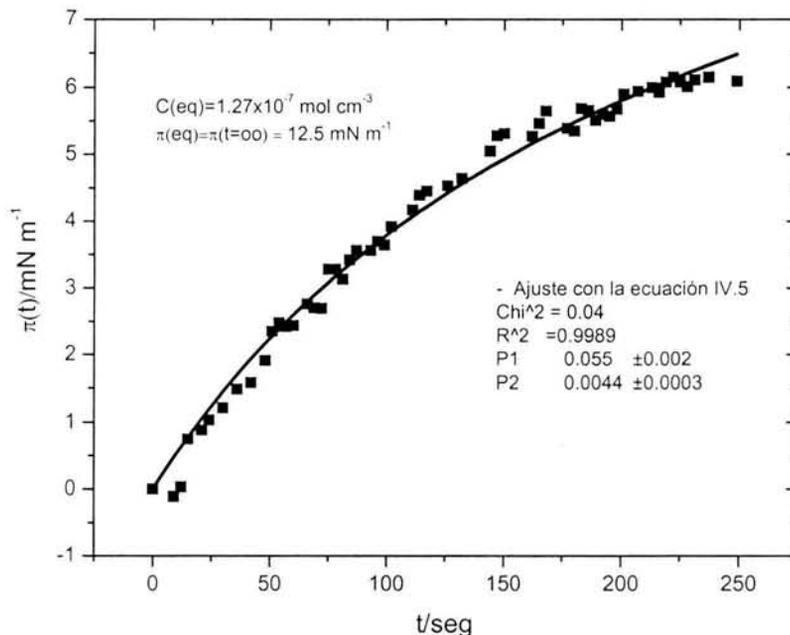




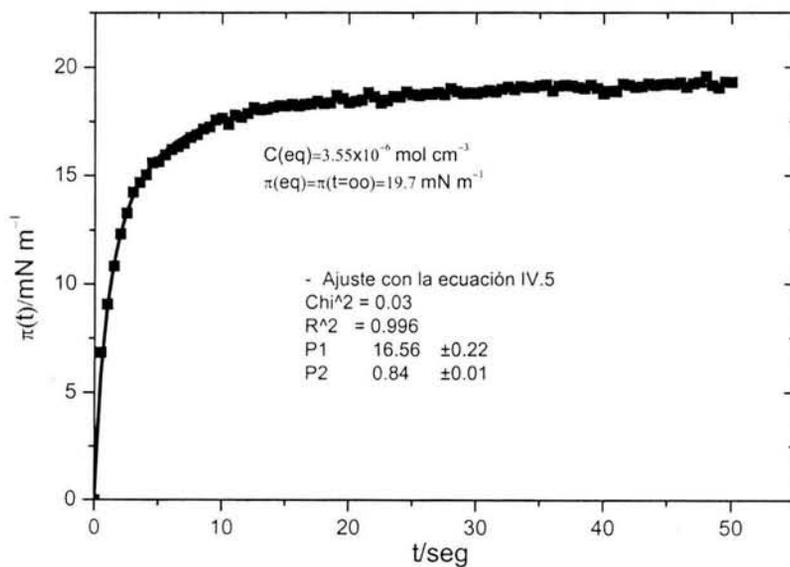
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.



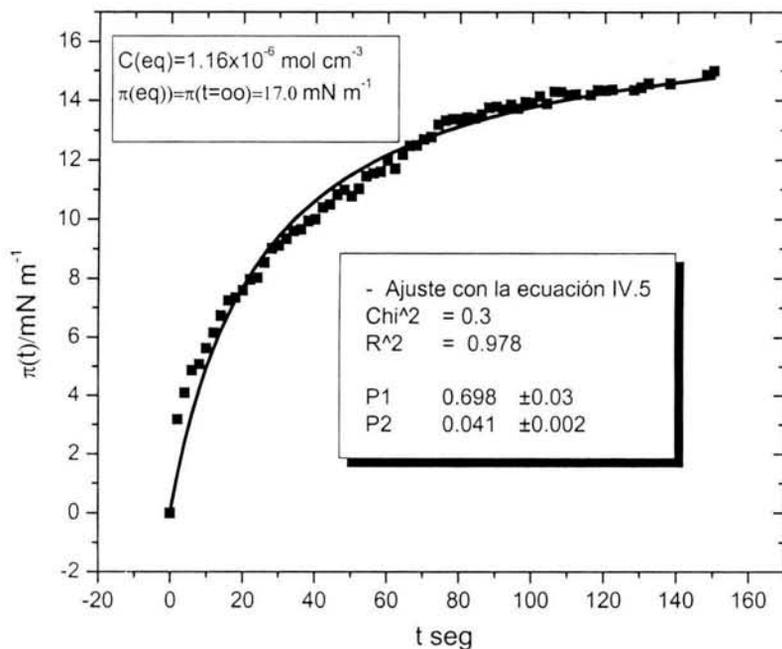
Presión superficial de equilibrio versus concentración de equilibrio para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.



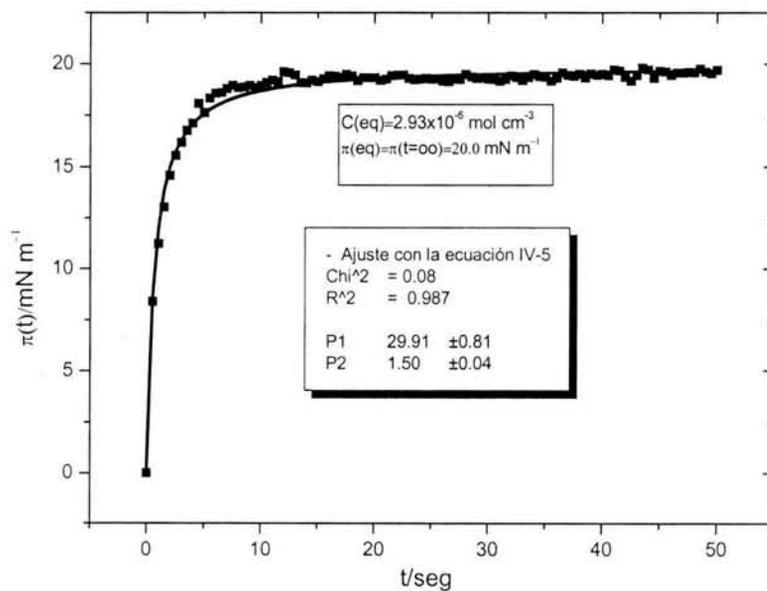
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



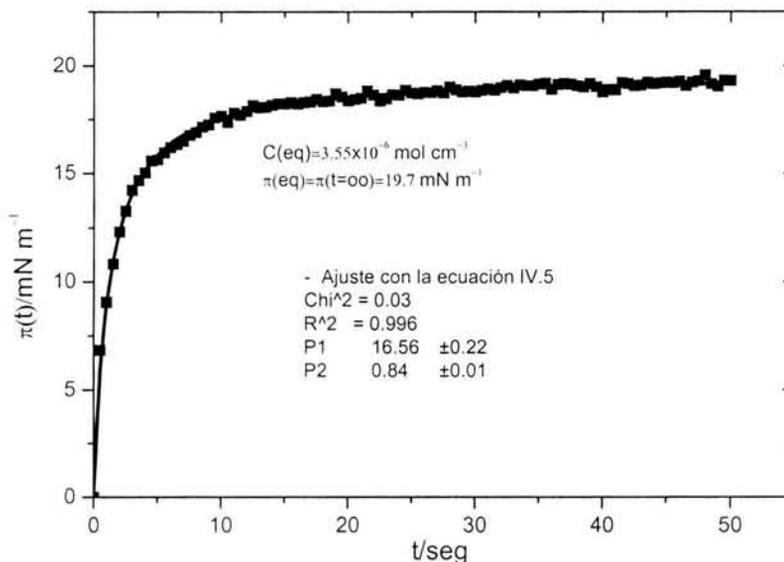
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



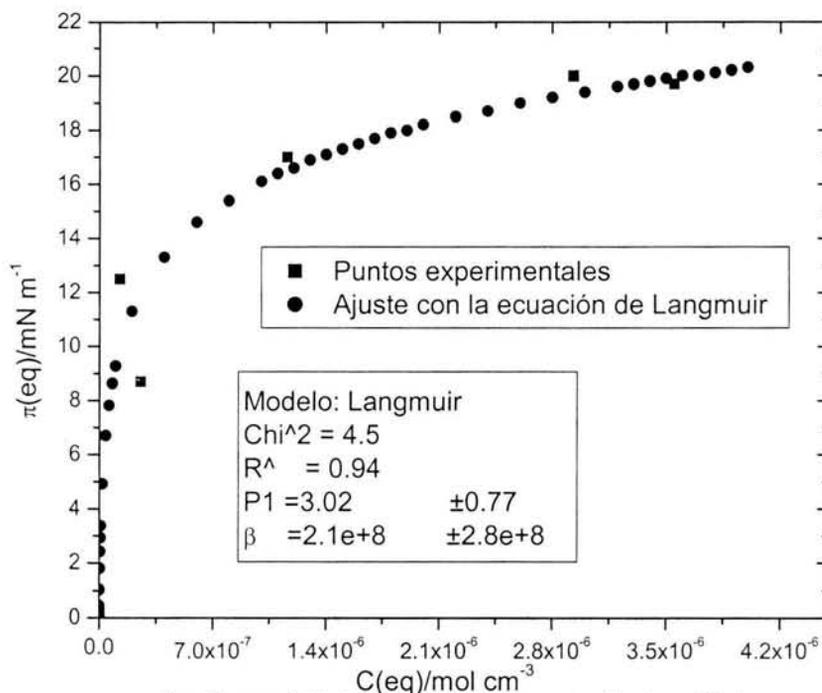
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K



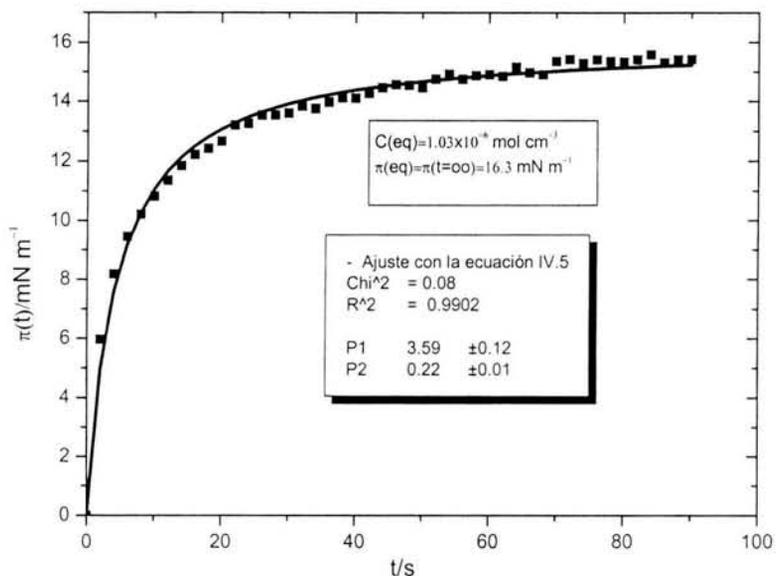
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



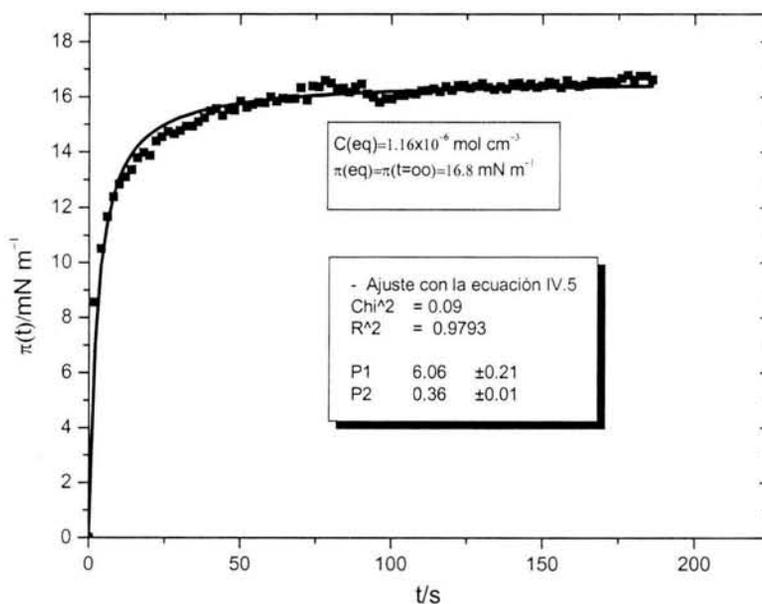
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



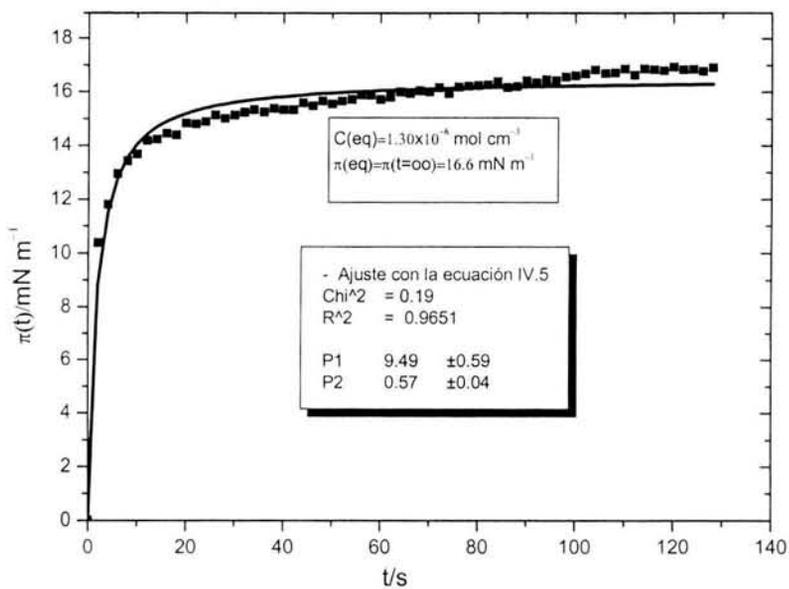
Presión superficial de equilibrio versus concentración de equilibrio para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



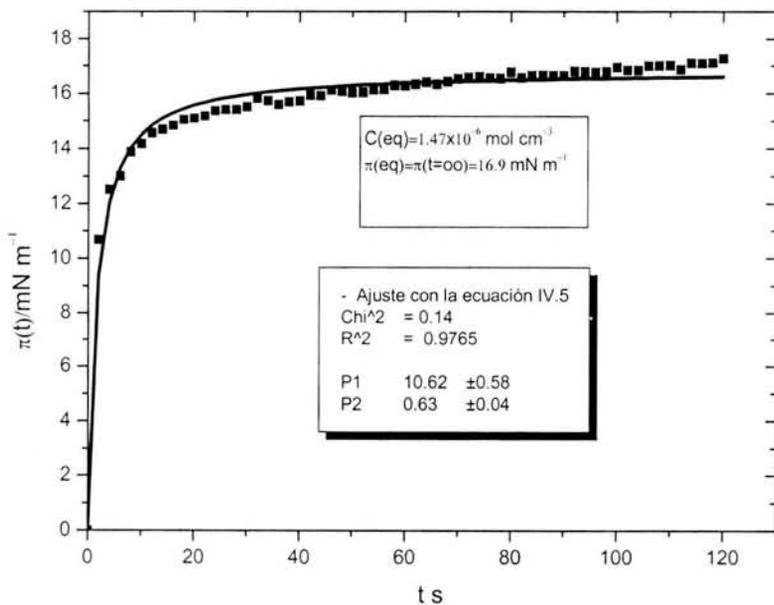
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.



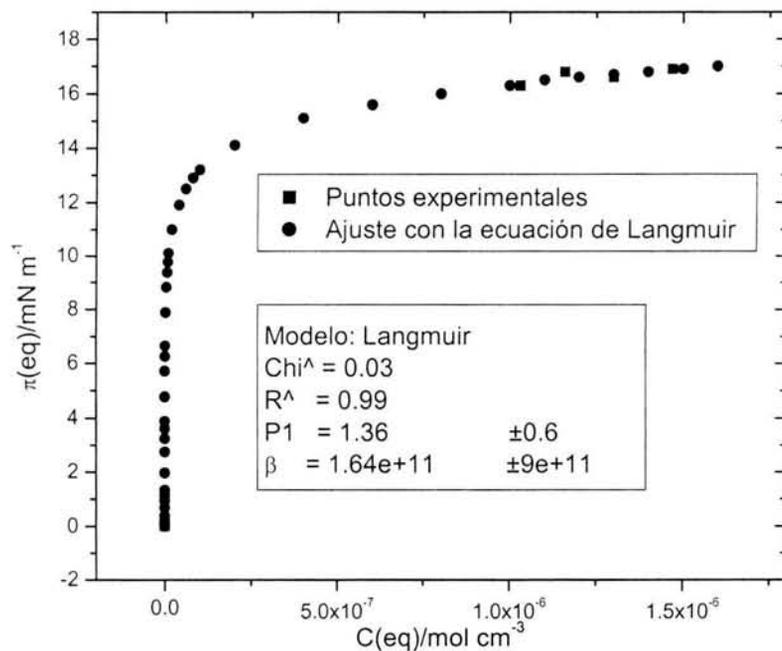
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.



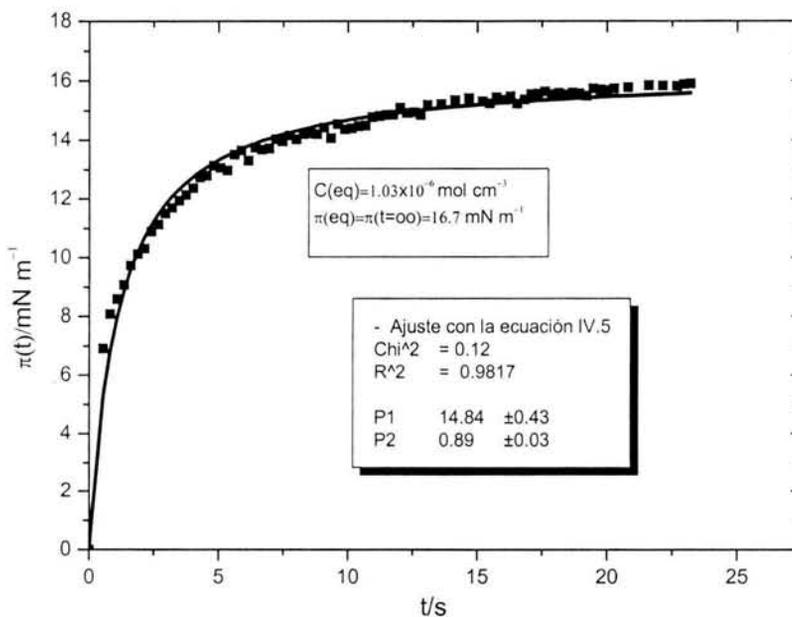
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.



