



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
QUÍMICAS**

Comportamiento y Predicción de Espumas Transitorias. Sistemas Binarios

TESIS
PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

I. Q. María Guadalupe Lemus Barajas



TUTOR: Dr. Jesús Gracia Fadrique
AÑO: 2007



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.

Objetivo	1
Introducción	2
Capítulo 1: Espumas	4
1.1.- Geometría de una Espuma	5
1.2.- Fisicoquímica de una Espuma	8
1.3.- Métodos de Preparación de Espumas	9
1.4.- Clasificación de Estabilidad de Espuma	9
1.4.1.- Espumas Persistentes	10
1.4.2.- Espumas Transitorias	10
1.5.- Espumas Líquidas	11
1.5.1.- Características	11
1.5.2.- Propiedades de Espumabilidad	12
1.6.- Medida de Espumabilidad (Espuma Transitoria)	13
1.6.1.- Índice de Espumabilidad de Bikerman	13
Capítulo 2: Propiedades Fisicoquímicas de los Sistemas a Estudiar	
2.1.- Alcoholes	15
2.1.1.- Solubilidad	17
2.1.2.- Actividad Superficial	18
2.2.- Alcanolaminas	22
2.2.1.- Propiedades Físicas	23
2.2.2.- Propiedades Químicas	25
2.2.3.- Actividad Superficial	27

2.3.- Glimas	29
2.3.1.- Actividad Superficial	30
2.4.- Glicoéteres CmEn	33
2.4.1.- Solubilidad	34
2.4.2.- Actividad Superficial	34

Capítulo 3: Desarrollo del Modelo de Predicción de la Estabilidad de Espuma

3.1.- Efecto Marangoni	38
3.2 – Modulo de Elasticidad de Gibbs	39
3.3.- Desarrollo de Modelo Propuesto	43
3.4.- Espuma del Tipo Gas Ideal Bidimensional	48
3.4 – Espuma del Tipo Langmuir	51
3.5 – Espuma de Tipo Langmuir Extendida	54

Capítulo 4: Desarrollo Experimental

4.1 – Reactivos	60
4.2 – Tensión Superficial	62
4.3 – Medición de la Estabilidad de Espuma	65
4.4. – Calculo de Modulo de Elasticidad de Gibas	68

Capítulo 5: Resultados y Análisis

5.1 – Tensión Superficial	69
5.1.1 – Validación del Método de Presión Máxima de Burbuja	69
5.1.2 – Alcoholes	70
5.1.3 – Alcanolaminas	74
5.1.4 – Glimas y Glicoéteres	76
5.2 – Índice de Estabilidad de Espumas Transitorias	81

5.3.- Resultados del Modelo	88
5.4.- Estimación de la Incertidumbre de los Valores Obtenidos con el Modelo Propuesto	119
5.4.1.- Evaluación de la Incertidumbre Típica Combinada	119
5.4.2.- Estimación del la Incertidumbre en el Cálculo del Modulo de Elasticidad de Gibbs.	121
Conclusiones	125
Trabajos Futuros	126
Bibliografía	127
Anexo I	

Objetivo

Determinar experimentalmente el comportamiento de espumas transitorias de familias homologas de n-alcoholes C_m ($1 < m < 8$), alcanolaminas (MEA, DEA, AMP), éteres monoalquílicos de polietilenglicol C_mE_n con ($1 < m < 8$ y $1 < n < 5$) y poliéteres lineales en agua y su pronostico mediante el modulo de elasticidad de Gibbs, la ecuación de Langmuir extendida y empleando valores de equilibrio de energía de superficies en relación a la composición (σ vs x).

Introducción

Al contemplar la cerveza contenida en un vaso, podemos admirar como las burbujas de gas surgen desde el fondo, se elevan y se apilan en la superficie. Cuando el líquido contenido entre las películas de las burbujas drena, observamos como las burbujas se empaquetan más y más en forma de elegantes celdas poliédricas. Este cambio gradual en el arreglo local es alternado por el colapso de la espuma, cuando sus películas individuales estallan.

La capacidad de un líquido para convertirse en una espuma requiere del equilibrio de fuerzas poco comprendidas. Aunque las espumas acuosas han sido objeto de investigación científica desde el siglo XVII, aun queda mucho por conocer acerca de los complejos fenómenos químicos y físicos que se producen. El objetivo de este trabajo es estudiar y predecir el comportamiento de espumas transitorias en sistemas acuosos, utilizando valores de equilibrio de tensión superficial con respecto a la concentración, mediante la construcción de un modelo en base al modulo de elasticidad de Gibbs, la ecuación de adsorción de Gibbs y una ecuación de estado de superficie. La ecuación de estado que nos mostró el mejor resultado, fue la ecuación de Lagmuir Extendida.

El presente trabajo se divide en una introducción general acerca de las espumas, su clasificación, características físicas, fisicoquímicas, métodos de preparación, propiedades: como son la espumabilidad y habilidad para formar espuma. En otra sección se presenta las propiedades de los compuestos estudiados: n-alcoholes, alcanolaminas, glimas y glicoéteres. Una de las partes más importantes de este trabajo es el desarrollo teórico y matemático para la obtención de un modelo de predicción del comportamiento de una espuma transitoria. El desarrollo experimental para la determinación de la tensión superficial por el

método de presión máxima de burbuja para los sistemas a estudio y la medida de la estabilidad de espuma. Por ultimo se presentan los resultados y su análisis donde se puede observar que el modelo propuesto para la predicción del comportamiento de las espumas transitorias es satisfactorio para los sistemas estudiados.

CAPITULO 1

1. Espumas

Las espumas son dispersiones de burbujas de gas en un líquido, donde el tamaño de las burbujas es del orden de 1 a 1000 nanómetros. Si bien una espuma es una dispersión de burbujas relativamente grandes, su clasificación dentro de los sistemas coloidales proviene de la película delgada de líquido llamada lámel (figura 1.1.) (película doble de moléculas de anfifilo en cuyo interior se ubica la solución del líquido) que mantiene separadas las fases líquida y gaseosa; son las paredes que forman la estructura de la espuma.

En 1953, Manegold^a propuso la clasificación de espumas en dos clases morfológicas: Las espumas poliédricas o espumas secas (polyederschoum), las cuales están formadas por burbujas de gas rodeadas de películas delgadas de líquido, las cuales adquieren la forma de celdas poliédricas. Los puntos de unión entre celdas son conocidos como bordes de Plateau (figura 1.1), que juegan una importante función en el proceso de drenado de la espuma. La segunda clasificación son las espumas esféricas o espumas húmedas (Kugelschoum), las cuales son sistemas formados de pequeñas burbujas de gas de forma esférica que se encuentran separadas por una capa de un líquido viscoso. Esta clase de espuma puede ser clasificada como una dispersión diluida de burbujas de gas en un líquido. Con el tiempo, la estructura cambia y las burbujas se transforman en celdas poliédricas. En una columna típica de una espuma (figura 1.2), pueden coexistir ambas estructuras.

^a Manegold, E. "Schaum, Strassenbau, Chemie und technik" Heidelberg, 1953. Myers Drew Surfaces, Interfaces, and Colloids VCH, USA, 1991

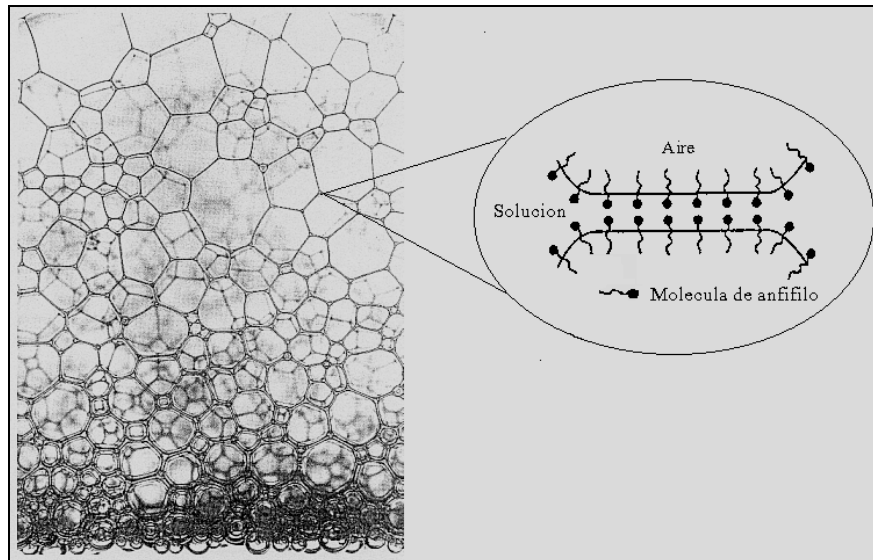


Figura 1.1.- Estructura de una espuma.

1.1 Geometría de una Espuma.

Las películas individuales que constituyen las paredes de las celdas de la espuma son superficies lisas con curvatura uniforme. Una película es plana únicamente cuando las presiones en las dos celdas adyacentes son idénticas; una película curva indica una diferencia de presión entre dos celdas adyacentes. La presión es mayor en la celda del lado cóncavo a la superficie.

La característica principal de una espuma, es la complejidad de su forma geométrica y los principios físicos que la determinan. El físico Frances Joseph Antoine Ferdinand Plateau^b fue el primero en observar estas características y estableció que los bordes de una espuma o bordes de Plateau (figura. 1.3.) presentan una curvatura convexa debido a que existe una diferencia de presión entre celdas

^b Plateau, J. A. F., "Statique Expérimentale et Théorique des Liquides soumis aux seules Forces Moléculaires", 2 vols. Gauthier-Villars, Paris 1873.

adyacentes; la presión en estos sitios es menor y se genera un efecto de succión capilar que provoca que el líquido fluya de la parte central de la película hacia el borde. Este fenómeno causa que la película se adelgace y sea más susceptible a la ruptura

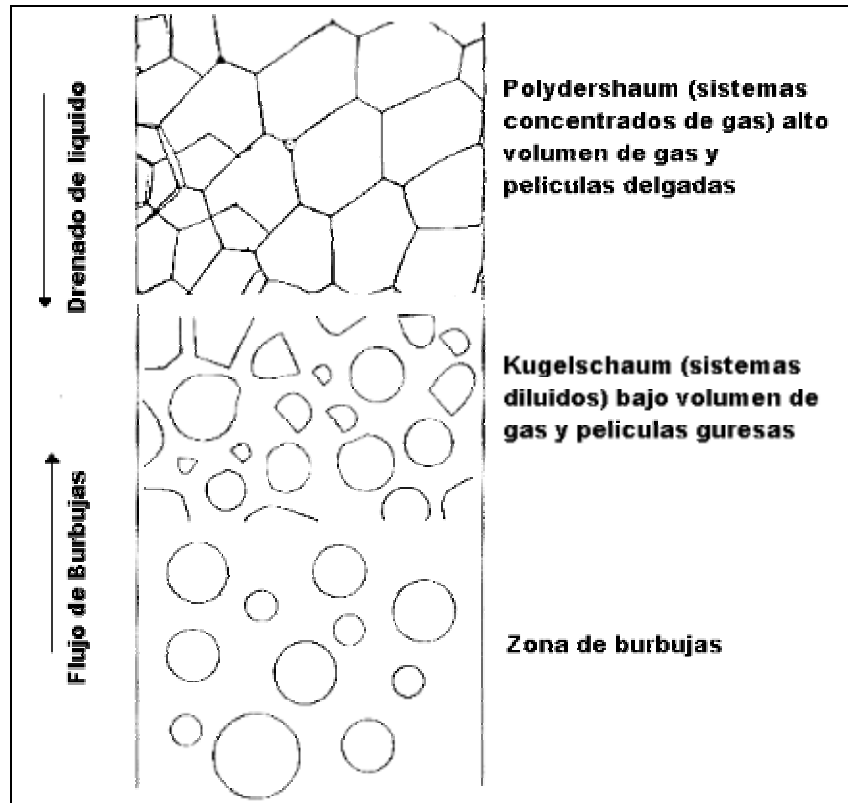


Figura 1.2.- Estructura de un espuma durante su formación y drenado en una columna^c.

Dentro de cada borde de Plateau existe un equilibrio de fuerzas que sostiene la estructura de una espuma; argumentos matemáticos complejos demuestran que todos los bordes de Plateau deben constar sólo de tres películas para minimizar la energía y balancear las fuerzas que actúan sobre todo el sistema, por lo que cuando tres películas producen estos bordes, los ángulos entre ellas son iguales a 120° .

La minimización de la energía y el equilibrio de fuerzas impone otro principio que gobierna la geometría de una espuma poliédrica: la unión de cuatro bordes de Plateau siempre tiene una forma de un vértice de un tetraedro de manera que el ángulo que forman dos bordes cualesquiera es igual a 109° .

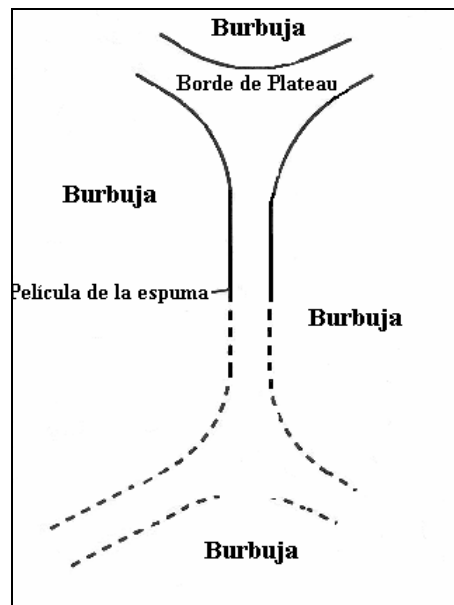


Figura 1.3.- Borde de Plateau.

1.2. Físicoquímica de una Espuma.

Líquidos puros no pueden formar espuma a menos que un segundo componente de características anfílicas este presente. Cuando una burbuja de gas es introducida bajo la superficie de un líquido puro, esta explota tan pronto como la burbuja abandona el líquido. Sin embargo, en soluciones donde un agente anfílico esta presente, existe una adsorción desde la fase acuosa hacia la superficie debida al carácter hidrofóbico e hidrofílico del anfífilo. Como la densidad de las burbujas es menor, estas ascienden a la superficie y ahí se rodean de una segunda capa de moléculas adsorbidas con una solución líquida intermedia (lamela) que evitan que las burbujas se rompan rápidamente (figura 1.4.)

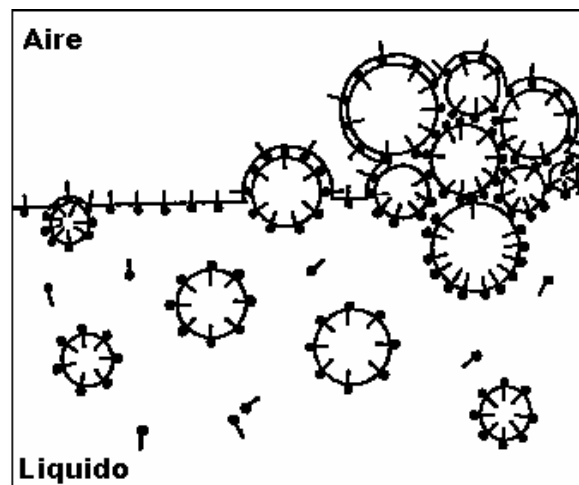


Figura 1.4.- Formación de una espuma en una solución acuosa de anfífilo.