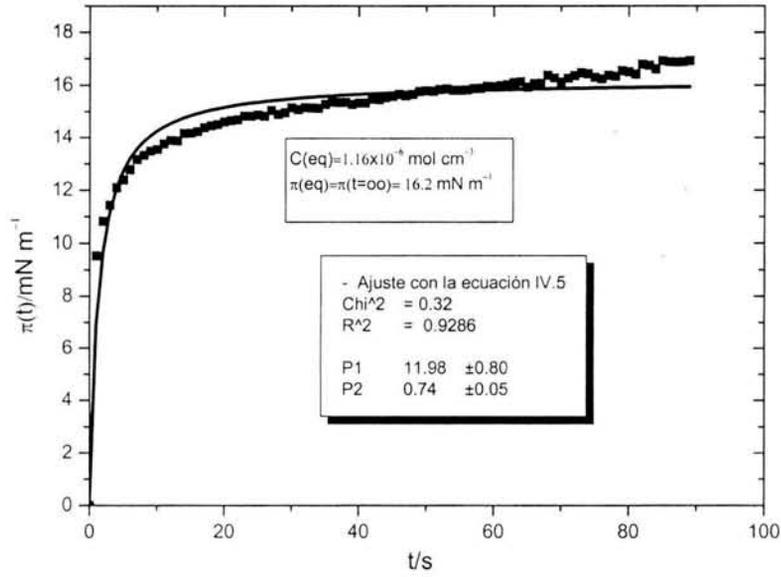
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.



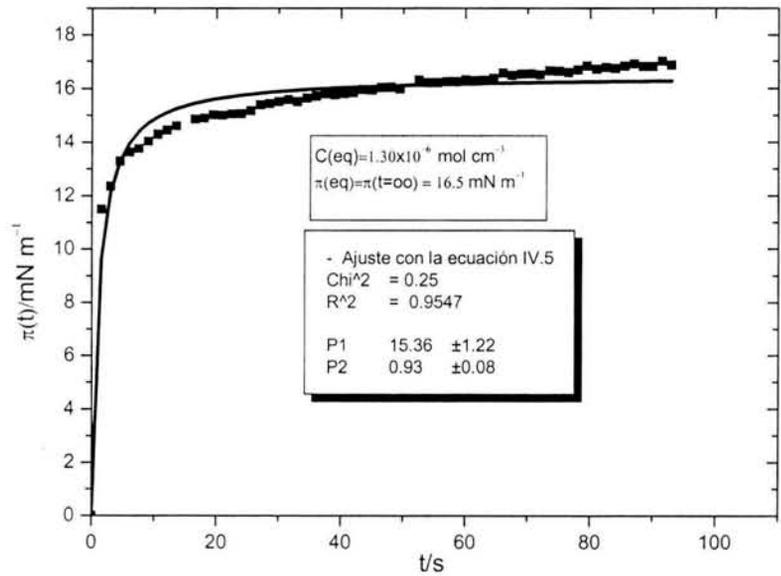
Presión superficial de equilibrio versus concentración de equilibrio para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.



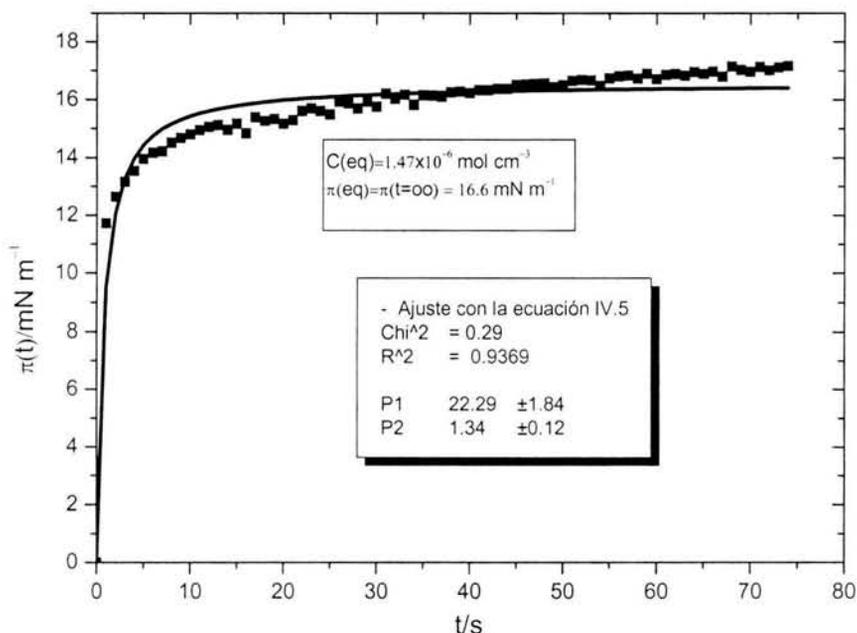
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



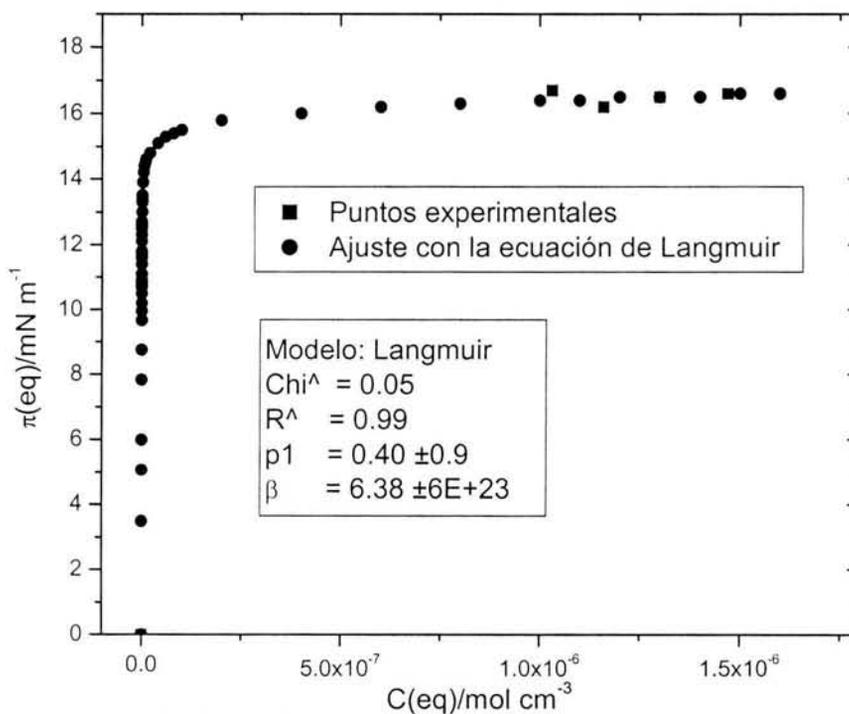
Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



Presión superficial dinámica versus tiempo para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.



Presión superficial de equilibrio versus concentración de equilibrio para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a $1.16 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 313.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 56.7 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 47.6 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 40.8 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 35.7 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 20.4 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	7.53	6.9	6.4	6	4.52
0.6	1.15E-08	7.49	6.86	6.3	5.9	4.45
1.1	2.35E-08	7.45	6.82	6.3	5.9	4.39
1.7	1.76E-08	7.41	6.77	6.3	5.8	4.32
3.4	2.71E-08	7.3	6.65	6.1	5.7	4.12
4	3.28E-08	7.26	6.61	6.1	5.6	4.05
5.1	3.56E-08	7.18	6.52	6	5.5	3.91
5.7	3.55E-08	7.14	6.48	5.9	5.5	3.84
6.2	4.49E-08	7.1	6.43	5.9	5.4	3.76
6.8	5.53E-08	7.06	6.39	5.8	5.4	3.69
7.4	5.51E-08	7.02	6.34	5.8	5.3	3.61
7.9	6.19E-08	6.98	6.3	5.7	5.3	3.53
8.5	6.11E-08	6.94	6.25	5.7	5.2	3.45
9.1	5.96E-08	6.9	6.21	5.6	5.2	3.37
9.6	7.25E-08	6.86	6.16	5.6	5.1	3.28
10.2	7.36E-08	6.82	6.12	5.5	5	3.19
10.8	7.32E-08	6.77	6.07	5.5	5	3.1
11.3	8.15E-08	6.73	6.02	5.4	4.9	3.01
11.9	7.21E-08	6.69	5.97	5.4	4.9	2.92
12.5	8.64E-08	6.65	5.93	5.3	4.8	2.82
13	9.52E-08	6.61	5.88	5.3	4.8	2.71
13.6	9.44E-08	6.56	5.83	5.2	4.7	2.61
14.2	9.71E-08	6.52	5.78	5.2	4.6	2.5
14.7	1.02E-07	6.48	5.73	5.1	4.6	2.38
15.3	1.08E-07	6.43	5.68	5	4.5	2.26
15.9	1.05E-07	6.39	5.63	5	4.5	2.13
16.4	1.14E-07	6.34	5.58	4.9	4.4	1.99
17	1.10E-07	6.3	5.53	4.9	4.3	1.84
17.6	1.17E-07	6.25	5.48	4.8	4.3	1.68
18.1	1.19E-07	6.21	5.43	4.8	4.2	1.51
18.7	1.31E-07	6.16	5.38	4.7	4.1	1.3
19.3	1.32E-07	6.12	5.32	4.6	4.1	1.06
19.8	1.32E-07	6.07	5.27	4.6	4	0.75
20.4	1.42E-07	6.02	5.22	4.5	3.9	0
21	1.37E-07	5.97	5.16	4.5	3.8	
21.5	1.57E-07	5.93	5.11	4.4	3.8	
22.1	1.64E-07	5.88	5.05	4.3	3.7	
22.7	1.58E-07	5.83	4.99	4.3	3.6	
23.2	1.67E-07	5.78	4.94	4.2	3.5	
23.8	1.85E-07	5.73	4.88	4.1	3.4	
24.4	1.72E-07	5.68	4.82	4.1	3.4	
24.9	1.75E-07	5.63	4.76	4	3.3	
25.5	1.86E-07	5.58	4.7	3.9	3.2	
26.1	1.99E-07	5.53	4.64	3.8	3.1	
26.6	1.92E-07	5.48	4.58	3.8	3	
27.2	2.08E-07	5.43	4.52	3.7	2.9	

continúa

continúa

27.8	2.09E-07	5.38	4.45	3.6	2.8
28.3	2.10E-07	5.32	4.39	3.5	2.7
28.9	2.16E-07	5.27	4.32	3.4	2.6
29.5	2.17E-07	5.22	4.26	3.4	2.5
30	2.17E-07	5.16	4.19	3.3	2.4
30.6	2.18E-07	5.11	4.12	3.2	2.3
31.2	2.21E-07	5.05	4.05	3.1	2.1
31.7	2.33E-07	4.99	3.98	3	2
32.3	2.48E-07	4.94	3.91	2.9	1.8
32.9	2.55E-07	4.88	3.84	2.8	1.7
33.4	2.52E-07	4.82	3.76	2.7	1.5
34	2.60E-07	4.76	3.69	2.6	1.3
34.6	2.40E-07	4.7	3.61	2.5	1.1
35.1	2.70E-07	4.64	3.53	2.4	0.8
35.7	2.76E-07	4.58	3.45	2.3	0
36.3	2.66E-07	4.52	3.37	2.1	
36.8	2.71E-07	4.45	3.28	2	
37.4	2.61E-07	4.39	3.19	1.8	
38	2.76E-07	4.32	3.1	1.7	
38.5	3.07E-07	4.26	3.01	1.5	
39.1	2.94E-07	4.19	2.92	1.3	
39.7	3.12E-07	4.12	2.82	1.1	
40.2	3.03E-07	4.05	2.71	0.8	
40.8	3.16E-07	3.98	2.61	0	
41.4	3.00E-07	3.91	2.5		
41.9	3.22E-07	3.84	2.38		
42.5	3.32E-07	3.76	2.26		
43.1	3.44E-07	3.69	2.13		
43.6	3.49E-07	3.61	1.99		
44.2	3.32E-07	3.53	1.84		
44.8	3.57E-07	3.45	1.68		
45.3	3.51E-07	3.37	1.51		
45.9	3.60E-07	3.28	1.3		
46.5	3.71E-07	3.19	1.06		
47	3.74E-07	3.1	0.75		
47.6	3.83E-07	3.01	0		
48.2	3.85E-07	2.92			
48.7	3.96E-07	2.82			
49.3	3.94E-07	2.71			
49.9	4.14E-07	2.61			
50.4	4.22E-07	2.5			
51	4.46E-07	2.38			
51.6	4.33E-07	2.26			
52.1	4.41E-07	2.13			

continúa

continúa

52.7	4.45E-07	1.99
53.3	4.67E-07	1.84
53.8	4.53E-07	1.68
54.4	4.67E-07	1.51
55	4.77E-07	1.3
55.5	4.85E-07	1.06
56.1	4.87E-07	0.75
56.7	4.90E-07	0

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a $2.06 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 313.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	$t = 26.7 \text{ s}$ $(t-\tau)^{1/2}/s^{1/2}$	$t = 22.7 \text{ s}$ $(t-\tau)^{1/2}/s^{1/2}$	$t = 17.3 \text{ s}$ $(t-\tau)^{1/2}/s^{1/2}$	$t = 14.7 \text{ s}$ $(t-\tau)^{1/2}/s^{1/2}$	$t = 9.3 \text{ s}$ $(t-\tau)^{1/2}/s^{1/2}$
0	0	5.16	4.76	4.16	3.83	3.06
1.6	2.23E-08	5.01	4.59	3.97	3.61	2.78
1.7	3.38E-08	5.00	4.58	3.95	3.60	2.76
1.9	4.24E-08	4.98	4.56	3.93	3.57	2.73
2.1	5.26E-08	4.96	4.54	3.90	3.54	2.69
2.3	6.46E-08	4.94	4.51	3.88	3.52	2.65
2.4	7.12E-08	4.93	4.50	3.86	3.50	2.63
2.7	8.62E-08	4.90	4.47	3.83	3.46	2.58
2.5	9.92E-08	4.92	4.49	3.85	3.49	2.61
2.9	1.14E-07	4.88	4.45	3.80	3.43	2.54
3.2	1.29E-07	4.84	4.41	3.76	3.39	2.48
3.5	1.47E-07	4.81	4.38	3.72	3.34	2.42
3.7	1.46E-07	4.79	4.36	3.69	3.31	2.37
4	1.71E-07	4.76	4.32	3.65	3.27	2.31
4.1	1.86E-07	4.75	4.31	3.64	3.25	2.29
4.3	1.92E-07	4.73	4.29	3.61	3.22	2.24
4.5	2.08E-07	4.71	4.26	3.58	3.19	2.20
4.8	2.27E-07	4.68	4.23	3.54	3.14	2.13
5.1	2.42E-07	4.64	4.19	3.50	3.09	2.06
5.3	2.58E-07	4.62	4.17	3.47	3.06	2.01
5.6	2.85E-07	4.59	4.13	3.43	3.01	1.93
5.9	2.95E-07	4.56	4.09	3.38	2.96	1.85
6.1	3.19E-07	4.54	4.07	3.35	2.93	1.80
6.3	3.23E-07	4.51	4.05	3.32	2.89	1.74
6.4	3.38E-07	4.50	4.03	3.31	2.88	1.71
6.7	3.40E-07	4.47	4.00	3.26	2.82	1.62
6.9	3.59E-07	4.45	3.97	3.23	2.79	1.56
7.2	3.64E-07	4.41	3.93	3.18	2.73	1.46
7.5	3.94E-07	4.38	3.89	3.14	2.68	1.35
7.7	4.19E-07	4.36	3.87	3.10	2.64	1.28
8	4.22E-07	4.32	3.83	3.06	2.58	1.15
8.3	4.45E-07	4.29	3.79	3.01	2.52	1.02
8.5	4.51E-07	4.26	3.76	2.97	2.48	0.91
8.8	4.71E-07	4.23	3.72	2.92	2.42	0.73
9.1	4.72E-07	4.19	3.68	2.87	2.36	0.48

continúa

continúa						
9.3	4.59E-07	4.17	3.66	2.83	2.32	0.00
9.6	4.92E-07	4.13	3.61	2.78	2.25	
9.9	5.14E-07	4.09	3.57	2.73	2.18	
10.1	5.27E-07	4.07	3.54	2.69	2.14	
10.4	5.35E-07	4.03	3.50	2.63	2.07	
10.7	5.55E-07	4.00	3.46	2.58	1.99	
10.9	5.92E-07	3.97	3.43	2.54	1.94	
11.2	5.95E-07	3.93	3.39	2.48	1.86	
11.5	6.51E-07	3.89	3.34	2.42	1.78	
11.7	6.25E-07	3.87	3.31	2.37	1.72	
12	6.28E-07	3.83	3.27	2.31	1.63	
12.3	6.56E-07	3.79	3.22	2.24	1.54	
12.5	6.28E-07	3.76	3.19	2.20	1.47	
12.8	6.50E-07	3.72	3.14	2.13	1.37	
13.1	6.62E-07	3.68	3.09	2.06	1.25	
13.3	6.96E-07	3.66	3.06	2.01	1.17	
13.6	7.06E-07	3.61	3.01	1.93	1.03	
13.9	7.26E-07	3.57	2.96	1.85	0.88	
14.1	7.06E-07	3.54	2.93	1.80	0.75	
14.4	7.29E-07	3.50	2.88	1.71	0.52	
14.7	7.77E-07	3.46	2.82	1.62	0.00	
14.9	7.58E-07	3.43	2.79	1.56		
15.2	7.77E-07	3.39	2.73	1.46		
15.5	8.00E-07	3.34	2.68	1.35		
15.7	7.84E-07	3.31	2.64	1.28		
16	7.98E-07	3.27	2.58	1.15		
16.3	8.42E-07	3.22	2.52	1.02		
16.5	8.02E-07	3.19	2.48	0.91		
16.8	8.33E-07	3.14	2.42	0.73		
17.1	8.39E-07	3.09	2.36	0.48		
17.3	8.66E-07	3.06	2.32	0.00		
17.6	8.39E-07	3.01	2.25			
17.9	8.54E-07	2.96	2.18			
18.1	8.79E-07	2.93	2.14			
18.4	8.79E-07	2.88	2.07			
18.7	9.23E-07	2.82	1.99			
18.9	9.08E-07	2.79	1.94			
19.2	9.36E-07	2.73	1.86			
19.5	9.34E-07	2.68	1.78			
19.7	9.54E-07	2.64	1.72			
20	9.42E-07	2.58	1.63			
20.3	9.63E-07	2.52	1.54			
20.5	9.56E-07	2.48	1.47			
20.8	9.65E-07	2.42	1.37			

continúa

continúa

21.1	9.44E-07	2.36	1.25
21.3	9.52E-07	2.32	1.17
21.6	1.01E-06	2.25	1.03
21.9	1.01E-06	2.18	0.88
22.1	1.03E-06	2.14	0.75
22.4	1.04E-06	2.07	0.52
22.7	1.02E-06	1.99	0.00
22.9	1.03E-06	1.94	
23.2	1.05E-06	1.86	
23.5	1.02E-06	1.78	
23.7	1.09E-06	1.72	
24	1.08E-06	1.63	
24.3	1.14E-06	1.54	
24.5	1.10E-06	1.47	
24.8	1.23E-06	1.37	
25.1	1.20E-06	1.25	
25.3	1.31E-06	1.17	
25.6	1.34E-06	1.03	
25.9	1.33E-06	0.88	
26.1	1.35E-06	0.75	
26.4	1.33E-06	0.52	
26.7	1.33E-06	0.00	

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a $3.55 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 313.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 40 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 32 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 26 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 20 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 14 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	6.32	5.66	5.10	4.47	3.74
0.4	5.50E-08	6.29	5.62	5.06	4.43	3.69
0.8	8.12E-08	6.26	5.59	5.02	4.38	3.63
1.2	8.69E-08	6.23	5.55	4.98	4.34	3.58
1.6	1.10E-07	6.20	5.51	4.94	4.29	3.52
2	1.52E-07	6.16	5.48	4.90	4.24	3.46
2.4	1.62E-07	6.13	5.44	4.86	4.20	3.41
2.8	1.85E-07	6.10	5.40	4.82	4.15	3.35
3.2	2.30E-07	6.07	5.37	4.77	4.10	3.29
3.6	2.54E-07	6.03	5.33	4.73	4.05	3.22
4	2.77E-07	6.00	5.29	4.69	4.00	3.16
4.4	3.39E-07	5.97	5.25	4.65	3.95	3.10
4.8	3.42E-07	5.93	5.22	4.60	3.90	3.03
5.2	4.00E-07	5.90	5.18	4.56	3.85	2.97
5.6	4.50E-07	5.87	5.14	4.52	3.79	2.90
6	4.52E-07	5.83	5.10	4.47	3.74	2.83
6.4	5.18E-07	5.80	5.06	4.43	3.69	2.76
6.8	5.78E-07	5.76	5.02	4.38	3.63	2.68

continúa

continúa

7.2	5.93E-07	5.73	4.98	4.34	3.58	2.61
7.6	6.32E-07	5.69	4.94	4.29	3.52	2.53
8	6.73E-07	5.66	4.90	4.24	3.46	2.45
8.4	7.07E-07	5.62	4.86	4.20	3.41	2.37
8.8	7.13E-07	5.59	4.82	4.15	3.35	2.28
9.2	7.89E-07	5.55	4.77	4.10	3.29	2.19
9.6	8.23E-07	5.51	4.73	4.05	3.22	2.10
10	8.61E-07	5.48	4.69	4.00	3.16	2.00
10.4	8.56E-07	5.44	4.65	3.95	3.10	1.90
10.8	9.16E-07	5.40	4.60	3.90	3.03	1.79
11.2	9.52E-07	5.37	4.56	3.85	2.97	1.67
11.6	1.01E-06	5.33	4.52	3.79	2.90	1.55
12	1.03E-06	5.29	4.47	3.74	2.83	1.41
12.4	1.06E-06	5.25	4.43	3.69	2.76	1.26
12.8	1.08E-06	5.22	4.38	3.63	2.68	1.10
13.2	1.15E-06	5.18	4.34	3.58	2.61	0.89
13.6	1.16E-06	5.14	4.29	3.52	2.53	0.63
14	1.17E-06	5.10	4.24	3.46	2.45	0.00
14.4	1.21E-06	5.06	4.20	3.41	2.37	
14.8	1.31E-06	5.02	4.15	3.35	2.28	
15.2	1.32E-06	4.98	4.10	3.29	2.19	
15.6	1.35E-06	4.94	4.05	3.22	2.10	
16	1.35E-06	4.90	4.00	3.16	2.00	
16.4	1.38E-06	4.86	3.95	3.10	1.90	
16.8	1.49E-06	4.82	3.90	3.03	1.79	
17.2	1.41E-06	4.77	3.85	2.97	1.67	
17.6	1.42E-06	4.73	3.79	2.90	1.55	
18	1.44E-06	4.69	3.74	2.83	1.41	
18.4	1.48E-06	4.65	3.69	2.76	1.26	
18.8	1.51E-06	4.60	3.63	2.68	1.10	
19.2	1.51E-06	4.56	3.58	2.61	0.89	
19.6	1.50E-06	4.52	3.52	2.53	0.63	
20	1.49E-06	4.47	3.46	2.45	0.00	
20.4	1.56E-06	4.43	3.41	2.37		
20.8	1.55E-06	4.38	3.35	2.28		
21.2	1.55E-06	4.34	3.29	2.19		
21.6	1.60E-06	4.29	3.22	2.10		
22	1.59E-06	4.24	3.16	2.00		
22.4	1.62E-06	4.20	3.10	1.90		
22.8	1.59E-06	4.15	3.03	1.79		
23.2	1.63E-06	4.10	2.97	1.67		
23.6	1.67E-06	4.05	2.90	1.55		
24	1.64E-06	4.00	2.83	1.41		
24.4	1.73E-06	3.95	2.76	1.26		
24.8	1.77E-06	3.90	2.68	1.10		
25.2	1.68E-06	3.85	2.61	0.89		
25.6	1.71E-06	3.79	2.53	0.63		

continúa

continúa

26	1.73E-06	3.74	2.45	0.00
26.4	1.74E-06	3.69	2.37	
26.8	1.69E-06	3.63	2.28	
27.2	1.76E-06	3.58	2.19	
27.6	1.73E-06	3.52	2.10	
28	1.77E-06	3.46	2.00	
28.4	1.79E-06	3.41	1.90	
28.8	1.80E-06	3.35	1.79	
29.2	1.84E-06	3.29	1.67	
29.6	1.82E-06	3.22	1.55	
30	1.83E-06	3.16	1.41	
30.4	1.82E-06	3.10	1.26	
30.8	1.75E-06	3.03	1.10	
31.2	1.85E-06	2.97	0.89	
31.6	1.85E-06	2.90	0.63	
32	1.85E-06	2.83	0.00	
32.4	1.86E-06	2.76		
32.8	1.79E-06	2.68		
33.2	1.87E-06	2.61		
33.6	1.92E-06	2.53		
34	1.92E-06	2.45		
34.4	1.87E-06	2.37		
34.8	1.93E-06	2.28		
35.2	1.92E-06	2.19		
35.6	1.91E-06	2.10		
36	1.96E-06	2.00		
36.4	1.89E-06	1.90		
36.8	1.85E-06	1.79		
37.2	1.90E-06	1.67		
37.6	1.95E-06	1.55		
38	1.93E-06	1.41		
38.4	1.89E-06	1.26		
38.8	1.96E-06	1.10		
39.2	1.91E-06	0.89		
39.6	1.95E-06	0.63		
40	1.99E-06	0.00		

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a $1.27 \times 10^{-7} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 249 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 201 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 150 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 99 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 60 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	15.78	14.18	12.25	9.95	7.75
9	4.86E-11	15.49	13.86	11.87	9.49	7.14
15	1.37E-09	15.30	13.64	11.62	9.17	6.71
21	1.65E-09	15.10	13.42	11.36	8.83	6.24
24	1.98E-09	15.00	13.30	11.22	8.66	6.00
30	2.40E-09	14.80	13.08	10.95	8.31	5.48
36	3.11E-09	14.59	12.85	10.68	7.94	4.90
42	3.35E-09	14.39	12.61	10.39	7.55	4.24
48	4.30E-09	14.18	12.37	10.10	7.14	3.46
51	5.74E-09	14.07	12.25	9.95	6.93	3.00
54	6.20E-09	13.96	12.12	9.80	6.71	2.45
57	5.99E-09	13.86	12.00	9.64	6.48	1.73
60	6.06E-09	13.75	11.87	9.49	6.24	0.00
66	7.28E-09	13.53	11.62	9.17	5.74	
69	7.04E-09	13.42	11.49	9.00	5.48	
72	7.00E-09	13.30	11.36	8.83	5.20	
75	9.56E-09	13.19	11.22	8.66	4.90	
78	9.56E-09	13.08	11.09	8.49	4.58	
81	8.86E-09	12.96	10.95	8.31	4.24	
84	1.02E-08	12.85	10.82	8.12	3.87	
87	1.10E-08	12.73	10.68	7.94	3.46	
93	1.10E-08	12.49	10.39	7.55	2.45	
96	1.17E-08	12.37	10.25	7.35	1.73	
99	1.14E-08	12.25	10.10	7.14	0.00	
102	1.30E-08	12.12	9.95	6.93		
111	1.45E-08	11.75	9.49	6.24		
114	1.60E-08	11.62	9.33	6.00		
117	1.64E-08	11.49	9.17	5.74		
126	1.70E-08	11.09	8.66	4.90		
132	1.78E-08	10.82	8.31	4.24		
144	2.11E-08	10.25	7.55	2.45		
147	2.31E-08	10.10	7.35	1.73		
150	2.34E-08	9.95	7.14	0.00		
162	2.30E-08	9.33	6.24			
165	2.48E-08	9.17	6.00			
168	2.68E-08	9.00	5.74			
177	2.42E-08	8.49	4.90			
180	2.38E-08	8.31	4.58			
183	2.72E-08	8.12	4.24			
186	2.69E-08	7.94	3.87			
189	2.53E-08	7.75	3.46			
192	2.62E-08	7.55	3.00			

continúa

continúa

195	2.59E-08	7.35	2.45
198	2.71E-08	7.14	1.73
201	2.95E-08	6.93	0.00
207	3.00E-08	6.48	
213	3.07E-08	6.00	
216	2.98E-08	5.74	
219	3.16E-08	5.48	
222	3.25E-08	5.20	
225	3.16E-08	4.90	
228	3.08E-08	4.58	
231	3.20E-08	4.24	
237	3.25E-08	3.46	
249	3.17E-08	0.00	

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a $2.55 \times 10^{-7} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 204 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 150 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 120 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 90 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 60 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	14.28	12.25	10.95	9.49	7.75
3	2.26E-09	14.18	12.12	10.82	9.33	7.55
6	4.24E-09	14.07	12.00	10.68	9.17	7.35
9	7.04E-09	13.96	11.87	10.54	9.00	7.14
12	9.00E-09	13.86	11.75	10.39	8.83	6.93
15	1.16E-08	13.75	11.62	10.25	8.66	6.71
18	1.29E-08	13.64	11.49	10.10	8.49	6.48
21	1.67E-08	13.53	11.36	9.95	8.31	6.24
24	1.82E-08	13.42	11.22	9.80	8.12	6.00
27	2.08E-08	13.30	11.09	9.64	7.94	5.74
30	2.22E-08	13.19	10.95	9.49	7.75	5.48
33	2.43E-08	13.08	10.82	9.33	7.55	5.20
36	2.64E-08	12.96	10.68	9.17	7.35	4.90
39	3.09E-08	12.85	10.54	9.00	7.14	4.58
42	2.68E-08	12.73	10.39	8.83	6.93	4.24
45	3.16E-08	12.61	10.25	8.66	6.71	3.87
51	3.27E-08	12.37	9.95	8.31	6.24	3.00
54	3.17E-08	12.25	9.80	8.12	6.00	2.45
57	3.44E-08	12.12	9.64	7.94	5.74	1.73
60	3.75E-08	12.00	9.49	7.75	5.48	0.00
63	3.90E-08	11.87	9.33	7.55	5.20	
66	4.27E-08	11.75	9.17	7.35	4.90	
69	4.16E-08	11.62	9.00	7.14	4.58	
72	4.27E-08	11.49	8.83	6.93	4.24	
75	4.48E-08	11.36	8.66	6.71	3.87	
78	4.61E-08	11.22	8.49	6.48	3.46	

continúa

continúa

81	4.53E-08	11.09	8.31	6.24	3.00
84	4.51E-08	10.95	8.12	6.00	2.45
87	4.61E-08	10.82	7.94	5.74	1.73
90	4.68E-08	10.68	7.75	5.48	0.00
93	4.63E-08	10.54	7.55	5.20	
96	4.56E-08	10.39	7.35	4.90	
99	4.59E-08	10.25	7.14	4.58	
105	4.89E-08	9.95	6.71	3.87	
108	5.01E-08	9.80	6.48	3.46	
111	4.78E-08	9.64	6.24	3.00	
120	5.29E-08	9.17	5.48	0.00	
123	4.92E-08	9.00	5.20		
126	5.33E-08	8.83	4.90		
129	5.61E-08	8.66	4.58		
132	5.14E-08	8.49	4.24		
135	5.47E-08	8.31	3.87		
138	5.69E-08	8.12	3.46		
141	5.49E-08	7.94	3.00		
144	5.75E-08	7.75	2.45		
147	5.63E-08	7.55	1.73		
150	5.63E-08	7.35	0.00		
156	5.83E-08	6.93			
159	5.69E-08	6.71			
162	5.79E-08	6.48			
165	6.52E-08	6.24			
168	5.92E-08	6.00			
171	6.49E-08	5.74			
174	6.18E-08	5.48			
180	6.33E-08	4.90			
189	6.63E-08	3.87			
198	6.66E-08	2.45			
200	6.68E-08	2.00			
202	6.75E-08	1.41			
204	6.92E-08	0.00			

Concentración del substrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a $1.16 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 104 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 100 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 70 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 40 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 30 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	14.07	10.00	8.37	6.32	5.48
2	9.09E-09	14.00	9.90	8.25	6.16	5.29
4	1.41E-08	13.93	9.80	8.12	6.00	5.10
6	1.96E-08	13.86	9.70	8.00	5.83	4.90

continúa

continúa

8	2.13E-08	13.78	9.59	7.87	5.66	4.69
10	2.66E-08	13.71	9.49	7.75	5.48	4.47
12	3.25E-08	13.64	9.38	7.62	5.29	4.24
14	4.05E-08	13.56	9.27	7.48	5.10	4.00
16	4.89E-08	13.49	9.17	7.35	4.90	3.74
18	5.07E-08	13.42	9.06	7.21	4.69	3.46
20	5.53E-08	13.34	8.94	7.07	4.47	3.16
22	6.31E-08	13.27	8.83	6.93	4.24	2.83
24	6.45E-08	13.19	8.72	6.78	4.00	2.45
26	7.75E-08	13.11	8.60	6.63	3.74	2.00
28	9.17E-08	13.04	8.49	6.48	3.46	1.41
30	9.50E-08	12.96	8.37	6.32	3.16	0.00
32	1.03E-07	12.88	8.25	6.16	2.83	
34	1.12E-07	12.81	8.12	6.00	2.45	
36	1.15E-07	12.73	8.00	5.83	2.00	
38	1.27E-07	12.65	7.87	5.66	1.41	
40	1.29E-07	12.57	7.75	5.48	0.00	
42	1.48E-07	12.49	7.62	5.29		
44	1.53E-07	12.41	7.48	5.10		
46	1.72E-07	12.33	7.35	4.90		
48	1.81E-07	12.25	7.21	4.69		
50	1.68E-07	12.17	7.07	4.47		
52	1.84E-07	12.08	6.93	4.24		
54	2.12E-07	12.00	6.78	4.00		
56	2.19E-07	11.92	6.63	3.74		
58	2.23E-07	11.83	6.48	3.46		
60	2.52E-07	11.75	6.32	3.16		
62	2.30E-07	11.66	6.16	2.83		
64	2.72E-07	11.58	6.00	2.45		
66	2.99E-07	11.49	5.83	2.00		
68	3.01E-07	11.40	5.66	1.41		
70	3.22E-07	11.31	5.48	0.00		
72	3.31E-07	11.22	5.29			
74	3.81E-07	11.14	5.10			
76	3.98E-07	11.05	4.90			
78	4.06E-07	10.95	4.69			
80	4.04E-07	10.86	4.47			
82	4.12E-07	10.77	4.24			
84	4.08E-07	10.68	4.00			
86	4.25E-07	10.58	3.74			
88	4.59E-07	10.49	3.46			
90	4.64E-07	10.39	3.16			
92	4.50E-07	10.30	2.83			
94	4.75E-07	10.20	2.45			
96	4.56E-07	10.10	2.00			
98	4.89E-07	10.00	1.41			

continúa

continúa

100	4.84E-07	9.90	0.00
102	5.23E-07	9.80	
104	4.81E-07	9.70	
106	5.50E-07	9.59	
108	5.48E-07	9.49	
110	5.30E-07	9.38	
112	5.34E-07	9.27	
116	5.30E-07	9.06	
118	5.61E-07	8.94	
120	5.57E-07	8.83	
122	5.63E-07	8.72	
128	5.59E-07	8.37	
130	5.76E-07	8.25	
132	6.02E-07	8.12	
138	6.04E-07	7.75	
148	6.63E-07	7.07	
150	6.92E-07	6.93	
198	5.92E-07	0.00	