1.3. Métodos de Preparación de Espumas

Una espuma puede ser formada por diferentes caminos. Un método tradicional de preparación de espumas es mediante la técnica de dispersión de un gas dentro de una solución de anfifilo, por medio de agitación o batido mecánico. Este método es fácil pero poco controlable y proporciona una amplia distribución en el tamaño de las burbujas. Otro método consiste en pasar un flujo de gas dentro de un líquido a través de un tubo de diámetro reducido o vía un objeto poroso, el incremento de la altura de la espuma es linealmente proporcional al intervalo de flujo de gas. Este es un método controlable y produce espumas monodispersas. Otra alternativa para la producción de espumas es por nucleación de burbujas de gas. Estas pueden ser obtenidas por supersaturación del líquido con el gas o por la producción de un gas *in situ* (por ejemplo: en una reacción química o la espuma de la cerveza). Este método produce espumas con tamaños de partícula homogéneos. Por lo anterior, la estructura de una espuma depende del método de preparación.

1.4. Clasificación de la Estabilidad de Espumas.

Todas las espumas son termodinámicamente inestables, debido a que contienen una gran área superficial y una mayor energía libre superficial que la que presenta el aire segregado y la solución líquida, de manera que tienden a colapsar espontáneamente. Con base al grado de estabilidad (tiempo de vida de la burbuja) que alcanzan las burbujas, se pueden clasificar en espumas inestables o transitorias (dinámicas, evanescentes), con periodos de vida de algunos segundos y en espumas metaestables o persistentes (estáticas), con vidas que pueden ser medidas en días.

1.4.1. Espumas Persistentes

Las espumas preparadas con tensoactivos, detergentes, proteínas, ácidos grasos de cadenas largas y/o partículas, presentan un intervalo de vida de minutos a algunas horas. Generalmente la vida de estas espumas se incrementa exponencialmente con la adición del componente con actividad superficial. En estos sistemas el tiempo de adelgazamiento de la película es relativamente corto comparado con el tiempo de vida de la espuma y la estabilidad es controlada por un balance de fuerzas interfaciales, el cual equilibra a las películas después de que el líquido drena de ellas^c. Estas espumas, después de suspender el flujo de gas o la agitación, no se abaten y en ausencia de perturbaciones externas como evaporación, vibración, gradientes de temperatura y difusión del gas pueden permanecer estables indefinidamente.

1.4.2. Espumas Transitorias

Las espumas producidas por soluciones acuosas de anfifilos de bajo peso molecular presentan una vida media del orden de segundos. Estas espumas desaparecen cuando el flujo de gas que las produce es interrumpido, como consecuencia son sensibles a la concentración del anfifilo y generalmente muestran un valor máximo a una concentración característica.

^c R. J. Pugh . Adv."Foaming, foam films, antifoaming and defoaming". Colloid Interface Sci. 64 (1996) 67-142

1.5. Espumas Líquidas

1.5.1. Características

Las espumas líquidas en sistemas acuosos están constituidas generalmente por una relación mayor al 95% de aire y solamente un 5% de líquido; el 99% de este líquido suele ser agua. El 1 % restante esta constituido por agentes anfílicos y otros aditivos tales como alcoholes y polímeros.

El colapso de la espuma ocurre en la capa superior (15 mm) que sólo posee un 0.5% de líquido y tiene películas especiales. Algunas de sus características son: i) las coberturas superficiales no corresponden al equilibrio; ii) están en contacto con la atmósfera, su solución drena y no recibe líquido de capas superiores; iii) resisten choques de presión y gotas de aerosol cuando las películas vecinas se rompen; iv) sufren movimientos y reacomodo por las burbujas que entran a esta capa. La duración de las películas de líquido de la parte superior de la espuma y su habilidad para inducir fuerzas viscoelásticas que amortigüen todas estas condiciones (propiedades superficiales dinámicas de equilibrio) determina la estabilidad de la espuma total^d.

Otros factores que afectan la formación y estabilidad de una espuma son la fracción del volumen de gas, la solubilidad del gas en la fase líquida, la temperatura la presión ambiente, las propiedades interfaciales relacionadas con la concentración y el tipo de anfífilo, etc.

^d Malysa et al . “Surface Elasticity and Dynamic Stability of Wet Foams”. Colloids and Surfaces, 16 (1985) 9-20

1.5.2. Propiedades de Espumabilidad

Las espumas líquidas poseen estructuras características y propiedades específicas en el caso de las espumas transitorias, la propiedad más estudiada es su espumabilidad, o la tendencia de un líquido para formar y mantener una espuma. Para espumas persistentes como tiene un tiempo de vida largo, su espumabilidad puede determinarse tanto con su habilidad para formar espumas, como con su estabilidad. Un experimento típico para determinar la espumabilidad de una espuma persistente consiste en burbujear un gas a través de la solución y producir un cierto volumen de espuma que se incrementa con el tiempo. La habilidad se asocia comúnmente con el volumen máximo generado de espuma para un determinado tiempo o con la pendiente del volumen de espuma-flujo de gas. La estabilidad se ha determinado con numerosos métodos y equipos arbitrarios como el tiempo de vida de burbujas sencillas y el tiempo de colapso de la espuma luego de formarla por agitación, la relación entre la altura de la espuma y el flujo de aire inyectado, la altura de la espumas que se mantiene luego de cinco segundos de agitación. Para espumas persistentes la estabilidad se obtiene fijando un volumen de espuma formada y determinando el tiempo medio de colapso de esta columna^e. Cualquiera que sea el caso, se encuentra que el volumen formado depende del método de formación y su altura temporal se debe a un equilibrio estacionario entre sus velocidades de formación (habilidad) y colapso (estabilidad).

^e Bikerman, J.J. "Foams". Springer-Verlag. (1978)

1.6. Medida de Estabilidad (Espumas Transitorias)

1.6.1. Índice de Espumabilidad de Bikerman.

La unidad de espumabilidad para una espuma transitoria fue establecida por Bikerman^f en 1938 basándose en el hecho que la capacidad de formación de una espuma es una propiedad característica de un líquido (como la tensión superficial o la viscosidad) e independiente del aparato y procedimiento empleado (cantidad de líquido utilizado, geometría de la celda, etc). La unidad relaciona el volumen promedio estacionario de una espuma V formado en condiciones dinámicas y el flujo volumétrico F de gas inyectado a la solución. El símbolo utilizado para esta relación es Σ ($\alpha\pi\omega\nu\omicron\varsigma$, afroica del griego espuma). Al trazar la relación altura (h) o volumen de espuma (V) contra el flujo de gas (F), se observa que existe una relación lineal entre el flujo y el volumen de la espuma (a ciertos intervalos). La pendiente de esta curva es Σ .

$$\Sigma = \frac{V}{F} \quad (2)$$

La unidad de espuma Σ es el tiempo promedio de vida del gas dentro de la espuma y es característico de la composición original de la solución que ha sido forzada a mantener una espuma transitoria en estado estacionario. En el procedimiento general de medición; (llamado método dinámico de Bikerman figura 1.5), la espuma se forma por el paso de un gas a través de un vidrio poroso dentro de una solución. La altura de la espuma o volumen es medido mientras se continua burbujear el gas a un flujo determinado. Al modificar el flujo del gas se obtiene una nueva altura o volumen de espuma para un flujo dado. Este procedimiento se

^f Bikerman, J. J. "The Unit of Foaminess". Trans. Faraday Soc. 34, 634 (1938)

repite a otras composiciones. El comportamiento de Σ en función de la concentración, muestra un máximo a una concentración característica.

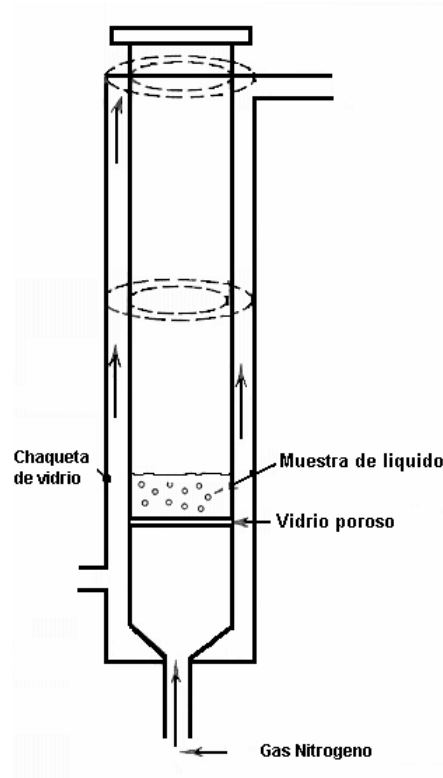


Figura 1.5.- Aparato de medición del índice de espumabilidad de Bikerman

CAPITULO 2

2.- Propiedades Físicoquímicas de los Sistemas a Estudiar

En este capítulo se presentan algunas de las propiedades físicas y químicas de los compuestos que se estudiarán en este trabajo tales como n-alcoholes, alcanolaminas, glicimas y glicoeéteres.

2.1.- Alcoholes

Los alcoholes son compuestos de fórmula general $R-OH$, donde R es cualquier grupo alquilo, incluso sustituido y OH es el grupo hidroxilo. Alrededor del grupo hidroxilo se mantiene la estructura tetraédrica: el ángulo $C-OH$ es de 109° , la longitud de enlace es de 0.96 \AA y la longitud de enlace para $C-O$ es de 1.43 \AA . Un alcohol se clasifica como primario, secundario o terciario, según el tipo de carbono unido al grupo $-OH$ (Figura 2.1.). Los grupos pueden ser de cadena abierta o cíclicos, pueden tener un doble enlace, un átomo de halógeno un anillo aromático o grupos hidroxilo adicionales.

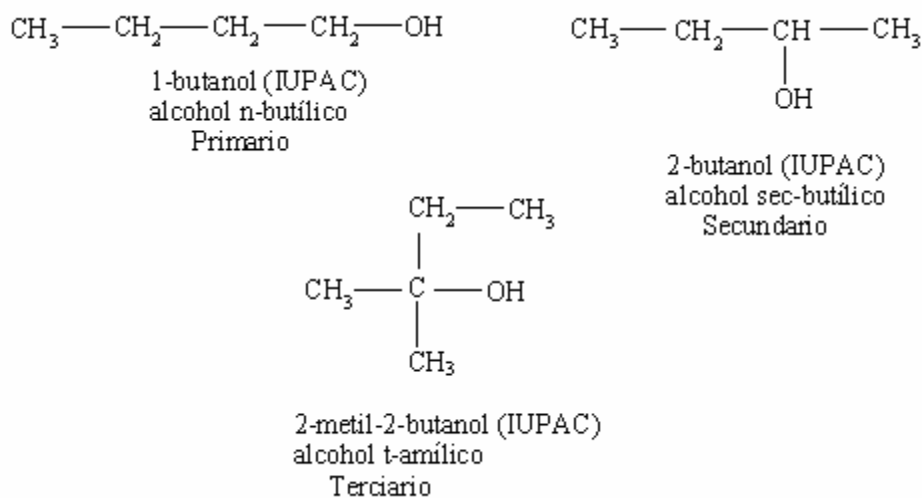


Figura 2.1.- Clasificación de Alcoholes.

Las propiedades termodinámicas de los alcoholes cambian regularmente conforme aumenta la cadena hidrocarbonada debido a que un alcohol está compuesto por un grupo hidrofóbico del tipo de un alcano y un grupo hidróxilo que es hidrofílico. De estas dos unidades estructurales, el grupo $-OH$ proporciona a los alcoholes sus propiedades físicas características y el alquilo es el que las modifica, dependiendo de su tamaño y forma^a (Tabla 2.1). El grupo $-OH$ es polar y lo más importante de este grupo es que es capaz de establecer puentes de hidrógeno con sus moléculas vecinas, ya sean neutras o cargadas.

Tabla 2.1.- Propiedades físicas de Alcoholes^a

	Metanol	Etanol	1-propanol	1-butanol	1-pentanol	1-hexanol	1-heptanol	1-octanol
Peso molecular (g/mol)	32.042	46.069	60.096	74.122	88.149	102.176	116.20	130.230
Densidad (kg/m ³) 25 °C	786.37	784.93	799.60	805.75	810.80	815.34	820.0	821.57
Tensión Superficial (mN/m) 25 °C	22.30	22.32(20)	23.45(20)	24.67(20)	25.60(20)	25.73	_____	26.92(24.3)
Solubilidad en agua % de soluto	Infinita	Infinita	Infinita	7.45%	2.19%	0.706%	0.1%	0.0538%
Punto de ebullición °K	337.696	351.443	370.301	390.875	411.133	430.2	_____	468.306

^a Riddick, J. A., Bunger, W. B., Sakano T. K., "Organic Solvents: Physical Properties and methods of purification". 4th. Ed. New York, Wiley (1986)

Los puntos de ebullición de los alcanos con pesos moleculares similares a los alcoholes son mucho más bajos debido a que las moléculas se mantienen unidas esencialmente por fuerzas de van der Waals. Sin embargo, los alcoholes tienen la habilidad de formar puentes de hidrógeno intermoleculares, por lo que se muestra un aumento en el punto de ebullición al aumentar el número de átomos de carbono y una disminución con la ramificación. Por ejemplo, el etanol, con peso molecular de 46, tiene un punto de ebullición de 351.4 K, mientras que el propano con un peso molecular de 44 tiene un punto de ebullición de 231.1 K. Estas diferencias en los puntos de ebullición indican que las interacciones entre las moléculas de etanol, son más fuertes que las interacciones entre las moléculas de propano. La energía necesaria para romper un puente de hidrógeno entre dos moléculas de agua o dos de alcohol en solución es proporcionada por la formación de un puente de hidrógeno entre una molécula de agua y otra de alcohol y es de aproximadamente 5 kilocalorías por mol.

2.1.1.- Solubilidad.

El agua y los alcoholes presentan un comportamiento similar como solutos debido al grupo hidroxilo contenido en su molécula que les permite formar puentes de hidrógeno. Los alcoholes forman puentes de hidrógeno con agua, por lo tanto tienden a ser relativamente solubles en agua. Sin embargo, esto es cierto sólo para los alcoholes de cadena corta, en los que el grupo hidroxilo $-OH$ referido como grupo hidrofílico, constituye una parte considerable de la molécula. Alcoholes con altos pesos moleculares, tienden a ser menos solubles en agua, porque la parte hidrocarbonada de la molécula, la cual es hidrofóbica es más larga con el incremento del peso molecular. El metanol, etanol y propanol son solubles en todas proporciones en agua, a partir del butanol existe miscibilidad parcial.

2.1.2.- Actividad Superficial.

La tensión superficial (σ) es una propiedad termodinámica que depende de la intensidad de las fuerzas intermoleculares en la superficie. El cambio de la tensión superficial en una mezcla binaria agua – n-alcohol es debida a la adsorción de moléculas de soluto en la superficie formando una monocapa del mismo tipo que la formada por ciertas sustancias insolubles en la interfase aire/agua, como en el caso de tensoactivos.

Los diagramas de fases de agua – n-alcohol y agua-tensoactivo no iónicos etoxilados muestran notables similitudes^b. La tensión superficial como función fracción mol del alcohol presentan cambios en la pendiente en un intervalo estrecho de composición como el caso de sistemas agua – tensoactivos.

Investigaciones usando dispersión de luz sugieren que los n-alcoholes de cadena corta se asocian en agua para formar agregados sobre un cierto intervalo de concentración, compartiendo algunas propiedades con las micelas de tensoactivos convencionales^c. Este intervalo inicia en la concentración de agregación crítica (cac) o fracción mol operacional (X_{op}). La tabla 2.2 muestra algunas concentraciones operacionales para los n-alcoholes, donde se observa que esta concentración disminuye conforme la cadena hidrocarbonada aumenta.

^b Kahlweit, M.; Bouse, , *J. J. Phys. Chem.* 1991, 95, 5580

^c Zana R.; Eljebari, M.J., “Fluorescence Probing Investigation of the Self-Association of Alcohols in Aqueous Solutions” *J. Phys. Chem.* 1993, 97, 11134-11136.

Tabla. 2.2.- Fracción mol operacional X_{op} , de agregación de los n-alcoholes a 25 °C

Alcohol	X_{op}
Metanol	0.63
Etanol	0.257 (0.16 [*])
1-Propanol	0.091 (0.070 [*] , 0.17 ^{**})

* Kahlweit, M.; Bouse, G.; Jen, J. J. Phys. Chem. 1991, 95, 5580

** Hayashi, H; Udagawa, Y Bull. Chem. Soc. Jpn. 1992, 65, 155.

En cuanto a su actividad superficial, series homologas de alcoholes alifáticos normales presentan un constante incremento en la actividad superficial por la adición del grupo metileno; cuando la serie aumenta, los n-alcoholes se adsorben fuertemente en la superficie al incrementar la porción alquílica^d. En 1967, Clint^e calculó la energía estándar de adsorción para los n-alcoholes y encontró que ésta es negativa (adsorción espontánea) y que su magnitud aumenta con el peso molecular de manera que los alcoholes de gran cadena alquílica como decanol llegan a formar monocapas. En la tabla 2.3 se presentan los valores de algunos parámetros termodinámicos calculados a partir de los datos de Clint.

^d Traube, I., Ann. 265, 27 1891 y Langmuir, I., J. Am. Chem. Soc. 39, 1848, 1917

^e Clint, J.H., Corkill J.M., Goodman J. F. & Tate J. R. (1969). J. of Colloid Interface Sci. (180-188) Academic Press.

Tabla 2.3.- Parámetros termodinámicos estándar de adsorción (kcal/mol) a 25°C de n-alcoholes en agua.

<i>Alcohol</i>	Metanol	Etanol	n-propanol	n-butanol	n-pentanol
ΔG_{ads}	-3.61	-4.27	-4.95	-5.58	-6.22
ΔH_{ads}	-0.80	-0.42	-0.10	-0.36	-1.05
$T\Delta S_{ads}$	2.82	3.85	4.86	5.22	5.17

Sokolowski^f reporta los valores de la concentración superficial de saturación Γ_{sat} (en moles/cm²) y el área transversal A^s (Å²/molécula) correspondiente a los alcoholes (C4 a C8) utilizando la información publicada por Posner en 1952.

Tabla 2.4.- Concentración de saturación Γ_{sat} y área transversal A^s , molecular de los n-alcoholes en agua a 25 °C.

Alcohol	Γ_{sat} mol/cm ²	A^s Å ² /molecula
C4	4.45E-10	37
C5	4.70E-10	35
C6	4.88E-10	34
C7	4.93E-10	34
C8	5.46E-10	33

^f Sokolowski A. & Burczyk. B.; (1983). J. Colloid Interface Sci., 94 369-379.

En cuanto a la espumación y estabilidad de espuma, las soluciones acuosas de n-alcoholes muestran un máximo de espumación en la concentración donde la tensión superficial decrece rápidamente, excepto para las soluciones de n-octanol que muestran una marcada irregularidad. La espuma aumenta cuando el número de carbonos se incrementa en la serie comprendida entre el etanol y el hexanol, mientras decrece conforme se sigue acrecentando el número de átomos de carbono en la serie. La explicación a este comportamiento parte de que sistemas de agua y butanol o de series homólogas mayores, presentan una limitada solubilidad en agua y estos forman películas heterogéneas conteniendo gotas del componente en exceso que rompen la espuma.

2.2.- Alcanolaminas

Los amino-alcoholes o alcanolaminas entre las que se encuentran las Etanolaminas (aminoetanoles) y Propanolaminas (aminopropanoles) como compuestos más importantes, pueden ser derivadas del amoníaco en el cual uno, dos o tres átomos de hidrógeno son sustituidos por grupos (CH₂CH₂-OH) o (CH₂CH₂CH₂-OH). El grupo de las etanolaminas NH_{3-n} (C₂H₄OH) (n = 1, 2, 3); lo comprenden la monoetanolamina (MEA, 2-aminoetanol), dietanolamina (DEA, 2-2'-aminodietanol); y trietanolamina (TEA, 2,2',2''-nitrilotrietanol) que son derivados de la reacción de amoníaco con óxidos de etileno.

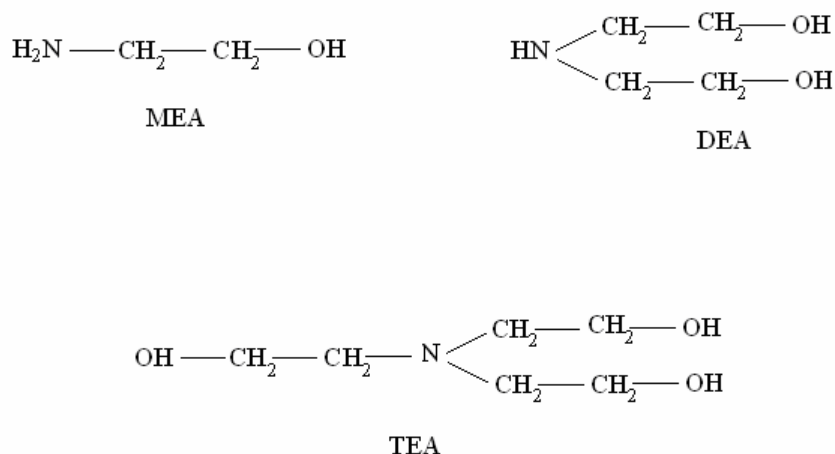


Figura. 2.2.- Estructuras de las alcanolaminas

La 2-amino-2-metil-1-propanol (AMP) se obtiene de la hidrogenación catalítica del 2-metil-2-nitro-1-propanol obtenido a partir de la reacción de Henry^g, 2-nitropropano con formaldehído.

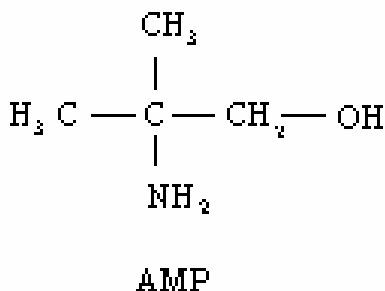


Figura 2.3.- Estructura de la AMP

Estos aminoalcoholes, son útiles como solubilizantes y neutralizantes de emulsificantes, como materia prima para detergentes, químicos textiles y en procesos de purificación de gas natural^g.

2.2.1.- Propiedades Físicas

La monoetanolamina y la trietanolamina son líquidos viscosos, incoloros e higroscópicos. La dietanolamina a temperatura ambiente es un sólido cristalino. Todas las etanolaminas adsorben agua y dióxido de carbono del aire. Son miscibles en agua y alcoholes en todas proporciones. Las alcanolaminas tienen un ligero olor amoniacal. En la *tabla 2.5* se exhiben algunas propiedades físicas de estos aminoalcoholes^g.

^g Gerhartz, W. Ullmann's Enciclopedia of Industrial Chemistry. Vol A10, VCH Publishers, USA, 1995.

Tabla 2.5.- Propiedades físicas de las alcanolaminas

	Monoetanolamina	Dietanolamina	Trietanolamina
Peso Molecular	61.08	105.1	149.2
Punto de fusión °C	10.53	27.4	21.6
Punto de ebullición (101.3 kPa). °C	170.3	268.5	336.1
Densidad (20 °) Kg/m ³	1015.7	1091.2 (30°)	1124.8
Calor de vaporización (101.3 kPa) kJ/kg	848.1	638.4	517.8
Calor específico Cp kJ/kg K	2.72	2.73	2.33
Coefficiente de expansión K ⁻¹	7.78E-4	5.86E-4	4.82E-4
Viscosidad (20 °C) mPa· s	23.2	389 (30 °C)	930
n_D^{20}	1.4544	1.4747	1.4852
Tensión Superficial (20 °C) mN/m	49	47.7	48.4
Flash point °C	94.5	176.0	192
Temperatura de ignición °C	410	365	325

La AMP, es incolora, higroscópica y tiene una viscosidad relativamente baja a 283.15 K de ≈ 560 cp. Es totalmente miscible en agua, el punto de ebullición de la AMP es alto, sin embargo a temperatura ambiente la concentración de vapores de AMP es muy baja. La presión de vapor de la AMP a 355 K es de 239 mmHg.^h

Tabla 2.6.- Propiedades físicas de AMP

Nombre	Peso molecular (g/mol)	Punto de ebullición (1 atm) °C	Densidad Kg/m ³	η_D (20 °C)	Viscosidad (30 °C) cP	Solubilidad en agua (20° C)	Tensión superficial (25°C) mN/m
AMP	89.137	165	921	1.449	0.1024	Infinita	31.37

Conocer las propiedades de las soluciones acuosas de estas alcanolaminas como la viscosidad y la tensión superficial es importante para el diseño de equipos destinados al tratamiento de gases ácidos y para interpretar otras propiedades como son la cinética de la reacción de CO₂ con soluciones acuosas de aminas^g.

2.2.2.- Propiedades Químicas.

Las etanolaminas son moléculas bifuncionales que contienen grupos hidroxilo y amino por lo que tienen propiedades semejantes a las amino y a los alcoholes. Las etanolaminas forman sales de ácidos y el grupo hidroxilo permite la formación de ésteres. Cuando la monoetanolamina y la dietanolamina reaccionan con ácidos

^h Riddick, J. A., Bunger, W. B., Sakano T. K, Organic Solvents: Physical Properties and methods of purification. 4th. Ed. New York, Wiley (1986)

orgánicos la formación de una sal es preferente a la formación de un éster. Con gases como H₂S y CO₂, forman sales inestables en solución acuosa. La disociación de estas sales por calentamiento resulta en la recuperación de los materiales originales. Esta reacción forma la base en el endulzamiento de gas natural, donde soluciones acuosas de alcanolaminas como son monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), trietanolamina (TEA), 2-amino-2-metil-1-propanol (AMP) y mezclas de ellas, son usadas como solventes para remover gases como CO₂ y H₂S de las corrientes de gas de algunos procesos industriales de gas natural y síntesis de amoníaco entre otras.

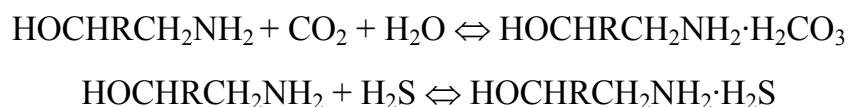


Figura 2.4.- Reacciones de alcanolaminas con CO₂ y H₂S en medio acuoso.

En ausencia de agua, las monoetanolamina y la dietanolamina reaccionan con CO₂ para formar carbamatos. En contraposición se encuentra la AMP que por ser una amina impedida estéricamente, la formación de carbamatos es inhibida.

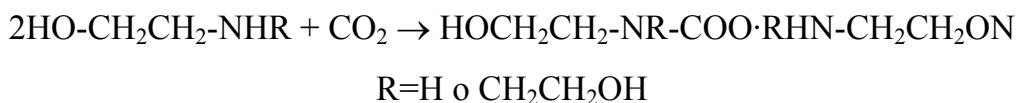
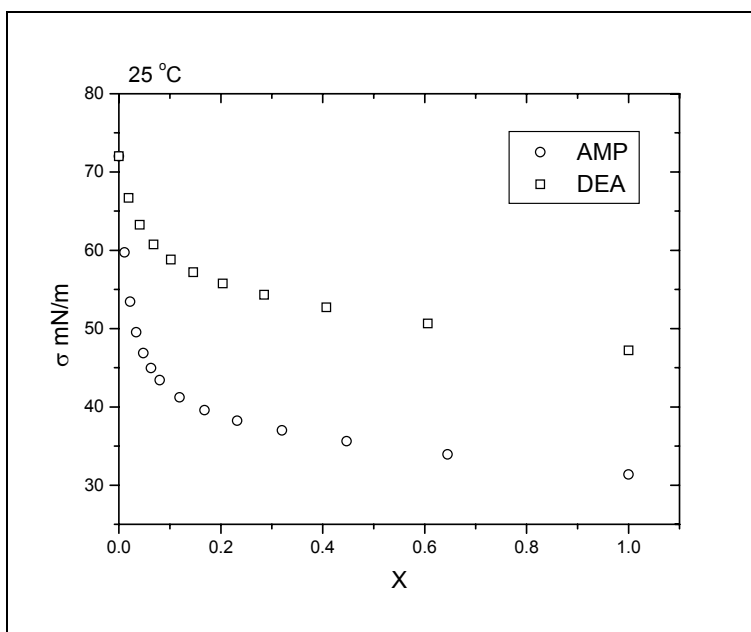


Figura 2.5.- Reacciones de alcanolaminas con CO₂ en ausencia de agua.

2.2.3. Actividad Superficial

La tensión superficial de las disoluciones acuosas de alcanolaminas decrece con el incremento de la concentración, presentando el mayor decremento a concentraciones bajas seguido de un cambio de pendiente a una concentración característica. Las concentraciones operacionales X_{op} , para la MEA, DEA y AMP son respectivamente, $X_{op} \approx 0.446, 0.501, 0.296$.^{i,j}



Gráfica 2.1.- Tensión Superficial contra fracción mol para los sistemas AMP – Aguaⁱ y DEA – Agua^j a 25°C

En lo que respecta a las tensiones superficiales de las soluciones acuosas de MEA, DEA y TEA son muy similares unas con otras, con una pequeña diferencia

ⁱ Vázquez Gonzalo, Estrella Alvarez, et al. J. Chem. Eng. Data 1997, 42, 57-59.

^j Ramírez Verduzco, L. Felipe. Tesis de Maestría. Facultad de Química. UNAM. (2001).

entre la MEA y la DEA y una notable diferencia entre la DEA y la TEA. Lo anterior muestra que un grupo extra (CH₂-CH₂-O) tiene muy poco efecto sobre la tensión superficial de estos compuestos. En contraposición con lo anterior, cuando se incrementa el número de grupos metilo (CH₃) en las moléculas de alcanolaminas, el efecto en la tensión es mayor, similar al presentado por alcoholes en medio acuoso y ácidos orgánicos, al aumentar el número de grupos metilo. Esto es debido a que existe una mayor concentración de estos compuestos en la superficie que en el bulto de la solución. La tabla 2.7 presenta algunos parámetros termodinámicos superficiales, calculados a partir de datos de tensión en función de la concentración.

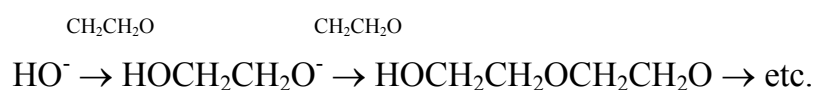
Tabla 2.7.- Tabla de propiedades fisicoquímicas de superficie de las alcanolaminas.^{ij}

Compuesto	$\Delta^{\circ}G_{ads}$ (kJ/mol)	Γ_{sat} (mol/cm ²)	A^S (Å ² /molécula)
DEA	12.9	1.79E-10	184
MEA	13.3	1.58E-10	208
AMP	16.7	2.63E-10	125

2.3.- Glimas

Las glimas son poliéteres lineales con estructura $\text{CH}_3-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{CH}_3$, n varía de 1 a 4 grupos etóxi ($\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{O}$) y sus grupos terminales son óxidos de metilo (CH_3-O) y metilo (CH_3).