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a 2.93×10^{-6} mol cm^{-3} y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 50 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 40 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 30 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 25 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 18 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	7.07	6.32	5.48	5.00	4.24
0.5	7.38E-08	7.04	6.28	5.43	4.95	4.18
1	1.95E-07	7.00	6.24	5.39	4.90	4.12
1.5	3.58E-07	6.96	6.20	5.34	4.85	4.06
2	6.02E-07	6.93	6.16	5.29	4.80	4.00
2.5	8.34E-07	6.89	6.12	5.24	4.74	3.94
3	1.03E-06	6.86	6.08	5.20	4.69	3.87
3.5	1.26E-06	6.82	6.04	5.15	4.64	3.81
4	1.41E-06	6.78	6.00	5.10	4.58	3.74
4.5	1.93E-06	6.75	5.96	5.05	4.53	3.67
5	1.67E-06	6.71	5.92	5.00	4.47	3.61
5.5	2.11E-06	6.67	5.87	4.95	4.42	3.54
6	2.28E-06	6.63	5.83	4.90	4.36	3.46
6.5	2.31E-06	6.60	5.79	4.85	4.30	3.39
7	2.46E-06	6.56	5.74	4.80	4.24	3.32
7.5	2.58E-06	6.52	5.70	4.74	4.18	3.24
8	2.49E-06	6.48	5.66	4.69	4.12	3.16
8.5	2.52E-06	6.44	5.61	4.64	4.06	3.08
9	2.59E-06	6.40	5.57	4.58	4.00	3.00
9.5	2.50E-06	6.36	5.52	4.53	3.94	2.92
10	2.58E-06	6.32	5.48	4.47	3.87	2.83
10.5	2.71E-06	6.28	5.43	4.42	3.81	2.74
11	2.82E-06	6.24	5.39	4.36	3.74	2.65

continúa

continúa

11.5	2.75E-06	6.20	5.34	4.30	3.67	2.55
12	3.23E-06	6.16	5.29	4.24	3.61	2.45
12.5	3.18E-06	6.12	5.24	4.18	3.54	2.35
13	3.07E-06	6.08	5.20	4.12	3.46	2.24
13.5	2.71E-06	6.04	5.15	4.06	3.39	2.12
14	2.70E-06	6.00	5.10	4.00	3.32	2.00
14.5	2.82E-06	5.96	5.05	3.94	3.24	1.87
15	2.75E-06	5.92	5.00	3.87	3.16	1.73
15.5	2.89E-06	5.87	4.95	3.81	3.08	1.58
16	3.03E-06	5.83	4.90	3.74	3.00	1.41
16.5	3.02E-06	5.79	4.85	3.67	2.92	1.22
17	2.95E-06	5.74	4.80	3.61	2.83	1.00
17.5	3.10E-06	5.70	4.74	3.54	2.74	0.71
18	3.01E-06	5.66	4.69	3.46	2.65	0.00
18.5	2.81E-06	5.61	4.64	3.39	2.55	
19	2.93E-06	5.57	4.58	3.32	2.45	
19.5	2.93E-06	5.52	4.53	3.24	2.35	
20	2.94E-06	5.48	4.47	3.16	2.24	
20.5	2.82E-06	5.43	4.42	3.08	2.12	
21	2.87E-06	5.39	4.36	3.00	2.00	
21.5	3.03E-06	5.34	4.30	2.92	1.87	
22	3.06E-06	5.29	4.24	2.83	1.73	
22.5	3.07E-06	5.24	4.18	2.74	1.58	
23	2.90E-06	5.20	4.12	2.65	1.41	
23.5	2.84E-06	5.15	4.06	2.55	1.22	
24	2.87E-06	5.10	4.00	2.45	1.00	
24.5	2.90E-06	5.05	3.94	2.35	0.71	
25	2.87E-06	5.00	3.87	2.24	0.00	
25.5	2.88E-06	4.95	3.81	2.12		
26	2.78E-06	4.90	3.74	2.00		
26.5	2.77E-06	4.85	3.67	1.87		
27	2.87E-06	4.80	3.61	1.73		
27.5	2.85E-06	4.74	3.54	1.58		
28	3.10E-06	4.69	3.46	1.41		
28.5	2.99E-06	4.64	3.39	1.22		
29	2.90E-06	4.58	3.32	1.00		
29.5	2.94E-06	4.53	3.24	0.71		
30	2.87E-06	4.47	3.16	0.00		
30.5	2.86E-06	4.42	3.08			
31	2.79E-06	4.36	3.00			
31.5	2.85E-06	4.30	2.92			
32	3.03E-06	4.24	2.83			
32.5	2.95E-06	4.18	2.74			
33	2.82E-06	4.12	2.65			
33.5	2.95E-06	4.06	2.55			
34	3.10E-06	4.00	2.45			

continúa

continúa

34.5	3.00E-06	3.94	2.35
35	2.97E-06	3.87	2.24
35.5	2.78E-06	3.81	2.12
36	2.92E-06	3.74	2.00
36.5	3.18E-06	3.67	1.87
37	3.06E-06	3.61	1.73
37.5	3.02E-06	3.54	1.58
38	3.11E-06	3.46	1.41
38.5	2.94E-06	3.39	1.22
39	3.13E-06	3.32	1.00
39.5	3.07E-06	3.24	0.71
40	3.11E-06	3.16	0.00
40.5	3.04E-06	3.08	
41	3.33E-06	3.00	
41.5	3.28E-06	2.92	
42	2.97E-06	2.83	
42.5	2.78E-06	2.74	
43	3.05E-06	2.65	
43.5	3.45E-06	2.55	
44	3.32E-06	2.45	
44.5	2.92E-06	2.35	
45	3.27E-06	2.24	
45.5	3.23E-06	2.12	
46	3.06E-06	2.00	
46.5	3.18E-06	1.87	
47	3.17E-06	1.73	
47.5	3.21E-06	1.58	
48	3.19E-06	1.41	
48.5	3.38E-06	1.22	
49	3.23E-06	1.00	
49.5	3.14E-06	0.71	
50	3.31E-06	0.00	

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, a $3.55 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 50 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 40 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 35.5 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 28 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 17.5 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	7.07	6.32	5.96	5.29	4.24
0.5	4.22E-08	7.04	6.28	5.92	5.24	4.18
1	9.33E-08	7.00	6.24	5.87	5.20	4.12
1.5	1.71E-07	6.96	6.20	5.83	5.15	4.06
2	2.83E-07	6.93	6.16	5.79	5.10	4.00
2.5	3.90E-07	6.89	6.12	5.74	5.05	3.94

continúa

continúa

3	5.37E-07	6.86	6.08	5.70	5.00	3.87
3.5	6.24E-07	6.82	6.04	5.66	4.95	3.81
4	7.02E-07	6.78	6.00	5.61	4.90	3.74
4.5	8.43E-07	6.75	5.96	5.57	4.85	3.67
5	8.57E-07	6.71	5.92	5.52	4.80	3.61
5.5	9.56E-07	6.67	5.87	5.48	4.74	3.54
6	1.04E-06	6.63	5.83	5.43	4.69	3.46
6.5	1.08E-06	6.60	5.79	5.39	4.64	3.39
7	1.14E-06	6.56	5.74	5.34	4.58	3.32
7.5	1.25E-06	6.52	5.70	5.29	4.53	3.24
8	1.30E-06	6.48	5.66	5.24	4.47	3.16
8.5	1.43E-06	6.44	5.61	5.20	4.42	3.08
9	1.47E-06	6.40	5.57	5.15	4.36	3.00
9.5	1.63E-06	6.36	5.52	5.10	4.30	2.92
10	1.68E-06	6.32	5.48	5.05	4.24	2.83
10.5	1.53E-06	6.28	5.43	5.00	4.18	2.74
11	1.77E-06	6.24	5.39	4.95	4.12	2.65
11.5	1.71E-06	6.20	5.34	4.90	4.06	2.55
12	1.81E-06	6.16	5.29	4.85	4.00	2.45
12.5	1.98E-06	6.12	5.24	4.80	3.94	2.35
13	1.92E-06	6.08	5.20	4.74	3.87	2.24
13.5	1.94E-06	6.04	5.15	4.69	3.81	2.12
14	1.99E-06	6.00	5.10	4.64	3.74	2.00
14.5	2.05E-06	5.96	5.05	4.58	3.67	1.87
15	2.03E-06	5.92	5.00	4.53	3.61	1.73
15.5	2.08E-06	5.87	4.95	4.47	3.54	1.58
16	2.03E-06	5.83	4.90	4.42	3.46	1.41
16.5	2.08E-06	5.79	4.85	4.36	3.39	1.22
17	2.10E-06	5.74	4.80	4.30	3.32	1.00
17.5	2.19E-06	5.70	4.74	4.24	3.24	0.71
18	2.12E-06	5.66	4.69	4.18	3.16	0.00
18.5	2.14E-06	5.61	4.64	4.12	3.08	
19	2.38E-06	5.57	4.58	4.06	3.00	
19.5	2.27E-06	5.52	4.53	4.00	2.92	
20	2.13E-06	5.48	4.47	3.94	2.83	
20.5	2.19E-06	5.43	4.42	3.87	2.74	
21	2.23E-06	5.39	4.36	3.81	2.65	
21.5	2.48E-06	5.34	4.30	3.74	2.55	
22	2.34E-06	5.29	4.24	3.67	2.45	
22.5	2.14E-06	5.24	4.18	3.61	2.35	
23	2.20E-06	5.20	4.12	3.54	2.24	
23.5	2.35E-06	5.15	4.06	3.46	2.12	
24	2.34E-06	5.10	4.00	3.39	2.00	
24.5	2.51E-06	5.05	3.94	3.32	1.87	
25	2.42E-06	5.00	3.87	3.24	1.73	
25.5	2.38E-06	4.95	3.81	3.16	1.58	
26	2.44E-06	4.90	3.74	3.08	1.41	
26.5	2.43E-06	4.85	3.67	3.00	1.22	
27	2.50E-06	4.80	3.61	2.92	1.00	

continúa

continúa

27.5	2.42E-06	4.74	3.54	2.83	0.71
28	2.65E-06	4.69	3.46	2.74	0.00
28.5	2.53E-06	4.64	3.39	2.65	
29	2.46E-06	4.58	3.32	2.55	
29.5	2.49E-06	4.53	3.24	2.45	
30	2.46E-06	4.47	3.16	2.35	
30.5	2.51E-06	4.42	3.08	2.24	
31	2.57E-06	4.36	3.00	2.12	
31.5	2.52E-06	4.30	2.92	2.00	
32	2.63E-06	4.24	2.83	1.87	
32.5	2.71E-06	4.18	2.74	1.73	
33	2.61E-06	4.12	2.65	1.58	
33.5	2.74E-06	4.06	2.55	1.41	
34	2.70E-06	4.00	2.45	1.22	
34.5	2.70E-06	3.94	2.35	1.00	
35	2.77E-06	3.87	2.24	0.71	
35.5	2.81E-06	3.81	2.12	0.00	
36	2.56E-06	3.74	2.00		
36.5	2.75E-06	3.67	1.87		
37	2.80E-06	3.61	1.73		
37.5	2.77E-06	3.54	1.58		
38	2.70E-06	3.46	1.41		
38.5	2.64E-06	3.39	1.22		
39	2.79E-06	3.32	1.00		
39.5	2.66E-06	3.24	0.71		
40	2.46E-06	3.16	0.00		
40.5	2.55E-06	3.08			
41	2.53E-06	3.00			
41.5	2.83E-06	2.92			
42	2.80E-06	2.83			
42.5	2.70E-06	2.74			
43	2.72E-06	2.65			
43.5	2.84E-06	2.55			
44	2.78E-06	2.45			
44.5	2.82E-06	2.35			
45	2.84E-06	2.24			
45.5	2.82E-06	2.12			
46	2.89E-06	2.00			
46.5	2.70E-06	1.87			
47	2.84E-06	1.73			
47.5	2.92E-06	1.58			
48	3.17E-06	1.41			
48.5	2.78E-06	1.22			
49	2.67E-06	1.00			

continúa

continúa

49.5	2.93E-06	0.71
50	3.31E-06	0.00

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.03 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 313.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 30 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 24 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 18 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 14 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 12 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	5.5	4.9	4.2	3.7	3.5
2	4.87E-09	5.3	4.7	4.0	3.5	3.2
4	2.50E-08	5.1	4.5	3.7	3.2	2.8
6	6.41E-08	4.9	4.2	3.5	2.8	2.4
8	1.12E-07	4.7	4.0	3.2	2.4	2.0
10	1.74E-07	4.5	3.7	2.8	2.0	1.4
12	2.59E-07	4.2	3.5	2.4	1.4	0.0
14	3.69E-07	4.0	3.2	2.0	0.0	
16	4.88E-07	3.7	2.8	1.4		
18	5.70E-07	3.5	2.4	0.0		
20	6.80E-07	3.2	2.0			
22	1.01E-06	2.8	1.4			
24	1.06E-06	2.4	0.0			
26	1.30E-06	2.0				
28	1.30E-06	1.4				
30	1.36E-06	0.0				

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.16 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 313.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 50 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 44 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 38 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 30 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 20 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	7.1	6.6	6.2	5.5	4.5
2	3.30E-09	6.9	6.5	6.0	5.3	4.2
4	1.39E-08	6.8	6.3	5.8	5.1	4.0
6	3.26E-08	6.6	6.2	5.7	4.9	3.7
8	5.49E-08	6.5	6.0	5.5	4.7	3.5
10	7.70E-08	6.3	5.8	5.3	4.5	3.2
12	9.32E-08	6.2	5.7	5.1	4.2	2.8
14	1.13E-07	6.0	5.5	4.9	4.0	2.4
16	1.55E-07	5.8	5.3	4.7	3.7	2.0
18	1.78E-07	5.7	5.1	4.5	3.5	1.4
20	1.64E-07	5.5	4.9	4.2	3.2	0.0
22	2.41E-07	5.3	4.7	4.0	2.8	
24	2.71E-07	5.1	4.5	3.7	2.4	
26	3.11E-07	4.9	4.2	3.5	2.0	
28	2.91E-07	4.7	4.0	3.2	1.4	
30	3.18E-07	4.5	3.7	2.8	0.0	
32	3.58E-07	4.2	3.5	2.4		
34	3.58E-07	4.0	3.2	2.0		

continúa

continúa

36	4.03E-07	3.7	2.8	1.4
38	4.50E-07	3.5	2.4	0.0
40	5.37E-07	3.2	2.0	
42	5.73E-07	2.8	1.4	
44	4.77E-07	2.4	0.0	
46	5.57E-07	2.0		
48	5.49E-07	1.4		
50	6.99E-07	0.0		

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.30 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 313.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 50 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 40 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 36 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 32 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 26 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	7.1	6.3	6.0	5.7	5.1
2	1.27E-08	6.9	6.2	5.8	5.5	4.9
4	3.58E-08	6.8	6.0	5.7	5.3	4.7
6	8.35E-08	6.6	5.8	5.5	5.1	4.5
8	1.18E-07	6.5	5.7	5.3	4.9	4.2
10	1.42E-07	6.3	5.5	5.1	4.7	4.0
12	2.06E-07	6.2	5.3	4.9	4.5	3.7
14	2.14E-07	6.0	5.1	4.7	4.2	3.5
16	2.52E-07	5.8	4.9	4.5	4.0	3.2
18	2.41E-07	5.7	4.7	4.2	3.7	2.8
20	3.33E-07	5.5	4.5	4.0	3.5	2.4
22	3.25E-07	5.3	4.2	3.7	3.2	2.0
24	3.48E-07	5.1	4.0	3.5	2.8	1.4
26	4.15E-07	4.9	3.7	3.2	2.4	0.0
28	3.80E-07	4.7	3.5	2.8	2.0	
30	4.15E-07	4.5	3.2	2.4	1.4	
32	4.50E-07	4.2	2.8	2.0	0.0	
34	4.81E-07	4.0	2.4	1.4		
36	4.53E-07	3.7	2.0	0.0		
38	4.99E-07	3.5	1.4			
40	4.84E-07	3.2	0.0			
42	4.81E-07	2.8				
44	5.82E-07	2.4				
46	5.37E-07	2.0				
48	6.13E-07	1.4				
50	5.65E-07	0.0				

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.47 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 313.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 186 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 140 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 110 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 90 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 70 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	7.07	6.3	6.0	5.7	5.1
2	1.58E-08	6.93	6.2	5.8	5.5	4.9
4	6.04E-08	6.78	6.0	5.7	5.3	4.7

continúa

continúa

6	8.73E-08	6.63	5.8	5.5	5.1	4.5
8	1.65E-07	6.48	5.7	5.3	4.9	4.2
10	2.06E-07	6.32	5.5	5.1	4.7	4.0
12	2.75E-07	6.16	5.3	4.9	4.5	3.7
14	3.02E-07	6.00	5.1	4.7	4.2	3.5
16	3.33E-07	5.83	4.9	4.5	4.0	3.2
18	3.91E-07	5.66	4.7	4.2	3.7	2.8
20	4.06E-07	5.48	4.5	4.0	3.5	2.4
22	4.30E-07	5.29	4.2	3.7	3.2	2.0
24	4.99E-07	5.10	4.0	3.5	2.8	1.4
26	5.17E-07	4.90	3.7	3.2	2.4	0.0
28	5.17E-07	4.69	3.5	2.8	2.0	
30	5.53E-07	4.47	3.2	2.4	1.4	
32	6.99E-07	4.24	2.8	2.0	0.0	
34	6.54E-07	4.00	2.4	1.4		
36	5.90E-07	3.74	2.0	0.0		
38	6.31E-07	3.46	1.4			
40	6.50E-07	3.16	0.0			
42	7.53E-07	2.83				
44	7.47E-07	2.45				
46	8.72E-07	2.00				
48	8.40E-07	1.41				
50	8.10E-07	0.00				

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.03 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 10.1 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 8.8 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 8 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 7.2 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 6.4 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	3.2	3.0	2.83	2.68	2.53
0.5	4.98E-17	3.1	2.9	2.73	2.58	2.42
0.8	9.29E-16	3.1	2.8	2.68	2.53	2.37
1.1	3.32E-15	3.0	2.8	2.63	2.48	2.31
1.3	1.13E-14	3.0	2.7	2.58	2.42	2.25
1.6	5.75E-14	2.9	2.7	2.53	2.37	2.19
1.9	1.56E-13	2.9	2.6	2.48	2.31	2.13
2.1	2.45E-13	2.8	2.6	2.42	2.25	2.07
2.4	1.04E-12	2.8	2.5	2.37	2.19	2.00
2.7	1.90E-12	2.7	2.5	2.31	2.13	1.93
2.9	4.80E-12	2.7	2.4	2.25	2.07	1.86
3.2	7.91E-12	2.6	2.4	2.19	2.00	1.79
3.5	1.44E-11	2.6	2.3	2.13	1.93	1.71
3.7	2.38E-11	2.5	2.3	2.07	1.86	1.63
4.0	4.22E-11	2.5	2.2	2.00	1.79	1.55
4.3	1.07E-10	2.4	2.1	1.93	1.71	1.46
4.5	1.24E-10	2.4	2.1	1.86	1.63	1.37
4.8	2.82E-10	2.3	2.0	1.79	1.55	1.26
5.1	2.37E-10	2.3	1.9	1.71	1.46	1.15
5.3	1.89E-10	2.2	1.9	1.63	1.37	1.03
5.6	7.49E-10	2.1	1.8	1.55	1.26	0.89
5.9	1.04E-09	2.1	1.7	1.46	1.15	0.73

continúa

continúa

6.1	4.43E-10	2.0	1.6	1.37	1.03	0.52
6.4	1.33E-09	1.9	1.5	1.26	0.89	0.00
6.7	1.15E-09	1.9	1.5	1.15	0.73	
6.9	1.23E-09	1.8	1.4	1.03	0.52	
7.2	2.75E-09	1.7	1.3	0.89	0.00	
7.5	2.31E-09	1.6	1.2	0.73		
7.7	3.71E-09	1.5	1.0	0.52		
8.0	2.68E-09	1.5	0.9	0.00		
8.3	4.20E-09	1.4	0.7			
8.5	4.42E-09	1.3	0.5			
8.8	4.20E-09	1.2	0.0			
9.1	7.28E-09	1.0				
9.3	2.96E-09	0.9				
9.6	9.59E-09	0.7				
9.9	6.27E-09	0.5				
10.1	6.93E-09	0.0				