El producto de la reacción de óxidos de etileno con el ión hidróxilo es un alcóxido, especie que puede seguir reaccionando con más óxidos de etileno:



Los productos finales son éteres de alcoholes que se denominan dietilenglicol, trietilenglicol, etc. Estos dioles pueden metilarse para producir una serie de poliéteres que tienen propiedades como disolventes. Estos productos se conocen por los nombres de glima, diglima, triglima etc. Aquí el grupo $\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}$ es una unidad monómerica que se incrementa hasta formar oligómeros. En general, los éteres son considerados como derivados orgánicos del agua y las glimas no son la excepción, ya que los átomos de hidrógeno han sido remplazados por fragmentos dipolares y por lo tanto sus puntos de ebullición y tensión superficial son más altos que los alcanos correspondientes.

En una serie homóloga, las propiedades termodinámicas de las glimas cambian regularmente al igual que los alcanos. Las glimas en cada miembro difieren sólo por un grupo ($\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}$). Los dos pares de electrones no compartidos de los oxígenos presentes en las glimas, les confieren una moderada polaridad, permitiendo su asociación vía interacciones moleculares del tipo dipolo-dipolo. Las glimas lineales son totalmente solubles en agua, alcoholes e hidrocarburos de bajo peso molecular.

Tabla.2.8.- Propiedades físicas de glimas a 25 °C (G_1 , G_2^k , G_3 , G_4^l).

Poliéter	M (g/mol)	ρ (Kg/m ³)	T _{ebullición} (°C)	P vapor (kPa)	σ (mN/m)	μ Poise
Monoglima G1	90.122	862.1	84.5	6.40	24.04	0.432
Diglima G2	134.175	938.4	162.0	0.45	29.50	0.989
Triglima G3	178.228	979.5	216.0		31.70	1.96
Tetraglima G4	222.282	1004.7	276.0		33.60	3.295

2.3.1 Actividad Superficial

La tensión superficial de los sistemas agua – Glima decrece con el incremento de la concentración. La conducta superficial de estos sistemas no obedecen a una comportamiento homologado como en el caso de las propiedades de bulto. El abatimiento más prolongado de la tensión superficial sucede con G1, para G4 la curva decae suavemente^m.

^k Riddick, J. A., Bunger, W. B., Sakano T. K, “Organic Solvents: Physical Properties and methods of purification”. 4th. Ed. New York, Wiley (1986)

^l Grayson, M., Eckroth, D., “Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology”, 3rd Ed. John Wiley & Sons, New York, USA, (1994)

^m Rodríguez Alvarado Nora R. Espumabilidad y Tensión superficial de Sistemas Binarios Poliéter – Agua a 25°C Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, (2002)

Tabla 2.9.- Composiciones operacionales X_{op} a 25°C.

Sistema	X_{op}
Monoglima	0.29
Diglima	0.30
Triglima	0.10
Tetraglima	No presenta

Para explicar el comportamiento superficial de estos sistemas se han calculado algunos parámetros termodinámicos superficiales que se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10.- Tabla de propiedades fisicoquímicas de superficie de las Glimas ^m

Sistema	ΔG_{ads} (kJ/mol)	Γ_{sat} (mol/cm ²)	A^S (Å ² /molécula)
Monoglima + H ₂ O	-13.54	5.47E-10	30.35
Diglima + H ₂ O	-13.58	5.52 E-10	30.07
Triglima +H ₂ O	-13.63	5.62 E-10	29.52
Tetraglima + H ₂ O	-13.89	No presenta	No presenta

Los valores de ΔG_{ads} son similares entre las glimas, sin embargo, es apreciable que el mayor valor en la energía libre de Gibbs es para la tetraglima seguido por la triglima, diglima y finalmente la monoglima, lo que confirma la mayor hidrofobicidad de G4 y la menor de G1^m.

En cuanto a la espumabilidad en estos sistemas, las glimas G3, G2 y G1 presentan un máximo de espumabilidad a una composición característica para cada glima, mientras que los índices de espumabilidad de sistemas acuosos de G4 son menores. La composición donde ocurre el máximo de espuma en estos sistemas es

mucho mayor al de la cac (concentración de agregación crítica), donde ocurre el máximo cambio en la tensión superficial en función de la composición, este hecho confirma que para moléculas anfifílicas pequeñas no existe una correlación entre estas dos composiciones, como se ha confirmado recientementeⁿ.

ⁿ Del Valle Medina, Karla. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México. (2002)

2.4. Glicoéteres C_mE_n

Los anfífilos C_mE_n son los éteres mono-n-alquílicos de polietilenglicol y su fórmula general $CH_3-(CH_2)_{(m-1)}(-O-CH_2-CH_2-)_nOH$. Se puede considerar que los miembros más sencillos de esta familia (con $n=0$) son los n-alcoholes. Estos compuestos, de acuerdo al número de grupos metileno m y etoxilo n , pueden incrementar su carácter hidrofílico o hidrofóbico. Las propiedades termodinámicas de los anfífilos C_mE_n se deben principalmente a la presencia de los grupos $-OH$ terminales y etoxilados $(-O-CH_2-CH_2-)$. Los grupos hidroxilo y etoxilo les confieren una moderada polaridad mientras que el primero permite su asociación vía puentes de hidrógeno haciendo que sus densidades, puntos de ebullición y tensiones superficiales sean mayores que los n-alcanos de peso molecular similares

Tabla 2.11.- Propiedades Termodinámicas de anfífilos a 25°C

Anfífilo	$T_{\text{ebullición}}$ (°C)	P_{vapor} (torr)	ρ (Kg/m ³)	C_p (cal/molK)	μ (408K)
C1E1	124.6	9.7	960.24	40.0	2.024
C2E1	135.6	5.3	925.20	50.0	2.26
C4E1	170.2	0.852	894.60	66.0	2.24
C1E2	194.1	0.180	1016.7	64.8	2.75
C2E2	202.0	0.045	984.1	72.0	2.78
C4E2	231.0		967.0		2.65

En la *Tabla 2.11* se observa que para los anfífilos C_mE_n con m y n pequeñas, el punto de ebullición y el C_p aumenta mientras que la presión de vapor y la

densidad disminuyen al aumentar m y/o n, y el cambio en la propiedad es mayor al incrementar el número de grupos etoxilados, que en el número de grupos metileno^o.

2.4.1.- Solubilidad

Los anfífilos C_mE_n con m y n menores a 3 son solubles en agua en todas proporciones, lo que se puede explicar por la formación de puentes de hidrógeno entre el agua y estos anfífilos. Sin embargo, al aumentar la porción hidrofóbica (m) se presenta miscibilidad parcial como es el caso de los n-alcoholes.

La miscibilidad de estos compuestos se incrementa dramáticamente al aumentar la porción hidrofílica. Resultados^p confirman que C1E1, C2E1, C3E1, isoC3E1, terC4E1, C1E2, C2E2 y C4E2 son completamente solubles entre 0 y 95 °C mientras que C4E1, isoC4E1, C6E1 y C6E2 presentan solubilidad parcial.

2.4.2. Actividad superficial.

El comportamiento a dilución infinita para los anfífilos C_mE_n en agua con m y n pequeñas indican que, dependiendo de la longitud de m estos anfífilos, se auto-asocian y forman agregados a una composición característica^{qr}, la cual disminuye con la temperatura. A cierta temperatura se presenta un cambio abrupto en múltiples propiedades.

^o Curme, G. O. Glycols. Reinhold Pub. Co. (1953)

^p Stephenson, R. M. "Mutual Solubilities: Water-Glycoethers and Water-Glycoesters" J. of Chem. Eng. Data. 38, No1, 134-138, (1993)

^qDouheret G., Davis M. I. Ulloa J., Hoiland H., Fjellanger J. Journal of the Chemical Society- Faraday Transactions, 92 (13): 2369-2379 Jul 7. (1996)

^r Davis, M. I., Douheret, G. Journal of the Chemical Society-Faraday Trans. 94, (16): 2389-2394, (1998a)

Tabla 2.12.- Concentración Operacional para algunos Glicoéteres.

Compuesto	X_{op}
C3E1	0.050 (Douheret, 1999)
C4E1	0.0175 (Tanaka, 1996)
C4E2	0.0152, 0.06 (Douheret, 1992, 1996)
C4E3	0.0093 (Smith, 1994)

Tabla 2.13.- Concentración Micelar Crítica para algunos Glicoéteres.

Compuesto	X_{cmc}
C6E1	0.0011 (Trejo, 1995)
C6E3	0.0018 (Corkill, 1964)
C6E5	0.0016 (Becker, 1967)
C8E1	0.000089 (Shinoda, 1959)
C8E3	0.000084 (Trejo, 1995)

La tensión superficial σ de los anfifilos C_mE_n en agua disminuye en función de la composición, teniendo una caída pronunciada en la zona diluida. Estos compuestos se acumulan preferentemente en la superficie y a una concentración característica forman agregados moleculares similares a las micelas; comportamiento típico en compuestos con actividad superficial o compuestos hidrofóbicos. Algunos estudios han señalado que al incrementarse el número de grupos etoxilados en estas moléculas, la hidrofobicidad aumenta. Esto se puede explicar al considerar que al aumentar los grupos etoxilados aumenta las

interacciones intermoleculares entre los anfífilos C_mE_n y su hidrofiliidad disminuye^f.

La hidrofobicidad de los alcoholes se incrementa con el orden $C_4E_3 > C_4E_2 > C_4E_1$. Comportamiento similar se observa en el valor de la concentración de agregación crítica, que incrementa como sigue $C_4E_1 > C_4E_2 > C_4E_3$. En cuanto a los tensoactivos C_6E_n , la hidrofobicidad se incrementa de la siguiente manera $C_6E_5 > C_6E_3 > C_6E_1$ y para los C_8E_n como $C_8E_3 > C_8E_1$.

Tabla 2.14.- Propiedades Fisicoquímicas de Superficie de Glicoéteres. ^s

Compuesto	ΔG_{ads} (kJ/mol)	Γ_{Sat} (mol/cm ²)	A^S (Å ² /molécula)
C4E1	-29.07	4.75E-10	34.96
C4E2	-34.18	3.58 E-10	46.38
C6E1	-35.97	4.89E-10	33.96
C6E1	-35.97	4.89E-10	33.96
C6E3	-57.11	2.18 E-10	76.17
C6E5	-45.51	2.91 E-10	57.06
C8E1	-41.45	5.14 E-10	32.31
C8E3	-43.16	4.41 E-10	37.65

La espuma generada por los anfífilos tipo C_4E_n en agua es transitoria porque cuenta con una vida media del orden de segundos. Estos sistemas producen espuma y presentan un máximo en los alrededores de la concentración de agregación crítica.

Al aumentar el número de grupos etoxilados en la molécula del anfifilo C_4E_n se modifican tres aspectos^s:

- 1) el máximo en estabilidad disminuye en magnitud
- 2) el máximo ocurre a una concentración mayor del anfifilo
- 3) la región en composición donde ocurre la estabilidad en la espuma se incrementa.

La habilidad y tiempo de vida media de la espuma de los anfifilos C_6E_3 , C_6E_5 , y C_8E_n en agua es similar a la habilidad y tiempo de vida media de las espumas persistentes que forman tensoactivos del tipo $C_{16}E_n$ y $C_{12}E_n$ en solución acuosa.

^s Trejo Candelas Luis Miguel. Tesis de Doctorado. Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (1995)

CAPITULO 3

3.- Desarrollo del modelo para predicción de la estabilidad de espumas.

Termodinámicamente, una espuma constituye un sistema fuera de equilibrio; las espumas son básicamente sistemas que contienen una gran área superficial y una mayor energía libre superficial que la que tendría el aire segregado y la solución líquida, de manera que tiende a colapsar espontáneamente. La estabilidad de estos sistemas se puede explicar por la cantidad de material con actividad superficial presente ó adsorbido en la interfase líquido-gas y por los cambios de elasticidad que pueden presentarse por efectos Gibbs^g y Marangoni^h.

A continuación se presenta un modelo que pretende predecir el comportamiento de estabilidad de una espuma transitoria, basado únicamente en ecuaciones termodinámicas escritas para la fase superficial y datos de tensión superficial con respecto a la concentración para sistemas binarios donde el solvente es el agua.

3.1.- Efecto Marangoni

Cuando las películas líquidas son sujetas a perturbaciones mecánicas o fluctuaciones térmicas que incrementan su área superficial, se produce un adelgazamiento de la película y un incremento local en la tensión superficial debido a la disminución del número de moléculas de anfifilo adsorbidas en la interfase. Este cambio en la tensión superficial provoca que el líquido fluya de áreas de baja tensión superficial hacia áreas de alta tensión superficial para frenar el drenaje hidrodinámico y restablecer el grosor de la película. Las moléculas de anfifilo se

^g Gibbs, J. W.; Scientific Papers, Vol 1, Longmans, Green and Co., London, Eng., 1906, pp. 300-314

^h Marangoni, C.. Nuovo Cimento 2, 5, 239 (1871); 3, 50, 97, 192 (1878)

adsorberán y difundirán en la nueva superficie formada para restaurar el equilibrio local.

3.2.- Modulo de elasticidad de Gibbs.

Cuando una película se extiende, la concentración de anfifilo decrece y la tensión superficial en la región extendida aumenta; como resultado la región tiende a contraerse para disminuir la tensión superficial y restablecer el equilibrio. En películas de líquidos puros la tensión superficial permanece constante cuando las películas se expanden o se contraen; no se presenta elasticidad. Este fenómeno se explica a partir de la ecuación de Young-Laplace en su versión esférica, ver ecuación 3.1:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad 3.1$$

donde σ es la tensión superficial, R es el radio de la esfera y ΔP es la diferencia entre las presiones interna y externa de la esfera. Considérese una expansión o compresión de una superficie esférica, con un incremento o decremento en el radio de curvatura de magnitud dR , entonces el cambio de ΔP se obtiene a partir de la ecuación 3.1 como:

$$\frac{d\Delta P}{dR} = \frac{2d\sigma}{RdR} - \frac{2\sigma}{R^2} \quad 3.2$$

Cuando el radio de curvatura aumenta, la diferencial de presión disminuye; existe una relación inversa entre estas variables, lo que trae como consecuencia que:

$$\frac{d\Delta P}{dR} < 0 \quad 3.3$$

Al sustituir la ecuación 3.3 en la 3.2 se obtiene:

$$\frac{1}{R} \frac{d\sigma}{dR} - \frac{\sigma}{R^2} < 0 \quad 3.4$$

Reordenando:

$$\frac{d\sigma}{dR} < \frac{\sigma}{R} \quad 3.5$$

$$\frac{d\sigma}{d \ln R} < \sigma \quad 3.6$$

El lado izquierdo de la ecuación 3.6 es la definición del Módulo de Elasticidad de Gibbs, E .

$$E = \frac{d\sigma}{d \ln R} \quad 3.7$$

Al sustituir el área de superficie asociada a una lamela (a) de radio de curvatura R se obtiene:

$$E = 2 \frac{d\sigma}{d \ln a} \quad 3.8$$

Por lo tanto la elasticidad de Gibbs (ecuación 3.8) se define como el cambio de la tensión superficial en relación al logaritmo del área asociada. Esta ecuación mide la variación de la tensión superficial con la expansión o contracción de área,

sin considerar la existencia de gradientes de concentración dentro del sistema y descartando efectos cinéticos como la velocidad de adsorción y de difusión del componente en la interfase líquido-gas. Sólo películas obtenidas de soluciones de anfífilos pueden presentar este comportamiento y por lo tanto producir espuma. Como consecuencia de lo anterior un líquido puro no puede espumar, ya que no existe cambio entre la tensión superficial y el área asociada.