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.16 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 30 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 28 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 25 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 23 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 20 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	5.48	5.29	5.00	4.80	4.47
1	3.57E-14	5.39	5.20	4.90	4.69	4.36
2	8.99E-13	5.29	5.10	4.80	4.58	4.24
3	4.13E-12	5.20	5.00	4.69	4.47	4.12
4	2.15E-11	5.10	4.90	4.58	4.36	4.00
5	4.55E-11	5.00	4.80	4.47	4.24	3.87
6	1.18E-10	4.90	4.69	4.36	4.12	3.74
7	3.20E-10	4.80	4.58	4.24	4.00	3.61
8	4.66E-10	4.69	4.47	4.12	3.87	3.46
9	6.95E-10	4.58	4.36	4.00	3.74	3.32
10	8.07E-10	4.47	4.24	3.87	3.61	3.16
11	1.36E-09	4.36	4.12	3.74	3.46	3.00
12	1.89E-09	4.24	4.00	3.61	3.32	2.83
13	1.84E-09	4.12	3.87	3.46	3.16	2.65
14	3.71E-09	4.00	3.74	3.32	3.00	2.45
15	3.90E-09	3.87	3.61	3.16	2.83	2.24
16	4.53E-09	3.74	3.46	3.00	2.65	2.00
17	6.59E-09	3.61	3.32	2.83	2.45	1.73
18	7.85E-09	3.46	3.16	2.65	2.24	1.41
19	8.90E-09	3.32	3.00	2.45	2.00	1.00
20	1.11E-08	3.16	2.83	2.24	1.73	0.00
21	1.26E-08	3.00	2.65	2.00	1.41	
22	1.40E-08	2.83	2.45	1.73	1.00	
23	1.93E-08	2.65	2.24	1.41	0.00	
24	1.98E-08	2.45	2.00	1.00		
25	2.19E-08	2.24	1.73	0.00		
26	1.93E-08	2.00	1.41			
27	3.35E-08	1.73	1.00			

continúa

continúa

28	2.36E-08	1.41	0.00
29	2.74E-08	1.00	
30	4.30E-08	0.00	

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.30 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 40.5 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 36 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 30 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 27 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 21 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	6.36	6.00	5.48	5.20	4.58
1.5	4.80E-12	6.24	5.87	5.34	5.05	4.42
3	4.12E-11	6.12	5.74	5.20	4.90	4.24
4.5	4.21E-10	6.00	5.61	5.05	4.74	4.06
6	9.86E-10	5.87	5.48	4.90	4.58	3.87
7.5	1.40E-09	5.74	5.34	4.74	4.42	3.67
9	2.82E-09	5.61	5.20	4.58	4.24	3.46
10.5	5.13E-09	5.48	5.05	4.42	4.06	3.24
12	7.66E-09	5.34	4.90	4.24	3.87	3.00
13.5	1.11E-08	5.20	4.74	4.06	3.67	2.74
16.5	2.13E-08	4.90	4.42	3.67	3.24	2.12
18	2.30E-08	4.74	4.24	3.46	3.00	1.73
19.5	3.18E-08	4.58	4.06	3.24	2.74	1.22
21	3.03E-08	4.42	3.87	3.00	2.45	0.00
22.5	3.43E-08	4.24	3.67	2.74	2.12	
24	3.52E-08	4.06	3.46	2.45	1.73	
25.5	4.63E-08	3.87	3.24	2.12	1.22	
27	8.23E-08	3.67	3.00	1.73	0.00	
28.5	9.33E-08	3.46	2.74	1.22		
30	1.11E-07	3.24	2.45	0.00		
31.5	1.32E-07	3.00	2.12			
33	1.11E-07	2.74	1.73			
34.5	1.50E-07	2.45	1.22			
36	1.83E-07	2.12	0.00			
37.5	2.24E-07	1.73				
39	2.02E-07	1.22				
40.5	2.29E-07	0.00				

Concentración del sustrato (C_s) y diferentes $(t-\tau)^{1/2}$ con su respectivo tiempo máximo, para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, a $1.47 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$ y 323.15 K.

t/s	$C_s/\text{mol cm}^{-3}$	t = 40 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 36 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 30 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 27 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$	t = 21 s $(t-\tau)^{1/2}/\text{s}^{1/2}$
0	0	6.32	6.00	5.48	5.20	4.58
1	8.53E-12	6.24	5.92	5.39	5.10	4.47
2	8.51E-11	6.16	5.83	5.29	5.00	4.36
3	3.12E-10	6.08	5.74	5.20	4.90	4.24
4	8.07E-10	6.00	5.66	5.10	4.80	4.12
5	2.31E-09	5.92	5.57	5.00	4.69	4.00

continúa

continúa

6	3.80E-09	5.83	5.48	4.90	4.58	3.87
7	4.42E-09	5.74	5.39	4.80	4.47	3.74
8	9.12E-09	5.66	5.29	4.69	4.36	3.61
9	1.36E-08	5.57	5.20	4.58	4.24	3.46
10	1.84E-08	5.48	5.10	4.47	4.12	3.32
11	2.67E-08	5.39	5.00	4.36	4.00	3.16
12	3.61E-08	5.29	4.90	4.24	3.87	3.00
13	4.09E-08	5.20	4.80	4.12	3.74	2.83
14	2.74E-08	5.10	4.69	4.00	3.61	2.65
15	4.75E-08	5.00	4.58	3.87	3.46	2.45
16	2.03E-08	4.90	4.47	3.74	3.32	2.24
17	8.23E-08	4.80	4.36	3.61	3.16	2.00
18	5.95E-08	4.69	4.24	3.46	3.00	1.73
19	7.09E-08	4.58	4.12	3.32	2.83	1.41
20	4.63E-08	4.47	4.00	3.16	2.65	1.00
21	6.41E-08	4.36	3.87	3.00	2.45	0.00
22	1.43E-07	4.24	3.74	2.83	2.24	
23	1.74E-07	4.12	3.61	2.65	2.00	
24	1.43E-07	4.00	3.46	2.45	1.73	
25	1.03E-07	3.87	3.32	2.24	1.41	
26	3.18E-07	3.74	3.16	2.00	1.00	
27	2.73E-07	3.61	3.00	1.73	0.00	
28	1.74E-07	3.46	2.83	1.41		
29	3.18E-07	3.32	2.65	1.00		
30	2.08E-07	3.16	2.45	0.00		
31	6.24E-07	3.00	2.24			
32	4.08E-07	2.83	2.00			
33	5.79E-07	2.65	1.73			
34	2.41E-07	2.45	1.41			
35	5.50E-07	2.24	1.00			
36	5.37E-07	2.00	0.00			
37	4.86E-07	1.73				
38	7.07E-07	1.41				
39	7.62E-07	1.00				
40	6.72E-07	0.00				

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

Concentración 1.15×10^{-4} mol dm ⁻³				Concentración 3.04×10^{-4} mol dm ⁻³			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$
0	49.56	357	44.62	0	49.22	357	36.26
7	49.5	364	44.19	7	49.08	364	36.22
14	49.56	371	44.08	14	48.64	371	36.01
21	49.24	378	44.34	21	48.16	378	36.24
28	49.26	385	44	28	47.91	385	36.01
35	48.82	392	43.98	35	47.77	392	35.78
42	48.58	399	43.72	42	47.46	399	35.64
49	48.64	406	43.41	49	47.37	406	35.68
56	48.94	413	43.75	56	47.3	413	35.67

continúa

continúa

63	48.4	420	43.38	63	46.8	420	35.88
70	48.55	427	43.19	70	46.67	427	35.62
77	48.39	434	43.49	77	46.3	434	35.22
84	48.46	441	43.08	84	46.51	441	35.51
91	48.14	448	42.91	91	45.58	448	35.25
98	48.05	455	42.97	98	45.82	455	35.47
105	48.27	462	43.02	105	45.22	462	35.43
112	47.82	469	43.06	112	44.44	469	35.6
119	48.07	476	42.92	119	44.36	476	35.03
126	47.88	483	43	126	44.34	483	35.58
133	47.85	490	42.88	133	43.68	490	34.99
140	48.02	497	42.66	140	43.66	497	35.16
147	47.53	504	42.84	147	43.17	504	35.14
154	47.25	511	42.71	154	43.06	511	35
161	47.58	518	42.82	161	42.95	518	35.01
168	47.29	525	42.58	168	42.39	525	34.82
175	47.37	532	42.4	175	42.42	532	34.97
182	47.35	539	42.82	182	42	539	34.97
189	46.79	546	42.51	189	41.39	546	34.72
196	46.79	553	42.77	196	40.93	553	34.9
203	46.74	560	42.25	203	40.68	560	34.82
210	46.47	567	42.28	210	40.26	567	34.99
217	46.54	574	42.31	217	40.15	574	35.05
224	46.47	581	42.33	224	39.91	581	34.9
231	46.27	588	42.15	231	39.56	588	35.04
238	46.18	595	42.24	238	39.26	595	35.09
245	45.83	602	42.2	245	39.11	602	35.08
252	45.78	609	42.18	252	38.56	609	35.04
259	45.95	616	42.12	259	38.57	616	34.89
266	45.86	623	42.26	266	38.27	623	34.82
273	45.65	630	42	273	38.3	630	35.03
280	45.63	637	41.97	280	38.11	637	35.14
287	45.37	644	42.15	287	37.83	644	35.08
294	45.63	651	41.97	294	37.28	651	35.13
301	45.29	658	42.09	301	37.48	658	34.85
308	45.03	665	42.3	308	37.33	665	35.26
315	45.03	672	42.39	315	36.95	672	35.12
322	44.67	679	41.97	322	36.92	679	35.15
329	44.87	686	42.11	329	36.79	686	35.1
336	44.84	693	42.33	336	36.73	693	35.22
343	44.56	700	42.27	343	36.64	700	35.05
350	44.64			350	36.25		

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

Concentración $7.03 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$				Concentración $8.93 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	47.43	306	30.75	0	45.11	255	31.25
6	44.65	312	30.73	5	42.85	260	31.27
12	41.61	318	30.71	10	40.29	265	30.9
18	39.83	324	30.4	15	38.11	270	31.19
24	38.07	330	30.5	20	36.61	275	30.87

continúa

continúa

30	36.49	336	30.2	25	34.35	280	30.87
36	35.85	342	30.13	30	34.2	285	30.69
42	34.98	348	29.89	35	33.48	290	30.81
48	34.98	354	29.85	40	33.26	295	30.57
54	34.15	360	29.71	45	32.93	300	30.54
60	33.34	366	29.59	50	32.52	305	30.64
66	33.35	372	29.61	55	32.49	310	30.5
72	32.91	378	29.49	60	32.39	315	30.5
78	32.85	384	29.45	65	32.36	320	30.62
84	32.66	390	29.2	70	32.26	325	30.69
90	32.6	396	29.15	75	32.09	330	30.4
96	32.72	402	29.02	80	32.09	335	30.53
102	32.51	408	28.94	85	32.04	340	30.4
108	32.46	414	28.83	90	32.07	345	30.39
114	32.58	420	28.89	95	31.97	350	30.15
120	32.09	426	28.97	100	31.99	355	30.09
126	31.98	432	28.71	105	32.02	360	30.04
132	32.22	438	28.69	110	31.86	365	29.9
138	31.98	444	28.53	115	31.91	370	29.89
144	32.1	450	28.85	120	31.95	375	29.77
150	31.9	456	28.53	125	31.7	380	29.75
156	31.75	462	28.46	130	31.73	385	29.72
162	31.7	468	28.52	135	31.76	390	29.73
168	31.51	474	28.05	140	31.8	395	29.85
174	31.66	480	28.21	145	31.8	400	29.92
180	31.69	486	28.12	150	31.52	405	29.66
186	31.42	492	27.85	155	31.78	410	29.67
192	31.49	498	27.79	160	31.56	415	29.62
198	31.39	504	27.99	165	31.72	420	29.57
204	31.43	510	27.68	170	31.61	425	29.8
210	31.31	516	27.52	175	31.41	430	29.41
216	31.44	522	27.65	180	31.58	435	29.38
222	31.3	528	27.75	185	31.52	440	29.31
228	31.45	534	27.73	190	31.31	445	29.31
234	31.41	540	27.4	195	31.41	450	29.17
240	31.42	546	27.64	200	31.63	455	29.08
246	31.24	552	27.67	205	31.29	460	29.04
252	31.08	558	27.45	210	31.46	465	28.98
258	31.22	564	27.52	215	31.32	470	28.96
264	31.1	570	27.27	220	31.28	475	28.84
270	30.92	576	27.4	225	31.44	480	28.97
276	31.15	582	27.45	230	31.46	485	28.75
282	30.94	588	27	235	31.19	490	28.66
288	30.88	594	27.17	240	31.35	495	28.65
294	30.93	600	27.08	245	31.18		
300	30.73			250	31.28		

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

Concentración $1.05 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$				Concentración $1.30 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	40.78	255	31.25	0	39.1	255	29.63
5	36.4	260	31.15	5	33.94	260	29.85
10	34.61	265	31.16	10	32.74	265	29.73
15	33.51	270	31.19	15	32.29	270	29.71
20	33.09	275	31.08	20	32.27	275	29.67
25	33.04	280	31.08	25	32.31	280	29.52
30	32.69	285	30.71	30	32.07	285	29.5
35	32.79	290	30.95	35	32.16	290	29.63
40	32.33	295	30.88	40	31.98	295	29.68
45	32.23	300	30.92	45	31.94	300	29.59
50	32.4	305	30.7	50	31.99	305	29.44
55	32.29	310	30.57	55	31.84	310	29.46
60	32.2	315	30.54	60	31.94	315	29.57
65	32.19	320	30.66	65	31.65	320	29.28
70	32.1	325	30.67	70	31.45	325	29.36
75	32.14	330	30.46	75	31.75	330	29.34
80	31.82	335	30.67	80	31.32	335	29.24
85	31.9	340	30.28	85	31.15	340	29.02
90	32.12	345	30.44	90	31.13	345	29.03
95	31.77	350	30.42	95	31.08	350	28.81
100	31.82	355	30.42	100	31.18	355	28.82
105	31.84	360	30.44	105	31.09	360	28.71
110	31.73	365	30.2	110	30.95	365	28.84
115	31.66	370	30.32	115	30.87	370	28.82
120	31.66	375	30.14	120	30.86	375	28.65
125	31.64	380	30.24	125	30.8	380	28.77
130	31.71	385	30.18	130	30.6	385	28.89
135	31.48	390	30.31	135	30.52	390	28.47
140	31.71	395	30.02	140	30.13	395	28.64
145	31.61	400	30.26	145	30.11	400	28.79
150	31.76	405	29.67	150	29.97	405	28.55
155	31.48	410	29.73	155	29.9	410	28.64
160	31.62	415	30.23	160	29.84	415	28.59
165	31.52	420	29.73	165	29.79	420	28.42
170	31.62	425	29.78	170	30.08	425	28.38
175	31.52	430	29.78	175	29.82	430	28.36
180	31.54	435	29.99	180	29.93	435	28.27
185	31.55	440	29.73	185	29.83	440	28.36
190	31.45	445	30.05	190	29.89	445	28.47
195	31.28	450	29.78	195	29.8	450	28.38
200	31.13	455	29.64	200	29.91	455	28.38
205	31.33	460	29.74	205	29.79	460	28.14
210	31.27	465	29.74	210	29.84	465	28.38
215	31.49	470	29.81	215	29.76	470	28.16
220	31.42	475	29.8	220	29.8	475	28.14
225	31.47	480	29.78	225	29.82	480	28.15
230	31.24	485	29.76	230	29.88	485	28.04
235	31.05	490	29.81	235	29.69	490	28.22
240	31.27	495	29.71	240	29.76	495	28.11
245	31.14			245	29.78	500	28.08
250	31.24			250	29.8		

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

Concentración $1.48 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$				Concentración $2.13 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	38.39	255	30.5	0	38.64	255	29.89
5	35.91	260	30.57	5	33.02	260	30.11
10	34.27	265	30.63	10	32.24	265	29.94
15	33.14	270	30.51	15	31.88	270	29.93
20	32.61	275	30.55	20	31.89	275	30.04
25	32.33	280	30.48	25	31.86	280	29.84
30	32.17	285	30.04	30	31.75	285	29.92
35	32.14	290	30.46	35	31.77	290	29.96
40	31.99	295	30.18	40	31.81	295	30.01
45	31.83	300	30.07	45	31.63	300	29.87
50	31.85	305	29.92	50	31.48	305	29.84
55	31.75	310	29.87	55	31.55	310	29.75
60	32.05	315	29.89	60	31.52	315	29.96
65	31.77	320	29.56	65	31.54	320	30.12
70	31.67	325	29.41	70	31.58	325	29.88
75	31.72	330	29.62	75	31.42	330	29.91
80	31.72	335	29.39	80	31.55	335	29.97
85	31.61	340	29.36	85	31.45	340	29.88
90	31.46	345	29.39	90	31.42	345	29.97
95	31.6	350	28.99	95	31.27	350	29.9
100	31.5	355	29.14	100	31.03	355	29.93
105	31.22	360	29.2	105	31.08	360	29.84
110	31.54	365	29.08	110	31.11	365	29.81
115	31.45	370	29.08	115	30.89	370	29.79
120	31.48	375	28.87	120	30.99	375	29.85
125	31.32	380	28.77	125	30.96	380	29.91
130	31.36	385	28.85	130	30.71	385	29.86
135	31.31	390	28.78	135	30.41	390	29.77
140	31.35	395	28.53	140	30.36	395	30.02
145	31.39	400	28.51	145	30.27	400	29.82
150	31.4	405	28.25	150	30.28	405	29.85
155	31.51	410	28.35	155	30.3	410	29.96
160	31.39	415	28.23	160	30.19	415	29.97
165	31.24	420	28.29	165	30.25	420	29.78
170	31.23	425	28.16	170	29.93	425	29.81
175	31.06	430	28.31	175	30.17	430	29.87
180	31.19	435	28.2	180	30.11	435	29.92
185	31.05	440	28.04	185	30.05	440	29.82
190	31.09	445	27.94	190	30.23	445	29.93
195	31.06	450	28.1	195	30.02	450	29.86
200	31.07	455	28.17	200	30.09	455	29.69
205	31.09	460	27.91	205	30.18	460	29.91
210	30.94	465	28.03	210	30.25	465	29.89
215	30.97	470	27.95	215	29.89	470	29.82
220	30.89	475	27.94	220	30.19	475	29.59
225	30.8	480	27.93	225	29.88	480	29.77
230	30.81	485	27.75	230	29.99	485	29.86
235	30.71	490	27.87	235	29.95	490	29.83
240	30.88	495	27.72	240	29.92	495	29.79
245	30.7			245	30.06	500	29.85
250	30.77			250	29.76		

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

Concentración $1.15 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$				Concentración $3.045 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	48.22	255	42.4	0	47.65	255	37.78
5	48.08	260	42.61	5	47.4	260	37.47
10	47.75	265	42.33	10	46.98	265	37.56
15	47.83	270	42.47	15	46.57	270	37.56
20	47.78	275	42.28	20	46.26	275	37.63
25	47.63	280	42.18	25	46.02	280	37.19
30	47.64	285	42.11	30	46.04	285	37.36
35	47.21	290	42.32	35	45.71	290	37.4
40	47.31	295	42.36	40	45.19	295	37.59
45	47.25	300	42.24	45	44.65	300	37.59
50	47.09	305	42.05	50	44.4	305	37.71
55	46.91	310	42	55	44.08	310	37.53
60	46.7	315	41.96	60	43.73	315	37.9
65	46.46	320	41.96	65	43.48	320	37.69
70	46.38	325	41.97	70	43.16	325	37.79
75	46.53	330	42.12	75	42.86	330	37.91
80	46.29	335	41.69	80	42.68	335	37.62
85	46.13	340	41.85	85	42.27	340	37.43
90	46.02	345	41.99	90	41.94	345	37.95
95	45.73	350	42.13	95	41.99	350	37.8
100	45.79	355	42	100	41.89	355	38.14
105	45.53	360	42.07	105	41.3	360	37.86
110	45.66	365	42.01	110	41.07	365	38.19
115	45.33	370	41.76	115	40.78	370	38.25
120	45.53	375	41.9	120	40.84	375	38.4
125	44.96	380	41.73	125	40.3	380	38.43
130	45.13	385	41.75	130	40.33	385	38
135	44.71	390	41.96	135	40.19	390	38.11
140	44.64	395	42.04	140	39.91	395	38.08
145	44.56	400	41.92	145	39.8	400	38.11
150	44.46	405	42.12	150	39.43	405	38.34
155	44.58	410	42.01	155	39.05	410	38.55
160	44.18	415	42.09	160	39.28	415	38.45
165	44.24	420	42.29	165	39.05	420	38.47
170	44.19	425	42.13	170	38.82	425	38.69
175	43.95	430	42.16	175	38.89	430	38.58
180	43.62	435	42.13	180	38.8	435	38.85
185	43.46	440	42.29	185	38.46	440	38.75
190	43.66	445	42.28	190	37.93	445	39.15
195	43.66	450	42.18	195	38.39	450	38.86
200	43.56	455	42.54	200	38.16	455	39.2
205	43.27	460	42.38	205	38.02	460	39.34
210	43.06	465	42.28	210	37.79	465	39.5
215	42.94	470	42.47	215	37.69	470	39.51
220	42.69	475	42.68	220	37.8	475	39.7
225	42.97	480	42.64	225	37.73	480	39.77
230	42.62	485	42.26	230	37.82	485	40.08
235	42.53	490	42.62	235	37.55	490	39.79
240	42.73	495	42.53	240	37.52	495	40.01
245	42.6	500	42.64	245	37.66	500	39.9
250	42.59			250	37.82		

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

Concentración $7.03 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$				Concentración $8.93 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	46.38	153	30.82	0	44.3	153	30.43
3	45.16	156	30.66	3	40.24	156	30.17
6	44.02	159	30.69	6	36.86	159	30.06
9	42.77	162	30.54	9	34.61	162	30.36
12	41.79	165	30.71	12	33.63	165	30.46
15	40.11	168	30.37	15	32.38	168	30.16
18	39.34	171	30.51	18	32.24	171	30.09
21	38.61	174	30.3	21	31.79	174	30.26
24	37.73	177	30.17	24	31.59	177	30.27
27	37.25	180	30.58	27	31.71	180	30.28
30	35.94	183	30.37	30	31.06	183	30.25
33	35.33	186	30.32	33	31.46	186	30.28
36	34.7	189	30.34	36	31.21	189	30.33
39	34.39	192	30.22	39	31.04	192	30.2
42	33.91	195	30.2	42	31.04	195	30.21
45	33.86	198	30.23	45	31.04	198	30.15
48	33.23	201	30.18	48	31.24	201	30.06
51	33.16	204	30.24	51	31.03	204	30.15
54	32.7	207	30.15	54	31.12	207	30.16
57	32.5	210	30.26	57	30.91	210	30.15
60	32.21	213	30.04	60	30.8	213	30.27
63	31.88	216	30.28	63	30.95	216	30.18
66	32.09	219	30.13	66	31.02	219	30.21
69	31.93	222	30.25	69	30.86	222	30.21
72	31.74	225	30.3	72	30.63	225	30.13
75	31.81	228	30.08	75	30.59	228	30.29
78	31.76	231	30.11	78	30.68	231	30.19
81	31.69	234	30.17	81	30.76	234	30.16
84	31.65	237	30.12	84	30.77	237	30.21
87	31.41	240	30.04	87	30.49	240	30.07
90	31.73	243	30.1	90	30.7	243	30.07
93	31.53	246	30.2	93	30.72	246	30.02
96	31.47	249	30.01	96	30.69	249	30.15
99	31.54	252	29.81	99	30.91	252	29.97
102	31.53	255	29.96	102	30.32	255	30.16
105	31.34	258	29.83	105	30.43	258	30.21
108	31.31	261	29.95	108	30.52	261	30.18
111	31.34	264	30.01	111	30.56	264	30.2
114	31.45	267	29.83	114	30.57	267	30.24
117	30.96	270	29.88	117	30.47	270	30.11
120	31.21	273	29.73	120	30.61	273	30.21
123	31.18	276	29.73	123	30.48	276	30.37
126	31.16	279	29.98	126	30.38	279	30.3
129	31.05	282	30.15	129	30.46	282	29.8
132	31.14	285	30.19	132	30.22	285	30.02
135	31.23	288	30.02	135	30.21	288	30.06
138	30.96	291	29.88	138	30.35	291	30.05
141	30.82	294	29.87	141	30.17	294	30.19
144	30.93	297	29.87	144	30.33	297	29.91
147	31.03	300	29.82	147	30.69	300	29.99
150	30.43			150	30.39		

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

Concentración $1.05 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$				Concentración $1.30 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	45.3	153	30.78	0	45.79	153	30.42
3	38	156	30.85	3	43.52	156	30.36
6	35.3	159	30.91	6	41.51	159	30.34
9	34.58	162	30.69	9	39.6	162	30.6
12	34.13	165	30.78	12	38.06	165	30.42
15	33.93	168	30.99	15	36.79	168	30.31
18	33.39	171	30.61	18	35.7	171	30.44
21	33.39	174	30.76	21	34.58	174	30.33
24	33.45	177	30.88	24	33.86	177	30.32
27	33.15	180	30.56	27	33.46	180	30.18
30	33.14	183	30.76	30	32.96	183	30.13
33	33.32	186	30.72	33	32.43	186	30.24
36	33.07	189	30.78	36	32.09	189	30.31
39	32.98	192	30.62	39	31.98	192	30.18
42	32.85	195	30.65	42	31.99	195	30.13
45	32.72	198	30.49	45	31.7	198	30.19
48	32.7	201	30.62	48	31.61	201	30.07
51	32.43	204	30.54	51	31.62	204	30.2
54	32.37	207	30.48	54	31.55	207	29.92
57	32.4	210	30.57	57	31.51	210	30.25
60	32.5	213	30.42	60	31.32	213	30.06
63	32.35	216	30.53	63	31.01	216	29.83
66	32.26	219	30.58	66	31.36	219	30.02
69	32.1	222	30.52	69	31.28	222	30.06
72	32.05	225	30.4	72	31.24	225	29.98
75	31.97	228	30.32	75	30.92	228	30.16
78	31.8	231	30.34	78	30.91	231	29.93
81	32.16	234	30.33	81	31.03	234	29.73
84	31.96	237	30.51	84	31.11	237	30.02
87	31.94	240	30.23	87	30.76	240	29.95
90	31.79	243	30.3	90	30.99	243	29.79
93	31.97	246	30.38	93	31.11	246	29.94
96	31.72	249	30.36	96	30.84	249	29.75
99	31.75	252	30.51	99	30.89	252	29.85
102	31.65	255	30.5	102	30.81	255	29.69
105	31.65	258	30.44	105	30.77	258	29.7
108	31.5	261	30.3	108	30.68	261	29.95
111	31.29	264	30.27	111	30.94	264	29.82
114	31.02	267	30.2	114	30.78	267	29.57
117	31.35	270	30.38	117	30.85	270	29.84
120	31.23	273	30.4	120	31	273	29.77
123	31.11	276	30.59	123	30.87	276	29.66
126	31	279	30.4	126	30.95	279	29.73
129	31.11	282	30.32	129	30.68	282	29.82
132	31.02	285	30.44	132	30.58	285	29.87
135	30.75	288	30.44	135	30.96	288	29.81
138	30.94	291	30.33	138	30.78	291	29.62
141	30.88	294	30.41	141	30.88	294	29.64
144	31.12	297	30.23	144	30.59	297	29.64
147	30.79	300	30.33	147	30.55	300	29.66
150	30.88			150	30.64		

Tensión superficial dinámica de Ocenol + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

Concentración $1.48 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$				Concentración $2.13 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$			
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	38.69	153	29.54	0	35.67	153	30.4
3	35.79	156	29.48	3	31.74	156	30.47
6	33.5	159	29.49	6	31.48	159	30.42
9	32.53	162	29.46	9	31.33	162	30.54
12	31.96	165	29.33	12	30.92	165	30.27
15	31.46	168	29.72	15	30.76	168	30.13
18	31.54	171	29.46	18	30.91	171	30.43
21	31.67	174	29.83	21	30.93	174	30.35
24	31.43	177	29.25	24	30.88	177	30.5
27	31.28	180	29.65	27	30.65	180	30.22
30	31.29	183	29.05	30	30.8	183	30.41
33	31.24	186	29.16	33	30.71	186	30.26
36	31.03	189	29.76	36	30.51	189	30.38
39	30.94	192	29.6	39	30.72	192	30.27
42	30.6	195	29.16	42	30.49	195	30.43
45	30.95	198	29.58	45	30.7	198	30.27
48	30.99	201	29.17	48	30.6	201	30.5
51	31.09	204	29.34	51	30.41	204	30.07
54	30.58	207	29.22	54	30.59	207	30.24
57	30.82	210	29.19	57	30.46	210	30.3
60	30.59	213	29.33	60	30.61	213	30.17
63	30.82	216	29.08	63	30.42	216	30.46
66	30.76	219	29.21	66	30.65	219	30.11
69	30.56	222	29.19	69	30.6	222	30.13
72	30.52	225	29.15	72	30.48	225	30.4
75	30.66	228	29.16	75	30.66	228	30.23
78	30.47	231	29.05	78	30.59	231	30.13
81	30.47	234	29.17	81	30.39	234	30.3
84	30.6	237	28.99	84	30.54	237	30.21
87	30.63	240	29.07	87	30.61	240	30.42
90	30.51	243	29.16	90	30.42	243	30.37
93	30.49	246	29.25	93	30.55	246	30.36
96	30.48	249	29.09	96	30.71	249	30.16
99	30.46	252	29.15	99	30.54	252	30.25
102	30.41	255	29.26	102	30.86	255	30.14
105	30.45	258	29.27	105	30.42	258	30.23
108	30.31	261	29.11	108	30.59	261	30.24
111	30.48	264	29.04	111	30.76	264	30.23
114	30.42	267	29.16	114	30.5	267	30.21
117	30.28	270	28.91	117	30.48	270	30.15
120	30.5	273	29.19	120	30.57	273	30.14
123	30.44	276	29.13	123	30.61	276	30.34
126	30.28	279	29.03	126	30.39	279	30.44
129	30.34	282	29.05	129	30.34	282	30.07
132	30.41	285	29.17	132	30.47	285	30.13
135	29.54	288	29.23	135	30.44	288	30.1
138	29.75	291	29.07	138	30.22	291	30.23
141	29.6	294	29.2	141	30.41	294	30.23
144	30.13	297	29.13	144	30.39	297	30.28
147	29.62			147	30.23	300	30.06
150	29.4			150	30.52		

Tensión superficial dinámica del Surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

$C = 1.50 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 6.69 \times 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$		$C = 9.07 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 1.61 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	50.66	0	49.29	0	46.95	0	43.5
0.1	50.46	0.3	47.87	0.1	46.55	0.2	43.19
0.5	50.22	0.5	47.19	0.2	46.54	0.3	42.43
0.6	49.82	0.7	46.92	0.3	46.29	0.5	42.25
0.8	49.74	0.9	46.82	0.4	45.3	0.9	42.24
0.9	49.95	1.1	46.59	1.1	44.92	1.2	42.09
1	49.7	1.2	46.36	1.2	44.6	1.5	42.06
1.5	49.54	1.6	46.32	1.6	44.61	2.1	42.03
1.6	49.55	1.7	46.12	1.7	44.45	2.8	41.95
1.7	49.51	1.8	46.23	1.8	44.46	2.9	41.7
2	49.39	1.9	46.16	2	44.46	3.6	41.78
2.2	49.24	2.1	45.95	2.1	44.42	3.8	41.67
2.4	49.22	2.4	45.93	2.2	44.48	4	41.66
2.5	49.19	2.5	45.87	2.4	44.44	4.2	41.68
2.6	49.14	2.6	45.69	2.6	44.32	4.4	41.61
3	49.04	2.7	45.71	3	44.34	4.9	41.79
3.5	49	2.8	45.74	3.2	44.12	5	41.65
3.7	49	2.9	45.74	3.4	44.12	5.7	41.74
4	48.91	3.2	45.73	3.6	44.1	6.7	41.73
4.4	48.94	3.3	45.61	3.7	44.1	6.8	41.73
4.5	48.97	3.5	45.61	3.8	44.16	6.9	41.7
5.1	48.83	3.6	45.61	4.2	44.14	7	41.6
5.2	48.87	3.7	45.61	4.5	44.03	7.9	41.63
5.5	48.8	4	45.69	4.6	44.09	8.9	41.52
5.7	48.88	4.2	45.41	4.8	44.04	9.7	41.57
5.8	48.75	4.5	45.39	5.3	43.88		
6	48.76	4.6	45.44	5.8	43.93		
6.1	48.77	4.7	45.59	6	43.97		
6.3	48.75	4.9	45.5	6.6	43.84		
6.4	48.7	5	45.64	6.7	43.83		
6.9	48.8	5.5	45.45	7.1	43.9		
7.3	48.79	5.6	45.67	7.2	43.78		
7.9	48.7	5.7	45.43	7.3	43.8		
8	48.84	6.4	45.45	7.4	43.7		
8.2	48.75	7.5	45.49	7.6	43.67		
8.4	48.74	7.7	45.47	7.8	43.64		
8.6	48.79	7.8	45.46	8.1	43.76		
9.1	48.76	8.3	45.5	8.2	43.76		
9.6	48.75	8.7	45.36	8.3	43.7		
		9.1	45.65	8.4	43.77		
		9.2	45.59	8.6	43.76		
		9.3	45.59	8.7	43.69		
				8.8	43.77		
				8.9	43.72		
				9	43.73		
				9.1	43.78		
				9.4	43.7		
				9.6	43.74		

Tensión superficial dinámica del SurfínoI DF110-D + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

$C = 2.11 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 3.30 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 4.90 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0	41.82	0	39.78	0	37.5
0.1	41.44	0.2	39.1	0.1	37.13
0.6	40.85	0.7	38.36	0.2	36.3
1.1	40.36	1	38.29	0.7	36.25
1.5	40.08	1.1	38.03	0.8	36.17
1.7	40.01	1.5	38.07	1	36.07
1.9	39.99	1.7	38.04	1.1	35.96
2	39.98	1.8	38.04	1.3	35.93
2.3	39.94	2.1	37.93	1.4	35.89
2.5	39.87	2.4	37.85	1.5	35.78
2.8	39.91	2.7	37.72	1.6	35.7
3.2	39.84	2.8	37.77	1.8	35.84
3.4	39.85	3.2	37.74	1.9	35.69
4	39.85	4	37.71	2	35.69
4.6	39.8	4.2	37.71	2.2	35.65
4.9	39.7	4.3	37.66	2.5	35.62
5.2	39.71	4.5	37.62	2.6	35.57
5.4	39.61	4.9	37.54	2.7	35.6
5.7	39.59	5.5	37.66	2.8	35.55
6	39.58	5.6	37.59	3.1	35.48
6.7	39.55	5.8	37.54	3.2	35.5
7.3	39.58	6	37.67	3.4	35.53
8	39.56	6.2	37.65	3.5	35.46
8.1	39.57	6.3	37.61	3.6	35.52
8.4	39.52	6.6	37.53	3.7	35.51
8.5	39.58	7	37.5	4.2	35.51
9.4	39.48	7.7	37.61	4.4	35.48
9.7	39.5	8	37.61	5.6	35.49
		8.1	37.59	5.9	35.48
		9.7	37.48	6.4	35.45
				6.6	35.44
				7	35.49
				8.1	35.5
				8.8	35.53

Tensión superficial dinámica del SurfínoI DF110-D + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

$C = 6.69 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 8.47 \times 10^{-4} \text{ mol dl}^{-1}$		$C = 9.07 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 1.61 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$						
0.1	50.6	0.1	47.05	0.1	46.36	0.1	43.65
0.2	48.81	0.1	46.78	0.1	45.44	0.3	42.39
0.4	48	0.2	46.15	0.2	45.09	0.6	42.34
0.6	47.8	0.3	45.39	0.3	44.62	0.7	42.25
0.9	47.69	0.5	45.15	0.3	44.69	0.8	42.23
1.0	47.36	0.5	45.11	0.4	44.32	1.1	42.21
1.1	47.24	0.6	45.07	0.5	44.15	1.2	42.19
1.3	47.16	0.9	44.96	0.8	43.97	1.6	42.06
1.5	46.97	0.9	44.8	0.9	43.92	1.7	42.04
1.7	46.98	1.0	44.59	0.9	43.77	1.8	42

continúa

continúa

1.9	46.98	1.1	44.58	1.1	43.68	1.9	41.97
2.0	46.98	1.2	44.49	1.1	43.54	1.9	41.9
2.2	46.71	1.5	44.44	1.3	43.5	2.0	41.93
2.4	46.6	1.9	44.24	1.3	43.43	2.1	41.96
2.5	46.48	1.9	44.52	1.5	43.45	2.2	41.92
2.8	46.47	2.3	44.26	1.5	43.24	2.5	41.9
2.9	46.38	2.4	44.21	1.7	43.15	3.0	41.87
3.1	46.53	2.5	44.39	2.3	43.13	3.1	41.87
3.2	46.48	2.7	44.01	2.3	43.12	3.3	41.87
3.3	46.5	2.7	44.23	2.4	43.14	4.5	41.85
3.4	46.56	2.8	44.24	2.5	43.39	5.1	41.84
3.5	46.54	2.9	44.04	2.6	43.31	5.9	41.84
3.8	46.48	3.0	44.12	2.7	43.26	6.5	41.79
3.9	46.4	3.3	44.07	2.8	43.22		
4.1	46.43	3.3	44.06	2.9	43.21		
4.2	46.3	3.5	44.18	3.1	43.22		
4.5	46.32	3.6	44.26	3.1	43.28		
4.8	46.34	3.8	44.08	3.7	43.39		
5.1	46.39	3.9	44.03	3.8	43.24		
5.4	46.45	3.9	44.31	4.1	43.23		
5.5	46.49	4.0	44.07	4.7	43.22		
5.6	46.47	4.2	44.11	5.5	43.25		
5.7	46.45	4.4	44.07				
5.8	46.44	4.6	43.91				
6.0	46.49	4.7	43.91				
6.5	46.35	5.0	43.88				
6.6	46.4	5.2	43.88				
		5.5	43.92				
		5.5	43.67				
		5.6	43.85				
		5.7	43.8				
		5.7	43.82				
		5.8	43.85				
		6.0	43.81				
		6.2	43.77				
		6.6	43.92				