En general, al aumentar la elasticidad de Gibbs, la lamela y por consiguiente la espuma es más estable. Para calcular la elasticidad de Gibbs de la lamela, es útil expresar la ecuación 3.8 en términos de la variación de la concentración superficial Γ (concentración en exceso en la superficie en mol por centímetro cuadrado; el inverso del área) en función de la tensión superficial de la solución:

$$E = -2\Gamma \frac{d\sigma}{d\Gamma} \quad 3.9$$

Experimentalmente, la obtención de E puede hacerse mediante isothermas de adsorción o ecuaciones de estado. Básicamente, E mide el cambio de la tensión superficial con la expansión de área superficial en un estado de equilibrio.ⁱ

El efecto Gibbs-Marangoni también explica la máxima espumación o espumabilidad, la cual ocurre a una concentración característica del anfífilo. En soluciones diluidas, el cambio diferencial de la tensión superficial es pequeño; no diferirá mucho de la del solvente puro: cuando la burbuja se expanda y la lamela se adelgace habrá una difusión limitada del anfífilo desde el seno del líquido hacia la lamela, como consecuencia esta se seguirá adelgazando hasta romperse de modo que se tendrá una espumación pobre. En soluciones muy concentradas, la diferencia de tensión superficial será restaurada rápidamente por el abastecimiento de anfífilo, el cual se difundirá en la superficie expandida. Pero dicha restauración se hará cuando

ⁱ Trejo Candelas Luis Miguel. Tesis de Doctorado. Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (1995)

la lamela este adelgazada y como este fenómeno es muy rápido no permitirá que ésta vuelva a estabilizarse como estaba en un principio, por lo que seguirá adelgazándose hasta romperse, teniendo en este caso también una pobre espumación. En soluciones intermedias de anfifilo, la máxima espuma ocurrirá al desarrollarse fuertes efectos Gibbs-Marangoni que restauraran la película a su original espesor y estabilizaran la espuma. *Figura 3.1.*

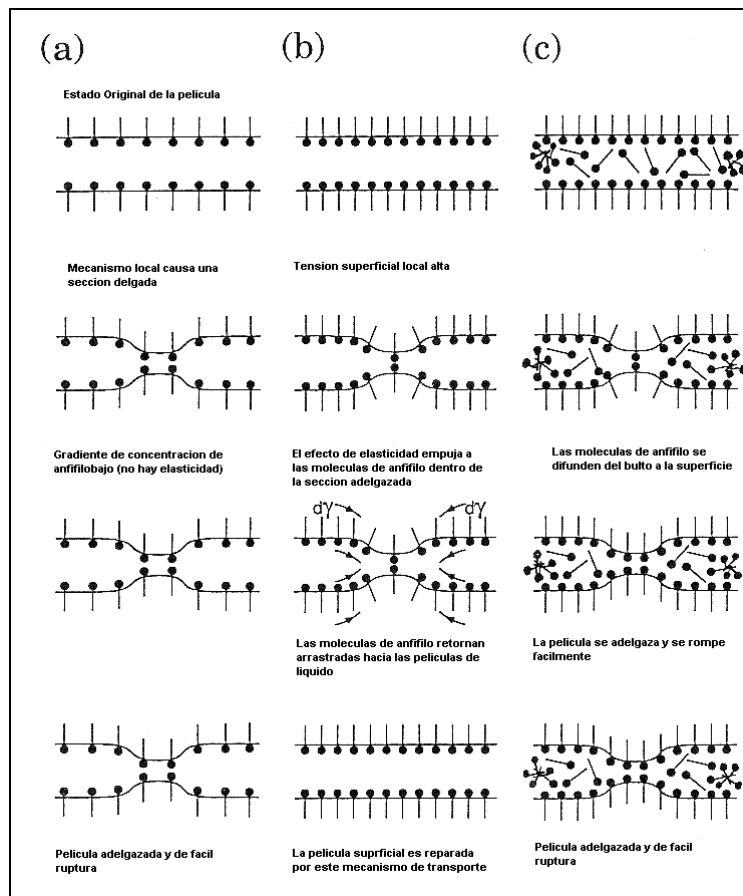


Figura 3.1. Mecanismo Gibbs-Marangoni de la estabilidad dinámica de una espuma^j

3.3.- Desarrollo del Modelo Propuesto

La presión superficial es una energía relativa que cuantifica el decremento energético de la superficie con respecto al soluto puro y está definida como la diferencia entre la tensión superficial del solvente puro y la tensión superficial de la mezcla soluto-solvente a cualquier composición: $\pi = \sigma^\circ - \sigma$, donde σ° es la tensión superficial del solvente puro y σ es la tensión superficial de la mezcla. Para el desarrollo del modelo partimos del modulo de elasticidad de Gibbs (ecuación 3.8) pro expresada en función de la presión superficial, donde:

$$d\sigma = -d\pi \quad 3.10$$

Ahora, si se intercambia el área asociada a por el inverso de la concentración de superficie Γ , parámetro definido como el área de superficie por mol de soluto, A ;

$$A = \frac{1}{\Gamma} \quad 3.11$$

Al aplicar el logaritmo a ambos lados de la ecuación 3.11:

$$\ln A = -\ln \Gamma \quad 3.12$$

Después de sustituir las expresiones 3.10 y 3.12 en el Módulo de Elasticidad de Gibbs (ecuación 3.8) se obtiene:

$$E = 2 \frac{d\pi}{d \ln \Gamma} \quad \text{ó} \quad E = 2\Gamma \frac{d\pi}{d\Gamma} \quad 3.13$$

^j Pugh, R. J., "Advances in Colloid and Interface Science", 64, 67-142. (1996)

La ecuación 3.13, expresada en términos de la fracción de espacios cubiertos θ , definida como $\theta = \Gamma / \Gamma_{max}$ (fracción de la superficie ocupada por el anfífilo), donde Γ_{max} es la concentración máxima o de saturación en la superficie:

$$E = 2\theta \frac{d\pi}{d\theta} \quad 3.14$$

La ecuación anterior expresa el módulo de elasticidad de Gibbs en función de la presión de superficie, debida al incremento o decremento de la concentración en la superficie. Al aplicar la regla de la cadena para $d\pi/d\theta$ con respecto a la concentración del bulto x , la ecuación 3.14 toma la forma:

$$E = 2\theta \frac{d\pi/dx}{d\theta/dx} \quad 3.15$$

La elasticidad de Gibbs puede expresarse por el cambio entre la variación de la presión superficial y la fracción de espacios cubiertos, en función de la concentración del bulto^k. Sea la ecuación de adsorción de Gibbs que permite determinar las concentraciones superficiales de soluto Γ en todo el intervalo de composición a partir de los datos de σ o π vs la composición o su logaritmo ($-d\sigma = \Gamma d\mu$) o en su forma :

$$\Gamma = \frac{x}{RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right)_T \quad 3.16$$

^k Gracia Fadrique, J. Tesis Doctoral, Facultad de Química, UNAM, México, D.F 1990

Donde Γ está en moles/cm², π en Erg/cm², $R=8.314E7$ Erg/mol K y T en K.

La ecuación 3.16 en términos de la fracción de espacios cubiertos es:

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{\max}} = \frac{x}{\Gamma_{\max} RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right)_T \quad 3.17$$

Al derivar la expresión 3.17 con respecto a la fracción mol:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{x}{\Gamma_{\max} RT} \left(\frac{d^2\pi}{d x^2} \right)_T + \frac{1}{\Gamma_{\max} RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right)_T \quad 3.18$$

Sustituyendo 3.17 y 3.18 en 3.15 se obtiene el módulo de elasticidad de Gibbs expresado en función de la primera y la segunda derivada de la presión superficial con respecto a la fracción mol:

$$E = 2x \frac{\left(\frac{d\pi}{dx} \right)^2}{x \left(\frac{d^2\pi}{d x^2} \right) + \left(\frac{d\pi}{dx} \right)} \quad 3.19$$

En forma logarítmica, la ecuación 3.19 es:

$$E = 2 \frac{\left(\frac{d\pi}{d \ln x} \right)^2}{\left(\frac{d^2\pi}{d \ln^2 x} \right)} \quad 3.20$$

A partir de las ecuaciones 3.19 ó 3.20 y calculando la primera y segunda derivadas de la presión superficial con respecto a la composición del bulto a partir de datos de presión superficial contra fracción mol, de forma analítica o numérica, se puede calcular el Modulo de Elasticidad de Gibbs. Por medio de un análisis de las gráficas por regiones (*figura 3.2-a y 3.2-b*) de π contra x ó π contra $\ln x$ de un anfifilo típico en solución y con las ecuaciones 3.19 ó 3.20, se obtiene la siguiente información acerca de una espuma.

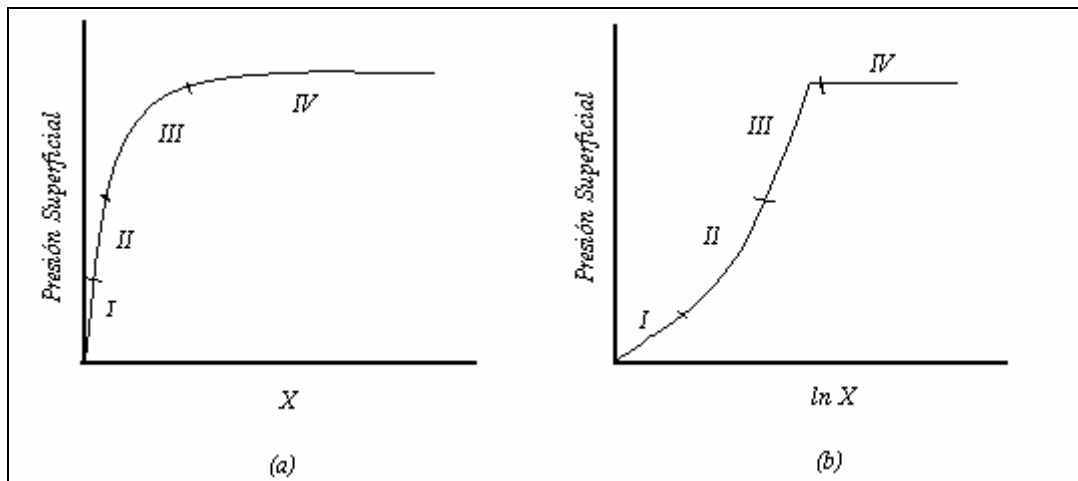


Figura. 3.2 (a) Comportamiento Presión Superficial vs X, (b) Comportamiento Presión Superficial vs lnX

I.- En la primera región el comportamiento de la presión superficial con respecto a la concentración sigue un comportamiento lineal; la derivada $\left(\frac{d\pi}{dx}\right)_{x \rightarrow 0}$ en esta zona es constante. Al determinar el módulo de elasticidad de Gibbs en esta región, la primera derivada toma un valor constante positivo y la segunda derivada es cero, de modo que el módulo de elasticidad de Gibbs es determinada sólo en función de la primera derivada:

$$E = 2x \frac{d\pi}{dx} \quad 3.21$$

II.- En esta región la presión pierde el comportamiento lineal; el valor de $d\pi/dx$ cambia punto a punto y la segunda derivada es diferente de cero. El módulo de Elasticidad de Gibbs, ecuación 3.19, en esta región dependerá de las dos relaciones de cambio.

En esta región la primera derivada en cada punto es positiva mientras que la segunda derivada será negativa por el cambio de concavidad. Al calcular el Módulo de Elasticidad de Gibbs en esta zona, el denominador de la ecuación 3.19 presentará siempre un valor menor que el numerador, por tanto el módulo de elasticidad irá aumentando punto a punto, esto explica porqué en esta región es donde se observa el mayor incremento en la formación de espuma.

III. – La tercera región en la representación π contra $\ln x$, presenta un comportamiento lineal, donde la pendiente $(d\pi/d \ln x)$ tiene un valor constante, ver *figura 3.3-b*. En esta región el Módulo de Elasticidad de Gibbs diverge ya que cuando $x \rightarrow x_{cmc}$, la segunda derivada es igual a cero. $(d^2\pi/d \ln^2 x) = 0$. En esta región el Módulo de Elasticidad de Gibbs tiene su valor máximo que corresponde también al valor máximo de espumación.

IV.- En esta región la presión superficial se mantiene prácticamente constante con respecto a la concentración y la derivada de la presión superficial con respecto a la fracción mol es cero. Entonces el Modulo de Elasticidad será:

$$E = 0 \quad 3.22$$

Hasta el momento se cuenta con una descripción cualitativa del comportamiento de una espuma. El uso de ecuaciones de estado donde se encuentre explícita la relación de presión superficial y la fracción mol del bulfo permitirá obtener un modelo para poder predecir el comportamiento de la estabilidad de una espuma.

3.4.- Espuma del tipo Gas Ideal Bidimensional

A dilución infinita las interacciones soluto-soluto no son significativas y las soluciones se comportan como soluciones ideales (obedecen la ley de Henry). En el caso de la tensión superficial se presenta un comportamiento lineal con respecto a la concentración.

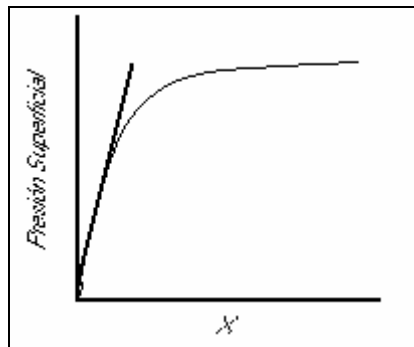


Figura 3.3 Presión Superficial vs concentración

En esta región el comportamiento de la tensión superficial se puede expresar como sigue

$$\sigma^0 - \sigma = \pi = b * x \quad 3.23$$

donde $\sigma^0 - \sigma$ corresponde a la presión superficial π . Sea la ecuación de Adsorción de Gibbs bajo potencial químico ideal:

$$\Gamma = -\frac{x}{RT} \left(\frac{d\sigma}{dx} \right)_T \quad 3.24$$

σ es la tensión superficial de la mezcla soluto – solvente a cualquier concentración, x es la concentración de soluto en el bulto, R la constante de los gases, T la temperatura del sistema y Γ la concentración en exceso en la superficie. Al sustituir σ por π en la ecuación 3.24:

$$\Gamma = \frac{x}{RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right)_T \quad 3.25$$

En condiciones a dilución infinita la relación de cambio de π con respecto a la concentración del bulto x es constante, es decir $\left(\frac{d\pi}{dx} \right) = b = cte$, y bajo este régimen la ecuación 3.25 es:

$$\Gamma RT = xb \quad \text{ó} \quad \Gamma RT = \pi \quad 3.26$$

La ecuación 3.26, en términos del área de superficie por mol de soluto es:

$$\pi A = RT \quad 3.27$$

La expresión anterior es análoga a la ley de gas ideal en dos dimensiones. La ecuación 3.26, en términos de la fracción de cubrimiento de superficie, θ , es:

$$\pi = RT \Gamma_{\max} \theta \quad 3.28$$

Cuando una superficie se comporta idealmente se cumple la siguiente relación:

$$\theta = \beta x \quad 3.29$$

La ecuación 3.29 es la de una isoterma ideal y β corresponde a la constante de Henry en dos dimensiones. Esta constante cuantifica las interacciones soluto – solvente en el bulto de la solución. Al sustituir la expresión 3.29 dentro de la ecuación 3.28:

$$\pi = RT\Gamma_{\max}\beta x \quad 3.30$$

A través de la ecuación 3.30 se pueden obtener la primera y segunda derivada de la presión superficial con respecto a la fracción mol. Entonces, se puede obtener el Módulo de Elasticidad de Gibbs a partir de la ecuación 3.19:

$$E = 2\Gamma_{\max}RT\beta x \quad 3.31$$

La ecuación 3.31 muestra que, bajo el régimen ideal, la espuma presentará elasticidad o estabilidad proporcional a la composición del bulto. Las unidades de E son energía por unidad de área.