Tensión superficial dinámica del Surfinol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

C = 2.11x10 ⁻³ mol dm ⁻³		C = 3.30x10 ⁻³ mol dm ⁻³		C = 4.90x10 ⁻³ mol dm ⁻³			
Tiempo/s	γ(t)/mN m ⁻¹	Tiempo/s	γ(t)/mN m ⁻¹	Tiempo/s	γ(t)/mN m ⁻¹		
0.0	43.43	4.4	40.29	0.1	41.48	0.0	38.81
0.1	41.57	4.5	40.32	0.1	40.51	0.1	38.17
0.1	41.53	4.6	40.36	0.2	40.5	0.3	37.36
0.3	41.3	4.7	40.38	0.8	39.91	0.5	36.9
0.3	41.14	4.8	40.35	1.1	39.79	0.5	36.51
0.4	41.2	4.9	40.34	1.3	39.78	0.7	36.51
0.5	41.1	5.1	40.26	1.3	39.51	0.9	36.34
0.5	41.01	5.1	40.19	1.4	39.44	1.1	36.36
0.7	40.81	5.2	40.23	1.5	39.27	1.3	36.24
0.8	40.69	5.3	40.23	1.6	39.24	1.5	36.15
0.9	40.71	5.3	40.35	1.7	39.17	1.6	36.15

continúa

continúa

0.9	40.73	5.5	40.26	1.8	39.06	1.7	36.19
1.1	40.69	5.7	40.15	1.9	39.18	2.1	36.05
1.1	40.66	5.7	40.25	2.0	38.85	2.1	36.19
1.2	40.61	5.8	40.21	2.2	38.75	2.4	36.13
1.3	40.54	6.0	40.26	2.5	38.8	2.5	36.11
1.3	40.67	6.1	40.26	2.6	38.67	2.9	36.08
1.4	40.58	6.1	40.19	2.7	38.74	3.0	36.05
1.6	40.53	6.2	40.25	2.9	38.81	3.1	36.08
1.7	40.62	6.3	40.21	3.0	38.81	3.2	36.07
1.7	40.57	6.4	40.2	3.1	38.74	3.4	36.01
1.8	40.35	6.6	40.16	3.1	38.87	3.5	35.95
1.9	40.39	6.7	40.16	3.4	38.94	3.7	35.91
2.0	40.31			3.5	38.71	3.8	35.92
2.1	40.29			3.6	38.89	4.0	35.87
2.3	40.37			3.7	38.76	4.1	35.87
2.3	40.18			3.9	38.68	4.4	35.96
2.4	40.27			4.1	38.78	4.5	35.83
2.5	40.4			4.2	38.64	4.6	35.8
2.5	40.31			4.3	38.81	4.9	35.85
2.6	40.36			4.3	38.81	4.9	35.81
2.7	40.34			4.6	38.77	5.0	35.88
2.7	40.21			4.7	38.66	5.2	35.92
2.8	40.34			4.8	38.65	5.3	35.88
2.9	40.22			4.9	38.68	5.4	35.82
2.9	40.2			5.0	38.63	5.5	35.83
3.1	40.25			5.1	38.72	5.8	35.81
3.1	40.17			5.3	38.71	6.5	35.84
3.2	40.29			5.3	38.6		
3.3	40.14			5.4	38.69		
3.5	40.25			5.5	38.69		
3.7	40.28			5.5	38.64		
3.7	40.26			5.7	38.65		
3.8	40.29			5.9	38.67		
3.9	40.17			5.9	38.61		
3.9	40.25			6.1	38.6		
4.1	40.35			6.1	38.6		
4.1	40.32			6.2	38.6		
4.2	40.37			6.4	38.59		
4.3	40.3			6.5	38.52		

Tensión superficial dinámica del Surfíno 485 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

$C = 1.50 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 8.60 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 1.88 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 3.23 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$						
0	54.05	0	52.24	0	53.4	0	49.68
0.1	52.81	0.2	50.75	0.3	49.85	0.2	48.37
0.4	52	0.4	49.45	0.6	49.29	0.4	47.83
0.7	51.05	0.7	49.26	1.5	48.36	0.6	47.51
1.2	50.36	0.9	49.12	1.8	48.3	1.1	46.82
1.4	50.29	1.2	49.04	2.1	48.11	1.4	46.71
1.8	50.32	1.4	49.03	2.4	47.97	1.7	46.88
2.3	50.28	1.5	49.1	2.5	47.72	1.9	46.73

continúa

continúa

2.4	50.23	1.7	48.96	2.7	47.81	2.1	46.85
2.5	50.2	1.8	48.93	2.8	47.76	2.2	46.82
2.6	50.06	2	48.89	3	47.73	2.4	46.71
2.7	50.12	2.2	48.93	3.1	47.8	2.8	46.74
2.8	50.13	2.3	48.86	3.3	47.68	2.9	46.83
2.9	50.03	2.6	48.91	3.5	47.88	3.2	46.79
3.3	50.28	2.7	48.86	3.7	47.61	3.4	46.65
3.6	50.04	2.8	48.85	4	47.65	3.7	46.66
3.7	50.13	2.9	48.91	4.1	47.76	4	46.66
3.8	50.09	3.1	48.84	4.3	47.83	4.3	46.6
3.9	50.2	3.3	48.82	4.4	47.81	4.5	46.61
4.2	50.08	3.5	48.83	4.5	47.79	5	46.65
4.4	50.04	3.7	48.8	4.7	47.67	5.7	46.61
4.5	50.13	3.8	48.94	5.2	47.65	6	46.67
4.7	50.07	4	48.85	6.4	47.6	6.2	46.62
4.9	49.96	4.2	48.88	6.5	47.78	6.4	46.64
5.2	50.05	4.3	48.93	7.4	47.62	6.6	46.67
5.3	49.98	4.7	48.86	7.5	47.79	7	46.59
5.7	49.92	4.8	48.84	7.6	47.65	7.1	46.62
5.9	49.92	5	48.93	7.7	47.76	7.2	46.6
6.1	50.01	5.1	48.85	7.8	47.72	8	46.66
6.5	49.98	5.2	48.98	8.7	47.7	8.9	46.68
6.7	49.81	5.4	48.79	8.8	47.8	9	46.7
6.8	49.87	5.6	48.8	9.9	47.75	9.7	46.65
6.9	49.81	5.7	48.71			9.9	46.62
7.2	49.81	6	48.76			10	46.68
7.4	49.88	6.1	48.75				
7.7	49.81	6.3	48.84				
7.8	49.88	6.8	48.94				
8.1	49.96	7.1	48.87				
8.4	49.98	7.2	48.81				
8.7	49.86	7.6	48.88				
8.8	49.83	7.7	48.86				
9.1	49.88	7.8	48.83				
9.3	49.79	7.9	48.76				
9.4	49.83	8.3	48.76				
9.5	49.93	8.4	48.81				
9.6	49.89	8.5	48.85				
9.8	49.84	8.7	48.86				
10	49.86	9.6	48.79				
		9.9	48.91				

Tensión superficial dinámica del Surfíno 485 + MDEA/DEA acuosa, a 313.15 K.

$C = 4.39 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 8.09 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 1.90 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0.1	48.6	0.0	47.42	0.1	44.12
0.2	47.38	0.1	47.29	0.5	42.49
0.5	47.26	0.1	45.82	0.7	42.19
0.8	46.48	0.5	45.41	1	42.04
1.8	46.16	0.7	45.03	1.2	41.79
2.2	46	0.9	45.08	1.3	41.65

continúa

continúa

2.3	46.08	1.2	45.08	1.5	41.66
2.4	46.09	1.3	45.08	1.8	41.64
2.7	46.09	1.5	45.06	2.4	41.64
2.9	46.01	1.7	45.08	3	41.67
3.1	46.12	2.1	44.98	3.4	41.67
3.2	46.08	2.1	44.83	3.5	41.7
3.5	46.01	2.2	45.01	3.6	41.64
3.6	45.91	2.5	44.89	4	41.61
3.7	45.96	2.5	44.91	4.4	41.6
3.8	45.92	2.7	44.79	4.8	41.57
4	45.91	2.7	44.89	5	41.64
4.5	45.87	2.9	44.69	5.2	41.68
4.6	45.96	3.1	44.81	5.7	41.68
4.7	45.96	3.3	44.6	5.8	41.67
4.8	45.94	3.5	44.59	6	41.54
4.9	45.99	3.7	44.66	6.2	41.65
5.2	45.89	4.1	44.66	6.5	41.51
5.3	45.92	4.2	44.58	7	41.51
5.4	45.89	4.5	44.51	7.1	41.55
6.1	45.82	4.7	44.47	7.2	41.61
6.2	45.91	4.9	44.41	7.4	41.53
6.3	45.86	5.1	44.5	7.6	41.51
6.4	45.89	5.3	44.42	8	41.53
6.6	45.95	5.3	44.41	8.1	41.54
6.8	45.85	5.4	44.46	8.2	41.6
7.3	45.83	5.9	44.54	8.3	41.54
7.5	45.89	6.1	44.46	8.4	41.54
7.8	45.75	6.4	44.54	9.2	41.53
8	45.88	6.6	44.56	9.3	41.6
8.2	45.86	7.2	44.46	9.4	41.5
8.3	45.77	7.4	44.54	9.6	41.54
8.4	45.79	7.6	44.46	9.8	41.53
8.5	45.81	8	44.54		
8.6	45.7	8.1	44.56		
8.8	45.81	8.4	44.56		
9	45.66	9.2	44.46		
9.2	45.63	9.3	44.5		
9.4	45.74	9.4	44.54		
9.9	45.63	9.6	44.46		
		9.8	44.56		

Tensión superficial dinámica del Surfinol 485 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

$C = 1.46 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 4.39 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 1.88 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 3.23 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$						
0.1	50.91	0.0	50.26	0.1	48.42	0.5	46.81
0.6	50.25	0.5	49.49	0.2	47.4	0.7	46.11
0.9	49.87	0.6	49.15	0.4	47.19	1.1	45.44
1.1	49.7	0.8	49.13	0.8	46.86	1.1	45.44
1.3	49.31	1.3	48.89	1.4	46.61	1.3	45.33
1.5	49.27	1.4	48.6	1.5	46.67	1.9	45.2
1.5	49.3	1.5	48.56	1.6	46.73	1.9	45.1

continúa

continúa

1.9	49.3	2.1	48.49	2.0	46.58	2.5	45.01
1.9	49.35	2.2	48.49	2.3	46.68	2.5	44.97
2.1	49.31	2.9	48.42	2.7	46.79	2.7	44.97
2.3	49.34	3.4	48.46	2.9	46.63	2.9	45.07
2.6	49.26	4.0	48.41	3.0	46.74	3.2	44.95
3.0	49.35	4.3	48.46	3.1	46.68	3.6	44.95
3.4	49.34	4.5	48.43	3.6	46.8	4.6	45.06
3.5	49.31	6.2	48.51	3.8	46.71	4.7	45.07
3.8	49.4	6.6	48.47	3.9	46.83	5.1	45.04
4.0	49.46			4.1	46.65	5.3	45.08
4.1	49.41			4.5	46.74	6.2	45.12
4.4	49.35			4.6	46.78		
4.5	49.37			4.7	46.84		
4.9	49.53			4.9	46.86		
5.1	49.46			5.0	46.61		
5.5	49.46			5.2	46.73		
5.7	49.46			5.4	46.7		
6.3	49.35			5.5	46.77		
6.4	49.41			5.9	46.66		
6.5	49.39			5.9	46.62		
6.5	49.41						

Tensión superficial dinámica del Surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, a 323.15 K.

$C = 4.39 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 8.09 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$		$C = 1.90 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$	
Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$	Tiempo/s	$\gamma(t)/\text{mN m}^{-1}$
0.2	46.77	0.1	44.48	0.1	43.05
0.4	46.49	0.5	44.19	0.2	42.29
0.6	45.75	0.6	44.19	0.3	42
0.8	45.59	0.9	43.87	0.6	41.76
1.0	45.3	0.9	43.77	0.7	41.65
1.5	45.02	1.2	43.64	0.8	41.66
1.6	45.1	1.4	43.57	1.1	41.56
1.9	45.05	1.5	43.57	1.3	41.49
2.3	45.06	1.6	43.54	1.5	41.41
2.7	44.81	1.7	43.49	1.7	41.34
2.9	44.83	1.9	43.46	1.9	41.26
3.4	44.95	2.1	43.49	2.0	41.16
3.5	44.89	2.2	43.43	2.3	41.15
3.5	44.74	2.6	43.41	2.4	41.14
3.7	44.78	2.8	43.41	2.5	41.12
3.9	44.83	2.9	43.41	3.1	41.12
4.1	44.73	3.2	43.36	3.4	41.16
4.5	44.71	3.3	43.38	3.5	41.1
4.7	44.7	3.5	43.42	3.7	41.09
4.8	44.84	4.0	43.39	4.0	41.08
4.9	44.87	4.4	43.41	4.1	41.09
5.3	44.76	4.5	43.47	4.2	41.04
5.3	44.88	4.9	43.36	4.3	41.01
5.4	44.89	5.0	43.45	4.4	41.07
5.5	44.88	5.3	43.38	4.5	41.06
5.5	44.67	5.5	43.38	4.7	40.95

continúa

continúa

5.7	44.83	5.6	43.3	4.8	40.95
5.7	44.87	6.0	43.35	4.9	41
5.9	44.7	6.2	43.31	5.0	40.95
6.1	44.72	6.3	43.35	5.6	40.99
6.2	44.71	6.6	43.28	5.7	40.93
6.3	44.72			5.8	41.03
6.6	44.73			6.5	40.97
				6.6	40.94
				6.7	40.95

En mediciones experimentales, el análisis de errores proporciona una estimación razonable del error que se puede presentar debido a los instrumentos y a la técnica. Los resultados del análisis de errores proporcionan un intervalo de error para las determinaciones experimentales.

El análisis de errores se hace para determinar el máximo error en cada valor experimental que es registrado. Estos errores son aplicados para dar un cambio máximo en las mediciones experimentales.

Por lo que, si se tiene:

$$Y = F(x, z, \dots, w)$$

Y el error en x, z, \dots, w está dado por $\Delta x, \Delta z, \dots, \Delta w$, respectivamente, entonces el error en "Y" será (reporte de la IUPAC, 1981)

$$\Delta Y = \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x} \right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial z} \right)^2 (\Delta z)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial w} \right)^2 (\Delta w)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

La ecuación (1) se aplica a cada una de las ecuaciones utilizadas en este trabajo.

a). Error en la densidad.

$$\Delta \rho = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial A} \right)^2 (\Delta A)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial B} \right)^2 (\Delta B)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right)^2 (\Delta \tau)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Donde ΔA y ΔB son los errores de los parámetros que se emplean en la calibración, en este caso son agua y aire y $\Delta \tau$ representan el error de los periodos obtenidos en el experimento de los puros o mezclas. Como son dos sustancias que se emplean en la calibración, entonces se tienen dos ecuaciones con dos incógnitas, las cuales se representan por:

$$\rho_1 = A + B\tau_1^2 \quad (3)$$

$$\rho_2 = A + B\tau_2^2 \quad (4)$$

Despejando A de la ecuación (3) y sustituyendo en la ecuación(4), tenemos:

$$\rho_2 - \rho_1 = B(\tau_2^2 - \tau_1^2) \quad (5)$$

Así

$$A = \rho_2 - B\tau_2^2 \quad (6)$$

$$B = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\tau_2^2 - \tau_1^2} \quad (7)$$

Entonces el error en B es:

$$\Delta B = \left[\left(\frac{\partial B}{\partial \rho_2} \right)^2 (\Delta \rho_2)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \rho_1} \right)^2 (\Delta \rho_1)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \tau_2} \right)^2 (\Delta \tau_2)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \tau_1} \right)^2 (\Delta \tau_1)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

Resolviendo cada derivada:

$$\left[\frac{\partial B}{\partial \rho_2} \right] = \frac{1}{\tau_2^2 - \tau_1^2} \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial B}{\partial \rho_1} \right] = -\frac{1}{\tau_2^2 - \tau_1^2} \quad (10)$$

$$\left[\frac{\partial B}{\partial \tau_2} \right] = -\frac{(\rho_2 - \rho_1)(2\tau_2)}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)^2} \quad (11)$$

$$\left[\frac{\partial B}{\partial \tau_1} \right] = \frac{(\rho_2 - \rho_1)(2\tau_1)}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)^2} \quad (12)$$

Por lo que:

$$\Delta B = \left[\left(\frac{1}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)} \right)^2 (\Delta \rho_2)^2 + \left(\frac{1}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)} \right)^2 (\Delta \rho_1)^2 + \left(\frac{(\rho_2 - \rho_1)(2\tau_2)}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)^2} \right)^2 (\Delta \tau_2)^2 + \left(\frac{(\rho_2 - \rho_1)(2\tau_1)}{(\tau_2^2 - \tau_1^2)^2} \right)^2 (\Delta \tau_1)^2 \right] \quad (13)$$

Y el error en A es:

$$\Delta A = \left[\left(\frac{\partial A}{\partial \rho_2} \right)^2 (\Delta \rho_2)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial B} \right)^2 (\Delta B)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \tau_2} \right)^2 (\Delta \tau_2)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

Resolviendo cada derivada

$$\left(\frac{\partial A}{\partial B} \right) = -\tau_2^2 \quad (15)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial \tau_2} \right) = -2B\tau_2^2 \quad (16)$$

Por lo que:

$$\Delta A = \left[(\Delta \rho_2)^2 + (\tau_2^2)^2 (\Delta B)^2 + (2B\tau_2)^2 (\Delta \tau_2)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

Ejemplo:

Para calcular el error en la densidad se tiene que:

$$\rho_1 = 0.9956474 \text{ g/cm}^3$$

$$\tau_1 = 2862.2169$$

$$\rho_2 = 0.897 \text{ g/cm}^3$$

$$\tau_2 = 2957.8937$$

$$\Delta \rho_1 = 5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$$

$$\Delta \tau_1 = 3 \times 10^{-4}$$

$$\Delta \rho_2 = 5 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$$

$$\Delta \tau_2 = 9 \times 10^{-4}$$

Así las densidades obtenidas en éste trabajo son precisas dentro de $\pm 0.0002 \text{ g/cm}^3$.