3.5.- Espuma de tipo Langmuir ^e

Una de las ecuaciones de superficie de mayor versatilidad en la representación del comportamiento de las regiones superficiales es la propuesta por Langmuir la cual está construida a partir de los siguientes postulados:

- a) No hay interacciones moleculares soluto – soluto.
- b) El modelo contempla la formación de una monocapa de moléculas de soluto adsorbido en la interfase.
- c) En el proceso de adsorción todos los lugares disponibles en la superficie son igualmente probables para que el soluto se adsorba.

Las ecuaciones cinéticas que dan origen a este modelo son las que describen los fenómenos de adsorción y desorción de soluto en la interfase:

$$v_{ads} = k_{ads} x(1 - \theta) \quad v_{des} = k_{des} \theta \quad 3.32$$

donde θ es la fracción de espacios cubiertos en la superficie, v_{ads} y v_{des} son las velocidades de adsorción y desorción respectivamente y k_{ads} y k_{des} son las constantes de velocidad de adsorción y desorción respectivamente y x es la concentración del soluto en el bulto. En el equilibrio, las velocidades son iguales:

$$k_{ads} x(1 - \theta) = k_{des} \theta \quad 3.33$$

Despejando la fracción mol se obtiene:

$$\frac{k_{ads}}{k_{des}} x = \frac{\theta}{1 - \theta} \quad 3.34$$

El cociente entre la constante de velocidad de adsorción y la constante de velocidad de desorción; $k_{ads}/k_{des} = \beta$. Donde β representa el coeficiente de reparto entre la superficie; la tendencia del soluto a migrar a la superficie.

Entonces, la ecuación 3.34 se escribe como:

$$\beta x = \frac{\theta}{1-\theta} \quad \text{ó} \quad \theta = \frac{\beta x}{1 + \beta x} \quad 3.35$$

La ecuación 3.35 corresponde a la isoterma de Langmuir para $\theta < 1$; no está definida para $x \rightarrow 1$ ó $x \rightarrow x_{cmc}$. Igualando la ecuación 3.35 con la ecuación de Adsorción de Gibbs (ecuación 3.17) e integrando, se obtiene la ecuación correspondiente de estado de Langmuir:

$$\pi = \Gamma_{\max} RT \ln(1 + \beta x) \quad 3.36$$

La ecuación 3.36 relaciona el cambio de la presión superficial con respecto a la concentración de soluto en el bulto y los parámetros de superficie Γ_{\max} y β . Ahora, se puede obtener el modulo de Elasticidad de Gibbs a partir de las ecuaciones 3.19 y 3.36:

$$\frac{d\pi}{dx} = \Gamma_{\max} RT \frac{\beta}{1 + \beta x}$$

$$\frac{d\pi^2}{d^2x} = -\Gamma_{\max} RT \frac{\beta^2}{(1 + \beta x)^2}$$

$$E = 2\Gamma_{\max} RT \beta x \quad 3.38$$

La ecuación 3.38 para espumas del tipo Langmuir recupera el comportamiento de una espuma de tipo ideal. Esto se explica por la forma matemática de la ecuación 3.19 la relación entre la primera y la segunda derivada.

Ahora si se considera el comportamiento real de una espuma. Justo en la vecindades del surgimiento de la espuma, las partículas de gas están dispersas en una matriz continua de disolución a manera de emulsión; la película de líquido que separa las partículas de gas adyacentes es de un espesor infinito en relación a los diámetros moleculares del material segregado en la interfase (L/V). En la medida que aumenta la altura, la estructura de la espumas adquiere una forma poliédrica provocando que la película de líquido que separa a las partículas de gas se adelgacé. En la parte superior de la columna, la espuma colapsa y forma instantáneamente líquido que viaja a través de las lamelas que componen las capas inferiores de la columna de la espuma. Este drenado produce el adelgazamiento y enriquecimiento superficial de las películas del líquido que conforman la columna de espuma; dando como resultado que las partículas dispersas de gas que forman las redes compactas se asemejan en la mayoría de los casos a la estructura de una bicapa con líquido de bulto común que a la de una monocapa. Es por esta razón que una ecuación de estado superficial para una monocapa como la ecuación de Lagmuir no es suficiente para describir el comportamiento de una espuma transitoria.

3.6.- Espuma de Tipo Langmuir Extendida ¹

Una ecuación utilizada para el desarrollo del modelo de predicción y descripción del comportamiento de una espuma transitoria es la isoterma de Langmuir extendida (Piñeiro et al., 2001). Este modelo esta construido para aplicarse en sistemas donde la tensión superficial es función de la composición en todo el intervalo de concentración y para mezclas miscibles de no-electrolitos con tensiones superficiales similares que no llegan a la saturación de la superficie ni presentan formación de agregados moleculares.

El modelo de Langmuir extendido parte de la existencia de cinéticas de adsorción y desorción, pero éstas se ven modificadas al hacer uso de la fracción volumétrica en lugar de la fracción mol como medida de concentración:

$$v_{ads} = K_{ads} (1 - \phi_B^S) \phi_B ; \quad v_{des} = K_{des} (1 - \phi_B) \phi_B^S \quad 3.39$$

donde ϕ_B representa la fracción volumétrica en el bulto y ϕ_B^S es la fracción volumétrica en la superficie del soluto. El nuevo factor $(1 - \phi_B)$ introducido en la velocidad de desorción toma en cuenta la cantidad de moléculas de B en el bulto; si aumenta la cantidad de moléculas en el bulto la desorción disminuirá. Por lo tanto, la desorción se ve limitada por la concentración del soluto en el bulto, hecho que no ocurre con el modelo de Langmuir.

En el equilibrio, las velocidades de adsorción y desorción se igualan, entonces:

$$\phi_B^S = \frac{\beta \phi_B}{1 + \beta \phi_B - \phi_B} \quad 3.40$$

donde β no es el mismo parámetro contenido en la ecuación de Langmuir.

¹ Piñeiro, A., Brocos, P., et al. Extended Langmuir Isotherm for Binary Liquid Mixtures. Langmuir, (2001).

La ecuación 3.40 puede describir todo el intervalo de concentraciones ya que, cuando la fracción volumétrica de B en el bulto es igual a uno, la fracción volumétrica de B en la superficie toma el valor de uno, esto es: $\phi_B = 1 \Rightarrow \phi_B^S = 1$. En el modelo de Langmuir, cuando la fracción mol es igual a uno, la fracción de espacios cubiertos será siempre menor a la unidad: $x_B = 1 \Rightarrow \theta = \beta/(1 + \beta) < 1$. Este hecho significa que la isoterma de Langmuir está limitada a valores pequeños de la fracción mol o para $\beta \gg 1$.

La tensión superficial es calculada a partir de una regla de mezclado definida a partir de dos partes principales: la mezcla ideal – perfecta más los efectos debidos a la adsorción de los componentes en la superficie, que toman en cuenta las interacciones entre las moléculas de A y B¹:

$$\sigma = \phi_A^S \sigma_A + \phi_B^S \sigma_B - \lambda \phi_A^S \phi_B^S \pi^\circ \quad 3.41$$

donde π° es la diferencia entre los valores de tensión superficial de los componentes puros $\pi^\circ = \sigma_A^0 - \sigma_B^0$, parámetro llamado presión máxima de superficie y λ es el término que toma en cuenta las interacciones y describe el cambio en la tensión superficial cuando ocurren cambios estructurales durante el proceso de mezclado de A y B. Acoplando 3.40 y 3.41 se obtiene:

$$\pi^* = \phi_B^S \frac{\alpha + (\beta - \alpha)\phi_B}{1 + (\beta - 1)\phi_B} = \phi_B^S (\alpha \phi_A^S + \phi_B^S) \quad 3.42$$

donde $\alpha = \lambda + 1$ y π^* es la presión superficial reducida, parámetro definido como el cociente entre la presión superficial y la presión superficial máxima, π/π° .

El modelo de Langmuír extendido contiene dos parámetros ajustables β y α , el primero relaciona las composiciones del bulto y superficie (hidrofobicidad) y el segundo cuantifica los cambios estructurales en el mezclado

Si los componentes de un sistema tienen volúmenes molares similares, la fracción volumétrica del bulto en la ecuación 3.42 se puede aproximar a la fracción mol y los efectos estructurales pueden ser despreciados. Entonces la ecuación 3.42 se convierte en:

$$\pi = \pi^0 \frac{\beta x}{(1 - x + \beta x)} \quad 3.43$$

La ecuación 3.43 puede ser escrita para representar un comportamiento lineal de la siguiente manera:

$$\frac{x}{\pi^*} = \frac{1}{\beta} + \frac{\beta - 1}{\beta} x \quad 3.44$$

donde π^* es la presión superficial reducida, parámetro definido con anterioridad. La ecuación 3.44 predice un comportamiento lineal en x/π^* contra x . El valor de β puede ser extraído del inverso de la ordenada al origen.

Otra forma de presentar a la ecuación 3.43 se obtiene cuando el valor de la presión superficial máxima es igual a $\Gamma_{max}RT$:

$$\pi = \Gamma_{max} RT \frac{\beta x}{(1 - x + \beta x)} \quad 3.45$$

Esta ecuación tiene dos parámetros de ajuste, $\Gamma_{max}RT$ y β .

La ecuación 3.45 permite relacionar directamente a la fracción mol con la presión superficial. Entonces, el Modulo de Elasticidad de Gibbs, se obtiene a partir de la primera y segunda derivada de la presión superficial con respecto a la fracción mol de la ecuación 3.45:

$$E = 2\Gamma_{\max} RT \frac{\beta x}{(1 - x + \beta x)(1 + x - \beta x)} \quad 3.46$$

La ecuación 3.46 muestra que para espumas del tipo Langmuír Extendido el comportamiento no es ideal, y además diverge cuando la fracción mol del bulto toma los siguientes valores:

$$x = -1/(\beta - 1) \quad \text{y} \quad x = 1/(\beta - 1) \quad 3.47$$

Por lo tanto el modelo obtenido bajo la representación de la ecuación 3.46 es buen acercamiento del comportamiento y predicción de una espuma transitoria.

Por último se mencionaran algunas otras ecuaciones de estado de superficies las cuales no fueron utilizadas en este trabajo.

La *ecuación de Volmer^m* es resultado de una extensión natural de la ecuación de estado de superficie ideal en la que el término de área es modificado de la misma forma que el factor volumétrico de la ecuación de estado de los gase idelales es extendido dentro de la ecuación de estado de van der Waals:

$$\pi = \frac{RT}{A - A_0} \quad 3.48$$

^m Volmer. M. Z.: Phys. Chem. 1925, 115, 253.

En la ecuación de Volver A representa el área superficial por mol de soluto, A_0 es el área superficial por mol de soluto en condiciones de saturación de superficie.

El termino A_0 establece que la cantidad de soluto que puede contener la superficie no crece indefinidamente; existe un valor máximo e igual al inverso de la Concentración máxima de superficie (Γ_{sat}). Además este modelo no toma en cuenta las interacciones moleculares que se puedan presentar en la superficie.

La ecuación de estado de superficies de *van der Waal*ⁿ como:

$$\pi = \frac{RT}{A - A_0} - \frac{\alpha}{A^2} \quad 3.49$$

donde A_0 es el área de superficie por mol de soluto en condiciones de saturación de superficie, π es la presión superficial y α es el parámetro de interacción molecular en la superficie. La ecuación de estado de superficie de van der Waals contiene dos términos en competencia: un término asociado al área que ocupan las moléculas en la superficie y un término atractivo debido a las interacciones moleculares superficiales.

La ecuación de estado de *van der Waals extendida*ⁿ, este modelo tiene una estructura similar a la del modelo clásico de van der Waals, la diferencia reside en el término que contiene el parámetro de interacción α , ya que es modificado al introducirse el parámetro A_0 , por lo que resulta la siguiente expresión:

$$\pi = \frac{RT}{A - A_0} - \frac{\alpha}{(A - A_0)^2} \quad 3.50$$

ⁿ Hinojosa, G. H.; Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México 2004.

La ecuación (2.50) indica que la presión superficial puede ser expandida como una serie de potencias del inverso de la diferencia de áreas superficiales, donde el primer término el correspondiente a la ecuación de Volmer y el segundo el correspondiente al término atractivo.

La *ecuación de estado de Cassel y Formstecher*^o, es una modificación del modelo de Volmer en la que, además de tomar en cuenta la saturación de la superficie a través del parámetro A_0 , adiciona un término de interacción molecular que ahora es dependiente no de la concentración de superficie, sino de la presión superficial. A través de este parámetro se toma en cuenta las interacciones moleculares de soluto en la superficie.

La ecuación de Cassel-Formstecher tiene la forma siguiente:

$$\pi + \alpha\pi^2 = \frac{RT}{A - A_0} \quad 3.51$$

donde, al igual que con el modelo de Volmer, A_0 es el área de superficie por mol de soluto en condiciones de saturación de superficie, π es la presión superficial y α es el parámetro de interacción, el cual tiene unidades del inverso de la presión superficial. Una caso particular de la ecuación (3.51) es cuando el término α es igual a cero, se obtiene el modelo de Volmer.

^o Adam, N.; The Physics and Chemistry of surfaces. Dover Publications Inc. New York. Pp. 120 (1968).

CAPITULO 4

4.- Desarrollo Experimental

El objetivo de este trabajo es la determinación experimental del comportamiento de espumas transitorias de familias homologas de n-alcoholes C_m ($1 < m < 8$), alcanolaminas (MEA, DEA, AMP), éteres monoalquílicos de polietilén glicol C_mE_n con ($1 < m < 8$ y $1 < n < 5$) y poliéteres lineales en agua y su pronostico mediante el modulo de elasticidad de Gibbs, la ecuación de Langmuir extendida y empleando valores de equilibrio de superficies en relación a la composición (σ vs x).

4.1.- Reactivos

Agua (H_2O) [7732-18-5] Agua desionizada en un sistema Nanopure de Barnsted (Dubuque, IA, U.S.A) con una resistividad de $17.7 M\Omega$. Esta agua se almacenó en un recipiente de teflón libre de impurezas “bag in a bottle” de Berghof (Concord, C.A., U.S:A) para mantener su calidad.

Metanol (CH_3OH) [67-56-1] Líquido incoloro, volátil con un olor característico, muy polar, miscible en agua, alcoholes, éter, benceno, cetonas y muchos otros disolventes orgánicos (marca Aldrich, pureza de 99.8%).