Siguiendo el mismo procedimiento, se determinó la precisión de la tensión superficial del método de elevación capilar y el método de gota pendiente y del índice de estabilidad de espuma; así para el método de elevación capilar es de $\pm 0.15 \text{ mN m}^{-1}$ y el de gota pendiente es de $\pm 0.50 \text{ mN m}^{-1}$ y para el índice de estabilidad de espuma es de $\pm 0.2 \text{ s}$.

Figura	Descripción	Página
Figura 1.1	Representación esquemática de los tres ambientes (monómero, micela y película adsorbida) en el cual las moléculas del tensoactivo conviven en el agua arriba de la CMC.	5
Figura 1.2	Formación de estructuras posibles en una solución de tensoactivo.	6
Figura 1.3	Propiedades físicas <i>versus</i> concentración	8
Figura 1.4	Formas de los agregados: esfera (a), hexagonal (b), inversa (c), disco (d) y elipse (e).	9
Figura 1.5	Representación esquemática de la adsorción de tensoactivos sobre una nueva interfase aire/agua durante la formación de la espuma como resultado de la formación de micelas (micelas estables implica un flujo menor de monómeros y un volumen bajo de espuma).	12
Figura 1.6	Tensión superficial dinámica de una interfase nueva como función del tiempo de vida de la burbuja.	13
Figura 1.7	Representación esquemática de los efectos Gibbs – Marangoni. (a). película sin estiramiento (b) película estirada. Una película estirada contiene áreas localizadas de alta tensión superficial, γ [1]. El flujo de las moléculas del tensoactivo de la fase bulto [2] a la superficie (efecto Gibbs) y adelante de la interfase [3] (efecto Marangoni) de la película estirada.	14
Figura 1.8	Efecto en las propiedades de superficie del tetrametil cloruro de amonio a una concentración de 150 mM de dodecil sulfato de sodio, a 298.15 K (Patist et al., 1998).	16
Figura 1.9	Resultados experimentales de tensión superficial y estabilidad de espuma para el sistema C4E2 + n-hexadecano, como función de la temperatura (Trejo y Kronbery, 1977).	17
Figura 1.10	Altura de la columna cilíndrica de espuma del sistema 2-butoxietanol + agua en función de la fracción mol del alcohol, a varias temperaturas (Elizalde et al., 1988).	17
Figura 1.11	Tensión superficial dinámica de líquidos puros: (a) para un líquido no polar; los efectos de tensión superficial dinámica están controladas por la velocidad de difusión de las moléculas del bulto a la nueva superficie; (b) en líquidos polares, la situación es más complicada por la orientación de las moléculas en la interfase.	18
Figura 1.12	Efecto de la tensión superficial dinámica en una solución de tensoactivo: (a) una superficie en equilibrio; (b) cuando la superficie es alargada, se adicionan más moléculas de tensoactivo para difundirse en la nueva superficie, temporalmente reducen la concentración del tensoactivo por debajo de la superficie.	19
Figura 1.13	Moléculas polares en solución. Se orientan en la superficie y en la interfase para minimizar la energía interfacial total del	19

	sistema.	
Figura 1.14	Variación de la concentración del componente i con la coordenada z .	22
Figura 1.15	Figura esquemática de la isoterma de Langmuir.	31
Figura 1.16	Figura esquemática de la isoterma de Brunauer, Emmett y Teller (BET).	32
Figura 2.1	Diagrama esquemático del sistema difusivo.	35
Figura 3.1	Intervalos de tiempo para cada método experimental.	47
Figura 3.2	Tensiómetro de tubos capilares.	49
Figura 3.3	Sistema dinámico de ángulo de contacto FTA200.	50
Figura 3.4	Captura de la imagen.	51
Figura 3.5	Dimensiones de la gota.	52
Figura 3.6	Equipo para analizar la estabilidad de espuma.	56
Figura 3.7	Formación de espuma.	58
Figura 3.8	Diagrama esquemático del densímetro sistema Picker.	59
Figura 4.1	Tensión superficial del agua, en función de la temperatura.	66
Figura 4.2	Tensión superficial de la DEA, en función de la temperatura.	67
Figura 4.3	Tensión superficial de la MDEA, en función de la temperatura.	67
Figura 4.4	Tensión superficial de DEA acuosa, en función de la concentración y temperatura.	69
Figura 4.5	Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 313.15 K.	72
Figura 4.6	Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 313.15 K.	73
Figura 4.7	Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 333.15 K.	73
Figura 4.8.	Presión superficial de DEA + agua, en función del % masa de DEA, a 343.15 K.	74
Figura 4.9	Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 313.15 K.	77
Figura 4.10	Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 323.15 K.	77
Figura 4.11	Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 333.15 K.	78
Figura 4.12	Presión superficial de MDEA + agua, en función del % masa de MDEA, a 343.15 K.	78
Figura 4.13	Tensión superficial de MDEA + DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	80
Figura 4.14	Presión superficial de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 293.15 K.	81
Figura 4.15	Presión superficial de Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 293.15 K.	82
Figura 4.16	Presión superficial de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 313.15 K.	82
Figura 4.17	Presión superficial de Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 313.15 K.	83

Figura 4.18	Presión superficial de brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de concentración y la temperatura.	85
Figura 4.19	Presión superficial del surfíno 485 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 323.15 K.	86
Figura 4.20	Presión superficial del surfíno 485 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 333.15 K.	87
Figura 4.21	Presión superficial del surfíno 485 en DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 343.15 K.	87
Figura 4.22	Presión superficial de equilibrio del surfíno 485 + MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 323.15 K.	89
Figura 4.23	Presión superficial de equilibrio del surfíno 485 + MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 333.15 K.	89
Figura 4.24	Presión superficial de equilibrio del surfíno 485 + MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 343.15 K.	90
Figura 4.25	Tensión superficial de equilibrio del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	92
Figura 4.26	Tensión superficial de equilibrio del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	92
Figura 4.27	Presión superficial de equilibrio del tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	94
Figura 4.28	Presión superficial de equilibrio del tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	94
Figura 4.29	Tensión superficial de equilibrio del surfíno DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	96
Figura 4.30	Tensión superficial de equilibrio del surfíno 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.	96
Figura 4.31	Presión superficial de equilibrio del surfíno DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	97
Figura 4.32	Presión superficial de equilibrio del surfíno DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	97
Figura 4.33	Presión superficial de equilibrio del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 k.	99
Figura 4.34	Presión superficial de equilibrio del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.	99
Figura 4.35	Índice de estabilidad de espuma de DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	101
Figura 4.36	Volumen de la espuma de DEA + agua, en función de la	102

	concentración y temperatura.	
Figura 4.37	Índice de estabilidad de espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	103
Figura 4.38	Volumen de la espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	104
Figura 4.39	Índice de estabilidad de espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	106
Figura 4.40	Volumen de la espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	108
Figura 4.41	Índice de estabilidad de espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	109
Figura 4.42	Volumen de la espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	110
Figura 4.43	Índice de estabilidad de espuma del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	111
Figura 4.44	Volumen de la espuma del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	113
Figura 4.45	Volumen de la espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	114
Figura 4.46	Volumen de la espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	115
Figura 4.47	Tensión superficial <i>versus</i> el logaritmo de la concentración del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	118
Figura 4.48	Tensión superficial <i>versus</i> el logaritmo de la concentración del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	118
Figura 4.49	Tensión superficial del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	119
Figura 4.50	Tensión superficial del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.	119
Figura 4.51	Tensión superficial del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	120
Figura 4.52	Tensión superficial del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.	120
Figura 4.53	Adsorción superficial de exceso del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	130
Figura 4.54	Área superficial por molécula del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	130
Figura 4.55	Módulo de elasticidad de Gibbs del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	131
Figura 4.56	Adsorción superficial de exceso del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	133
Figura 4.57	Área superficial por molécula del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	133

Figura 4.58	Módulo de elasticidad de Gibbs del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	135
Figura 4.59	Tensión superficial dinámica de n-decanol en agua a una concentración de $1.33 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, a 295.15 K.	137
Figura 4.60	Presión superficial de n-decanol en agua, a una concentración de $1.33 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$, a 295.15 K.	137
Figura 4.61	Presión superficial de equilibrio del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 313.15 K.	142
Figura 4.62	Gráfica de C_s vs $(t-\tau)^{1/2}$, a diferentes tiempos máximos (56.7; 47.6; 40.6 y 35.8 segundos), Área = $(2.34 \times 10^{-6}; 1.70 \times 10^{-6}; 1.31 \times 10^{-6}$ y $1.06 \times 10^{-6}) \text{ mol s}^{1/2}/\text{cm}^3$, $D = (6.37 \times 10^{-10}; 6.30 \times 10^{-10}; 6.52 \times 10^{-10}$ y $6.77 \times 10^{-10}) \text{ cm}^2/\text{s}$.	143
Figura 4.63	Mecanismos de los tiempos de relajación (τ_1 y τ_2) para una solución de tensoactivo sobre la CMC.	153
Figura 4.64	Efecto de la estabilidad micelar en la tensión superficial dinámica.	154
Figura 4.65	Efecto de la espumabilidad de una solución al 2 Mm de Simperonic A7, Brij 92 y Simperonic A50 (a y b), y tensión superficial dinámica en función del tiempo de vida de la burbuja a la misma concentración y los tres tensoactivos (c).	156
Figura 4.66	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.	159
Figura 4.67	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función del tiempo, a 333.15 K.	160
Figura 4.68	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función del tiempo, a 343.15 K.	160
Figura 4.69	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.	161
Figura 4.70	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función del tiempo, a 333.15 K.	161
Figura 4.71	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función del tiempo, a 343.15 K.	162
Figura 4.72	Módulo de elasticidad de Marangoni para el Brij 92 y Tween 80 + agua, en función del tiempo, a 313.15 K.	162
Figura 4.73	Módulo de elasticidad de Marangoni para el SurfínoI DF110-D y SurfínoI 485 + agua, en función del tiempo, a 313.15 K.	163
Figura 4.74	Módulo de elasticidad de Marangoni para el Brij 92 y Tween 80 + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.	163
Figura 4.75	Módulo de elasticidad de Marangoni para el SurfínoI DF110-D y SurfínoI 485 + agua, en función del tiempo, a 323.15 K.	164
Figura 4.76	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 313.15 K.	164
Figura 4.77	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 323.15 K.	165
Figura 4.78	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 313.15 K.	165

Figura 4.79	Módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función del tiempo, a 323.15 K.	166
Figura 4.80	Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función de la altura de la espuma y la temperatura.	168
Figura 4.81	Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función de la altura de la espuma y la temperatura.	169
Figura 4.82	Módulo de elasticidad de Marangoni del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la altura de la espuma y la temperatura.	171
Figura 4.83	Altura de la espuma de cuatro tensoactivos no iónicos, en función del tiempo, a 313.15 K.	172
Figura 4.84	Altura de la espuma de cuatro tensoactivos no iónicos, en función del tiempo, a 323.15 K.	173
Figura 4.85	Tensión superficial de equilibrio de dos aminas en agua, en función de la concentración, a 313.15 K.	174
Figura 4.86	Índice de estabilidad de espuma de dos aminas en agua, en función de la concentración, a 313.15 K.	174
Figura 4.87	Tensión superficial de equilibrio de cinco tensoactivos + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	175
Figura 4.88	Índice de estabilidad de espuma de cuatro tensoactivos + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	176

Tabla	Descripción	Página
Tabla 4.1	Nombre y estructura química	62
Tabla 4.1a	Propiedades físicas, a 298.15 K.	63
Tabla 4.2	Tensión superficial de equilibrio del agua, en función de la temperatura.	65
Tabla 4.3	Tensión superficial de equilibrio de DEA, en función de la temperatura.	65
Tabla 4.4	Tensión superficial de equilibrio de MDEA, en función de la temperatura.	66
Tabla 4.5	Tensión superficial de equilibrio de DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	68
Tabla 4.6	Tensión superficial de equilibrio de DEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 313.15 K.	70
Tabla 4.7	Tensión superficial de equilibrio del sistema DEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 323.15 K.	70
Tabla 4.8	Tensión superficial de equilibrio del sistema DEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 333.15 K.	71
Tabla 4.9	Tensión superficial de equilibrio de DEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 343.15 K.	71
Tabla 4.10.	Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 313.15 K.	75
Tabla 4.11	Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 323.15 K.	75
Tabla 4.12	Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 333.15 K.	76
Tabla 4.13	Tensión superficial de equilibrio de MDEA + H ₂ O, en función de la concentración, a 343.15 K.	76
Tabla 4.14	Tensión superficial de equilibrio de MDEA + DEA + agua, a una concentración total del 50 % masa de las dos aminas, en función de la concentración y la temperatura.	80
Tabla 4.15	Tensión superficial de equilibrio de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa y Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 293.15 K.	81
Tabla 4.16	Tensión superficial de equilibrio de Span 20 + DEA acuosa al 20 % masa y Span 80 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 313.15 K.	81
Tabla 4.17	Tensión superficial de equilibrio del brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 323.15 K.	84
Tabla 4.18	Tensión superficial de equilibrio del brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 333.15 K.	84
Tabla 4.19	Tensión superficial de equilibrio del brij 92 + DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración, a 343.15 K.	84
Tabla 4.20	Tensión superficial de equilibrio del surfínol 485 en DEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración y la temperatura.	86

Tabla 4.21	Tensión superficial de equilibrio del surfínol 485 en MDEA acuosa al 20 % masa, en función de la concentración y la temperatura.	88
Tabla 4.22	Tensión superficial de equilibrio del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	91
Tabla 4.23	Tensión superficial de equilibrio del tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	93
Tabla 4.24	Presión superficial de equilibrio del tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	95
Tabla 4.25	Tensión superficial de equilibrio del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	95
Tabla 4.26	Valores experimentales de tensión superficial de equilibrio del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	98
Tabla 4.27	Índice de estabilidad de espuma de DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	100
Tabla 4.28	Volumen de la espuma de DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	102
Tabla 4.29	Índice de estabilidad de espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	103
Tabla 4.30	Volumen de la espuma de MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	104
Tabla 4.31	Índice de estabilidad de espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	106
Tabla 4.32	Volumen de la espuma del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	107
Tabla 4.33	Índice de estabilidad de espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	109
Tabla 4.34	Volumen de la espuma del surfínol 485 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	110
Tabla 4.35	Índice de estabilidad de espuma del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	111
Tabla 4.36	Volumen de espuma del surfínol DF110-D + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	112
Tabla 4.37	Índice de estabilidad de espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	113
Tabla 4.38	Volumen de la espuma del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	114
Tabla 4.39	Eficiencia y factor de expansión del brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	116
Tabla 4.40	Eficiencia y factor de expansión del brij 92 + MDEA/DEA	116

	acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.	
Tabla 4.41	Eficiencia y factor de expansión del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	116
Tabla 4.42	Eficiencia y factor de expansión del ocnol + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 323.15 K.	116
Tabla 4.43	Propiedades superficiales del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	121
Tabla 4.44	Propiedades superficiales del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	121
Tabla 4.45	Concentración micelar crítica de la serie homóloga estudiada por Rosen et al. (1982).	122
Tabla 4.46	Parámetros termodinámicos de micelización del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	123
Tabla 4.47	Parámetros termodinámicos de micelización del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	124
Tabla 4.48	Parámetros termodinámicos de adsorción del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	125
Tabla 4.49	Parámetros termodinámicos de adsorción del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la temperatura.	125
Tabla 4.50	Presión superficial a dilución infinita $(\Pi/x)_{x \rightarrow 0}$ (H ₂ O), y energía estándar de adsorción ΔG_{ad}^0 para n-alcoholes, a 293.15 K (Klint et al., 1968).	126
Tabla 4.51	Energía estándar de adsorción de la serie homóloga estudiada por Rosen et al, 1982.	127
Tabla 4.52	Propiedades de superficie del brij 92 en MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	129
Tabla 4.53	Propiedades de superficie del tween 80 en MDEA/ DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K	132
Tabla 4.54	Coefficiente de difusión del n-decanol en agua, con datos de tensión superficial dinámica a una sola concentración y 295.15 K.	138
Tabla 4.55	Coefficiente de difusión y de la literatura de DEA en agua, en función de la concentración y la temperatura.	139
Tabla 4.56	Coefficiente de difusión y de la literatura de MDEA en agua, en función de la concentración y la temperatura.	140
Tabla 4.57	Coefficiente de difusión de cuatro tensoactivos no iónicos en agua, en función de la temperatura, a una concentración de 2.51×10^{-4} mol dm ⁻³ .	140
Tabla 4.58	Parámetros de la ecuación de estado de Langmuir para el sistema Brij 92 + MDEA/DEA acuosa.	142
Tabla 4.59	Coefficiente de difusión del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 1.16×10^{-6} mol cm ⁻³ , a 313.15 K	144
Tabla 4.60	Coefficiente de difusión del Brij 92 en MDEA/DEA acuosa, a 1.27×10^{-7} mol cm ⁻³ , a 323.15 K.	144
Tabla 4.61	Coefficiente de difusión del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a 1.03×10^{-6} mol cm ⁻³ , a 313.15 K.	145

Tabla 4.62	Coefficiente de difusión del Tween 80 en MDEA/DEA acuosa, a $1.03 \times 10^{-6} \text{ mol cm}^{-3}$, a 323.15 K.	146
Tabla 4.63	Pendientes obtenidas con valores de la tensión superficial dinámica y coeficientes de difusión, en función de la temperatura para di-(C6-Glu) + agua, a una concentración de $5 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$.	148
Tabla 4.64	Energía de activación, E_a , del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15.	149
Tabla 4.65	Energía de activación, E_a , del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15.	149
Tabla 4.66	Datos termodinámicos y cinéticos del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	151
Tabla 4.67	Datos termodinámicos y cinéticos del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	152
Tabla 4.68	Tiempo de relajación micelar, τ_2 , del Brij 92 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	157
Tabla 4.69	Tiempo de relajación micelar, τ_2 , del Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración, a 313.15 K.	157
Tabla 4.70	Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema DEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	167
Tabla 4.71	Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni para el sistema MDEA + agua, en función de la concentración y la temperatura.	167
Tabla 4.72	Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni de cuatro tensoactivos no iónicos en agua.	169
Tabla 4.73	Máximo del módulo de elasticidad de Marangoni del Brij 92 y Tween 80 + MDEA/DEA acuosa, en función de la concentración y la temperatura.	170
Tabla 4.74	Parámetros de ajuste para correlacionar la tensión superficial de componentes puros, sistemas binarios y sistemas ternarios.	176