Etanol (C_2H_5OH) [64-17-5] Líquido incoloro, limpio, volátil, con olor etéreo a vino y sabor picante, miscible en agua, metanol, éter, cloroformo y acetona (marca Aldrich, pureza de 99.9%)

n-Propanol (C_3H_7OH) [71-23-8] Líquido incoloro, volátil, con olor similar al etanol, miscible en agua, etanol, éter, benceno, cetonas y otros disolventes orgánicos (marca Aldrich, pureza de 99.5%)

n-Butanol (C_4H_9OH) [71-36-3] Líquido incoloro, volátil con olor a vino poco soluble en agua, miscible con alcohol y éter (marca Aldrich, pureza de 99.8%)

n-Pentanol ($C_5H_{11}OH$) [71-41-0] Líquido incoloro, volátil, olor suave, ligeramente soluble en agua, miscible con alcohol y benceno (marca Aldrich, pureza de 99%)

n-Hexano ($C_6H_{13}OH$) [111-27-3] Líquido incoloro, ligeramente soluble en agua, miscible en alcohol y éter (marca Aldrich, pureza de 98%)

n-Heptanol ($C_7H_{15}OH$) [111-70-6] Líquido incoloro, fragante, ligeramente soluble en agua, miscible en alcohol y éter (marca Aldrich, pureza de 98%)

n-Octanol ($C_8H_{17}OH$) [111-87-5,29063-28-3] Líquido incoloro, con olor aromático penetrante inmisible con agua y glicerina, miscible en alcohol, cloroformo, aceites minerales (marca Aldrich, pureza de 99.6%)

Monoetanolamina (C_2H_6NOH) [141-43-5] MEA. Líquido viscoso incoloro e higroscópico, miscible en agua y alcoholes con un ligero olor amoniacal (marca J.T. Baker, pureza de 99.9%)

Dietanolamina ($(HOCH_2CH_2)_2NH$) [111-42-2] DEA. A temperatura ambiente sólido cristalino, hidróscopica, miscible en agua y alcoholes con un ligero olor amoniacal (marca J.T.Baker, pureza de 99.9%)

2-Amino 2-Metil 1-Propanol ($C_4H_{10}NOH$) [124-68-5] AMP. Líquido incoloro, miscible en agua con un ligero olor amoniacal (marca KC IMC, pureza de 95%)

Nitrógeno (N_2) Gas incoloro. Marca Linde, pureza de 99.88%

4.2.- Tensión Superficial.

Los estudios inician con la medición de la tensión superficial en todo el intervalo de concentración para los n-alcoholes C_m ($1 < m < 8$), monoetanolamina, dietanolamina, 2-amini 2-metil 1-propanol, a una temperatura de 25°C con el objeto de determinar algunos parámetros termodinámicos de adsorción que permitan observar el comportamiento de estos compuestos en solución y un primer acercamiento a su habilidad para formar espuma. Los valores de σ vs x para los sistemas éteres monoalquílicos de polietilenglicol y poliéteres lineal (glimas) fueron obtenidos de la literatura.^{a b c}

La tensión superficial de estas soluciones se determinó vía el método de presión máxima, que consiste en la medición de la presión máxima necesaria para formar burbujas de un gas en la punta de un tubo vertical inmerso en el líquido de interés. Para lo cual se utilizó un tensiómetro SensaDyne 6000, diseñado por la ChemDyne Research Corp., Milwaukee, WI, U.S.A. que posee un intervalo de medición de 5 a 100 mN/m y una precisión de $\partial\sigma \approx 0.1$ mN/m entre 0 y 100°C . El equipo consiste de dos tubos de vidrio de diferentes radios: 2 mm (r_1) y 0.25 mm (r_2) en su punta, sumergidos a la misma profundidad l , *Figura 4.1.*, por los cuales es burbujeado nitrógeno para formar las burbujas, con una rapidez aproximada de una burbuja por segundo para el tubo de menor diámetro y una rapidez menor para el tubo de mayor diámetro. Para el cálculo de la tensión superficial el equipo utiliza un programa que realiza la siguiente operación. En la punta de cada tubo se forman burbujas con una presión máxima $P_i^{\max} = 2 \frac{\sigma_i}{r_i} + \Delta\rho_i g l_i$, donde $\Delta\rho$ es la diferencia de densidades entre el gas y el líquido, l es la profundidad de inmersión en el ápice de la burbuja. Ver *Figura 4.1.*

^a Trejo Candelas Luis Miguel. Tesis de Doctorado. Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (1995)

^b Rodríguez Alvarado Nora R. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (2002)

^c Cruz Aliphath, Jephthe Raquel. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (2002)

La diferencia de presiones máximas entre las burbujas de cada tubo ubicada a la misma profundidad t es $\Delta P_{1,2}^{\max} = 2\sigma \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] + (\Delta\rho_1 g l_1 - \Delta\rho_2 g l_2)$, donde los

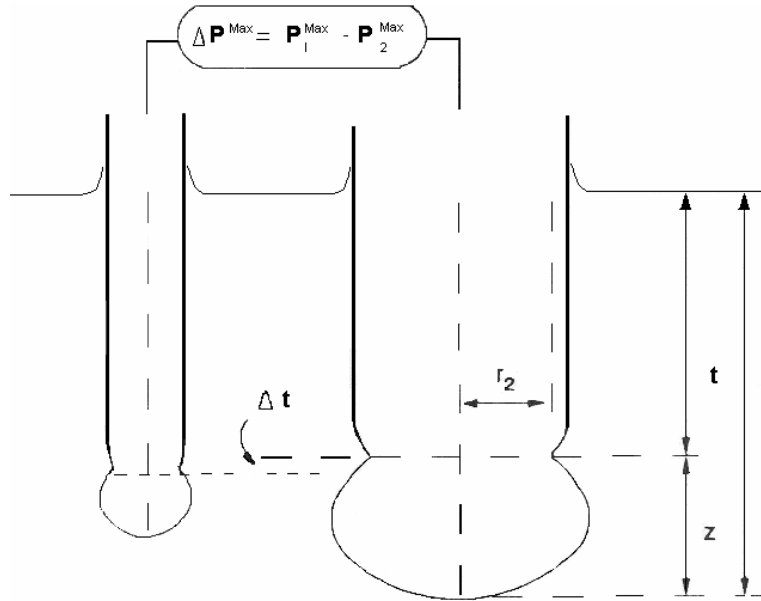


Figura 4.1.- Diagrama del equipo de presión máxima de burbuja.

términos $\Delta\rho_i g l_i$ se cancelan y $\sigma_2 = \sigma_1 = \sigma$. Considerando que en líquidos puros o soluciones con tensoactivo las burbujas se forman lentamente, la ecuación anterior se simplifica como una ecuación lineal $\Delta P^{\max} = m\sigma + b$, que es correcta si los tamaños y formas relativos de las burbujas son independientes de la tensión superficial y la densidad (i.e.b. = $\Delta\rho g(l_2 - l_1) = \text{cte}$). El aparato se calibra al medir la diferencia de presión máxima con dos líquidos de tensión superficial conocida (se recomienda agua y n-heptanol) y así se obtiene m y b . La tensión superficial de cualquier líquido σ se obtiene al medir $\Delta P_{2,1}^{\max}$ y aplicar $\sigma = (\Delta P_{2,1}^{\max})/m$.



Figura 4.2.- Equipo de presión máxima de burbuja.

Las soluciones con composiciones diferentes fueron preparadas por gravimetría utilizando una balanza digital (Mettler modelo PM400, con una precisión de 0.001g). La solución se coloca en una celda de vidrio de 9.5 cm. de altura por 4.3 cm. de diámetro, rodeada por una camisa de vidrio por la que circula agua que proviene de una bañera (Cole-Palmer Instrument, modelo 1268-14) que mantiene el sistema a temperatura constante a 25 ± 0.5 °C, se colocan aproximadamente 35 gramos de agua. Mediante un agitador magnético se homogeniza el sistema para alcanzar la temperatura deseada que se registra con un termómetro digital (Cole-Palmer modelo 8403), se introducen los tubos de vidrio, se suspende la agitación y se lleva a cabo la medición. El nitrógeno utilizado para

formar las burbujas se operó a una presión de trabajo entre 40 y 60 libras pulgada cuadrada.

Una vez determinada la tensión superficial del agua, se retiran los tubos y se adiciona por medio de una jeringa micrométrica una pequeña cantidad de anfifilio previamente pesada, se agita el sistema para homogeneizar la mezcla y alcanzar el equilibrio térmico, alcanzado el equilibrio se detiene la agitación y se sumergen los tubos para efectuar la medición de la tensión superficial de la solución. Este proceso de medición se repite hasta que el sistema llegue a su límite de solubilidad o sobrepase la capacidad de la celda.

4.3.- Medición de la Estabilidad de Espuma

La estabilidad (Σ) de las espumas transitorias se determinó mediante el método dinámico de Bikerman^d, el cual consiste de una celda cilíndrica de vidrio de 2.5 cm de diámetro interno, 30 cm de altura, rodeada con una camisa de vidrio para control de temperatura a 25 ± 0.05 °C mediante un baño térmico (Haake modelo K20). La base de la celda está formada por un vidrio poroso del No. 2 (poro 40-100 μ m). El gas utilizado para formar la espuma fue nitrógeno; para regular el flujo de gas de entrada se utilizó un controlador digital de flujo másico (Cole-Palmer modelo 33115-41, intervalo de trabajo de 0-200 mg/min, precisión ± 1 mg/min). El flujo de gas de salida se determinó con un medidor digital de flujo volumétrico (Cole-Palmer modelo 32915-10), con un intervalo de trabajo de 0-200 cm³/min, precisión ± 1 cm³/min). La altura de la espuma h se midió con una regla ($\partial L \pm 0.05$ cm).

^d Bikerman, J.J., Trans. Faraday Soc. 34, 634 (1938)

Se colocan aproximadamente 20g de agua en la celda cilíndrica por medio de una jeringa micrométrica y se adiciona una pequeña cantidad de anfifilo previamente pesada. La solución resultante se agita para homogeneizar el sistema y garantizar la humectación de las paredes internas de la celda y evitar que la espuma colapse antes de alcanzar el equilibrio. Se hace pasar nitrógeno a través de la solución a un flujo constante y se mide la altura de la espuma después de algunos minutos, cuando el sistema alcanza la temperatura de equilibrio 25 °C y la altura de la espuma permanece constante. Se registra la altura y se modifica el flujo de gas, se espera unos minutos para medir la altura de la espuma para el nuevo flujo de gas. Este procedimiento se repite hasta completar el intervalo de flujo que va desde 0-180 cm³/min. Una vez determinada la altura de la espuma a diferentes flujos de gas, se modifica la concentración de la solución agregando una nueva cantidad de anfifilo y la misma operación se repite para diferentes concentraciones. Para cada sistema se obtienen pares de datos (flujo volumétrico en cm³/min, altura h en cm) para cada composición.

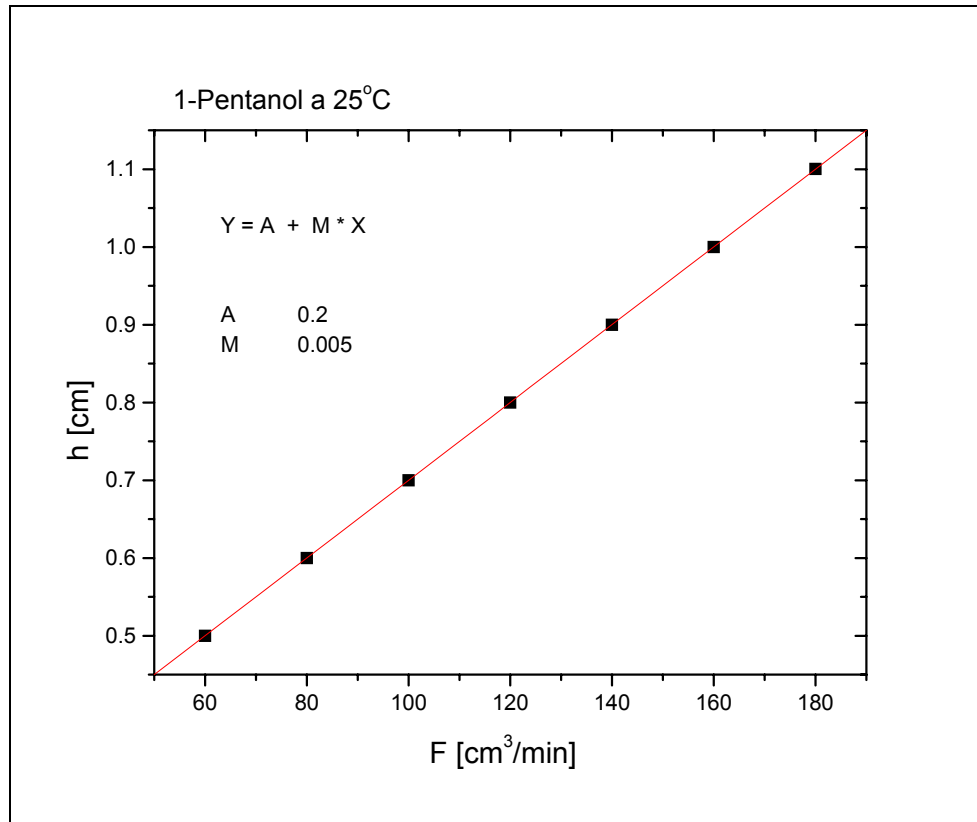


Figura 4.3.- Grafica de altura de espuma (h) contra flujo de Nitrógeno (F) para el calculo de Σ .

A partir de los valores de flujo volumétrico (F) y de altura (h), a cada composición, se obtienen las curvas isafroicas (Σ). La relación altura contra flujo volumétrico para cada composición se ajusta a una línea recta. La pendiente de esta recta (dh/dF), con unidades de $\text{cm} / \text{cm}^3 \text{ min}^{-1}$, es multiplicada por el área transversal de la celda cilíndrica (4.91 cm^2) para obtener el valor de la unidad de estabilidad de espuma transitoria Σ (expresada en minutos). La relación Σ en función de la composición exhibe el comportamiento de una espuma.

Las unidades de estabilidad de espuma para los sistemas éteres monoalquílicos de polietilenglicol y poliéteres lineales fueron obtenidos de datos de la literatura ^{a b}.

4.4.- Calculo del Modulo de Elasticidad de Gibbs.

Para determinar el módulo de elasticidad de Gibbs a partir de los datos experimentales de tensión superficial contra fracción mol, se elige la ecuación de estado superficial que represente satisfactoriamente los datos. (ecuación 3.43 ó 3.45) para obtener los parámetros $\Gamma_{max}RT$ y β , que son necesarios para el cálculo del Módulo de Elasticidad, a través de la ecuación 3.46.

CAPITULO 5

5.- Resultados y Análisis

En este capítulo se muestran los resultados experimentales de tensión superficial de los n-alcoholes (C1 a C8) y las alcanolaminas en medio acuoso, así como los sistemas Glimas y Glicoéteres obtenidos de datos de la literatura. Los resultados de los índices de *Espumabilidad* (Σ) determinados experimentalmente y los seleccionados de la literatura para los diferentes sistemas. Y finalmente el comportamiento predicho de la espuma transitoria vía el modelo y su comparación con los índices de *Espumabilidad* (Σ).

5.1.- Tensión Superficial

Las mediciones de tensión superficial se determinaron utilizando el método de Presión Máxima de Burbuja. Los resultados obtenidos de tensión superficial contra fracción mol para los sistemas alcoholes, alcanolaminas, se presentan a continuación, así como los valores obtenidos de la literatura para las Glimas y los Glicoéteres.

5.1.1- Validación del Método de Presión Máxima de Burbuja

Para verificar la confiabilidad de la técnica empleada y de los resultados experimentales, se reprodujo con datos experimentales la curva de tensión superficial vs fracción mol del sistema metanol + agua a 25 °C cuyos resultados se encuentran reportados en la literatura^a. La *figura 5.1* muestra los valores obtenidos vs los valores de la literatura.

^a Vázquez, Gonzalo, Álvarez Estrella et al. J.Chem. Eng. Data 1995, 40, 611-614

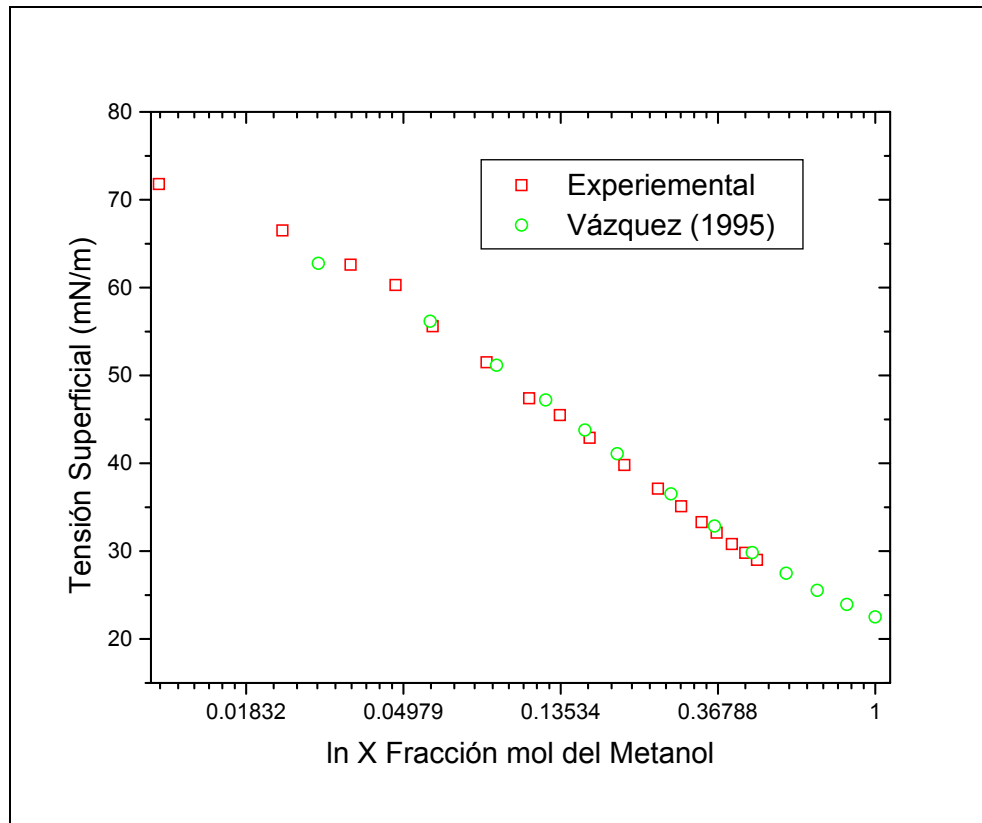


Figura 5.1.- Tensión Superficial contra logaritmo natural de la fracción mol del Metanol a 25°C experimental y publicada en la literatura^a.

Se puede observar que existe correspondencia entre los datos experimentales y los reportados en la literatura.

5.1.2.- Alcoholes

En el caso de los n-Alcoholes, la tensión superficial obedece a un comportamiento análogo a las series homólogas de alcoholes alifáticos normales, los cuales presentan un incremento constante en la actividad superficial al incrementar el número de grupos CH₂. (Figuras 5.2 y 5.3) Para los tres primeros miembros de esta familia homóloga no se logró determinar la tensión superficial en todo el intervalo de concentraciones a pesar de que son compuestos que presentan solubilidad total en agua. Lo anterior fue debido a que el volumen de la celda del equipo de PMB es insuficiente para este propósito. Los demás miembros de esta familia homóloga presentan inmiscibilidad en agua a una concentración característica.

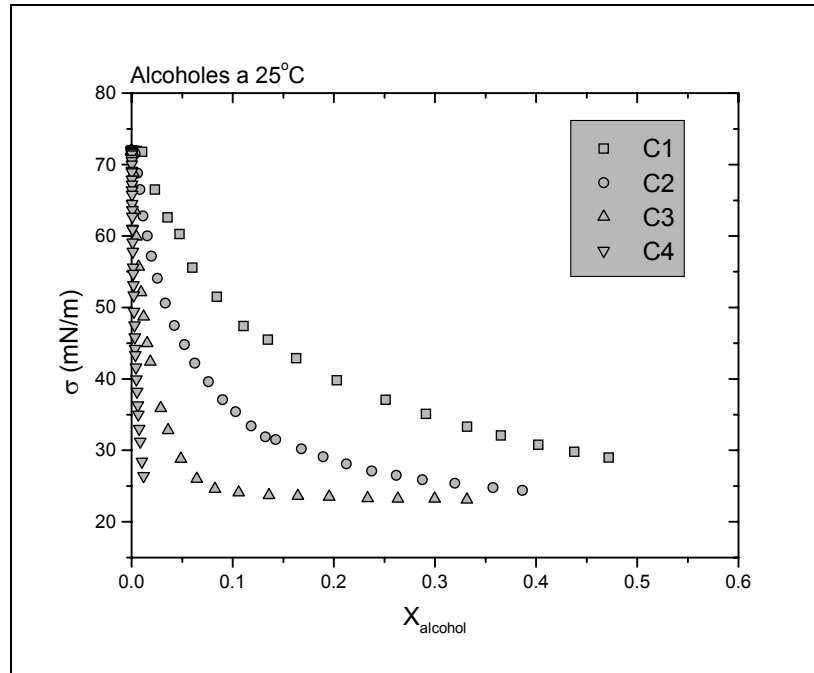


Figura 5.2.- Tensión superficial en función de la fracción mol de los alcoholes C1, C2, C3, C4 + agua.

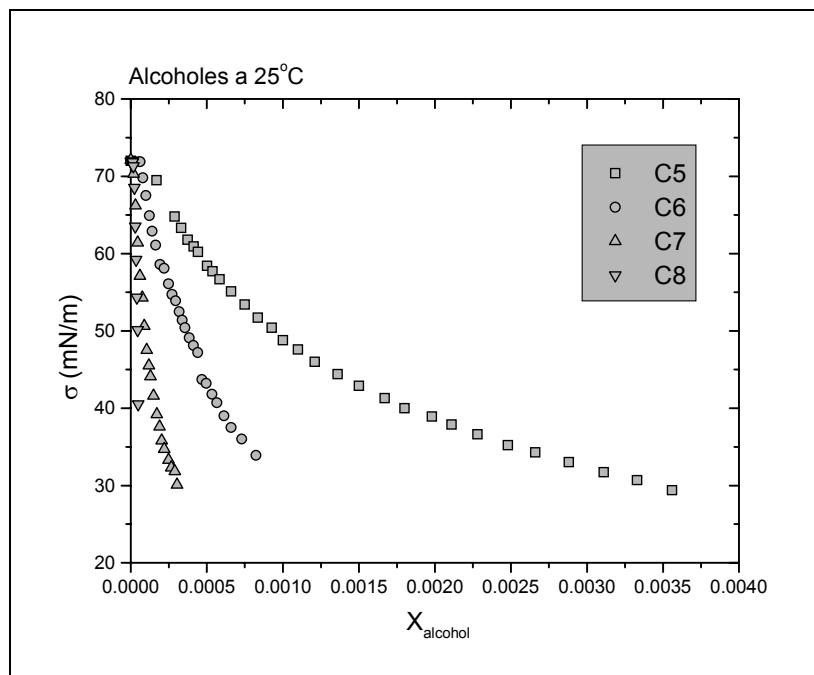


Figura 5.3.- Tensión superficial en función de la fracción mol del alcohol para los alcoholes C5, C6, C7, C8 + agua.

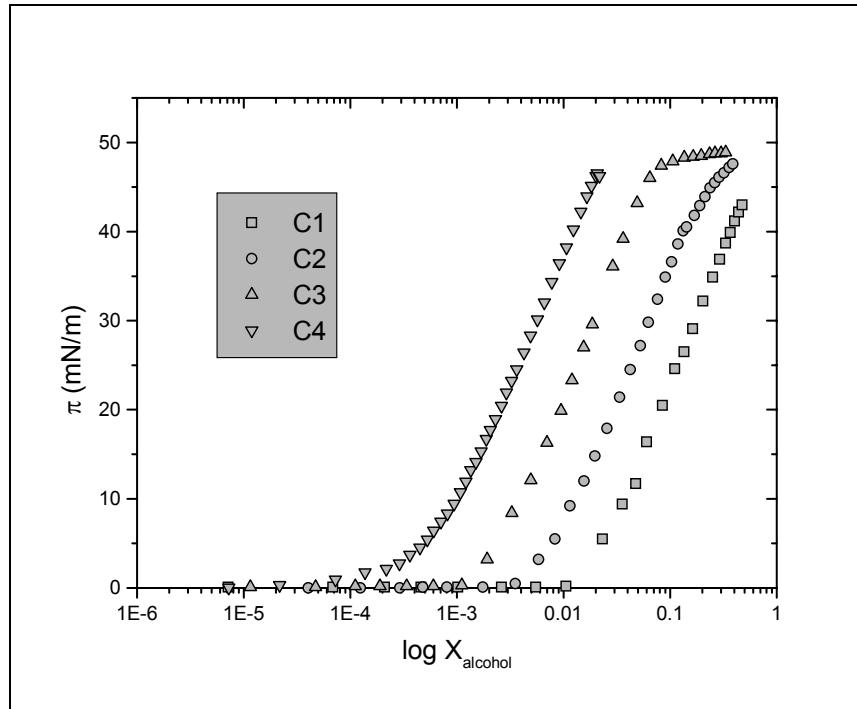


Figura 5.4.- Presión superficial en función del logaritmo de la fracción mol de los alcoholes C1, C2, C3, C4 + agua.

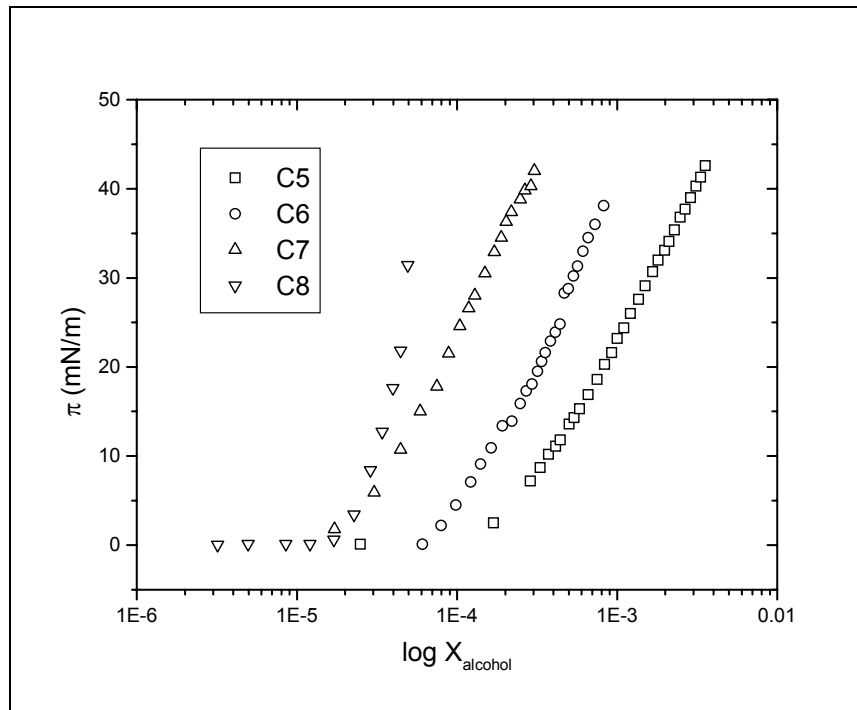


Figura 5.5.- Presión superficial en función del logaritmo de la fracción mol de l alcohol en escala logarítmica para los sistemas C5, C6, C7, C8 + agua.

Las *figuras 5.2 y 5.3* muestran los valores obtenidos del experimento son suficientes para su posterior tratamiento ya que en el caso donde los alcoholes son solubles en cualquier composición, se llegó prácticamente a la saturación superficial. En el caso de los alcoholes que presentan miscibilidad parcial en agua, se estudió la región diluida de una sola fase líquida únicamente hasta antes de la insolubilidad.

En la representación de la presión superficial en función el logaritmo de la fracción mol, (*figura 5.4*) sólo el n-propanol (C3) presenta cambio drástico en la pendiente, la cual es asociada a una agregación en solución.

5.1.3- Alcanolaminas

La *figura 5.6* muestra el comportamiento de la tensión superficial en función de la fracción mol de diferentes alcanolaminas, donde la tensión superficial decrece con el incremento de la fracción mol de alcanolamina.

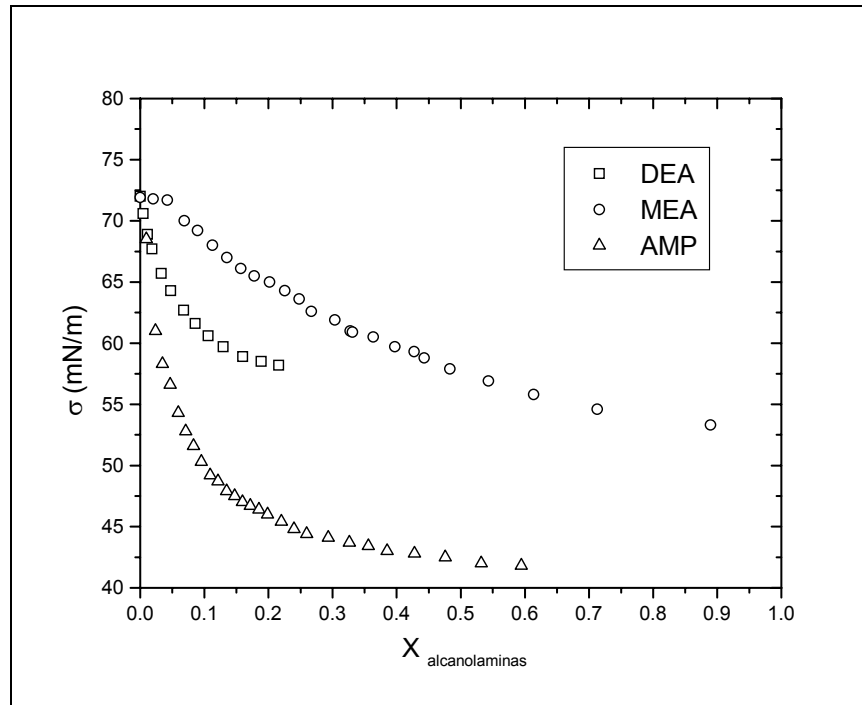


Figura 5.6.- Tensión superficial experimental en función de la fracción mol de las alcanolaminas MEA, DEA y AMP + agua a 25°C

Como en el caso de los n-alcoholes, no se determinó la tensión superficial en todo el intervalo de concentración. La viscosidad de las soluciones de alcanolaminas se incrementa cuando se aumenta la concentración del soluto, dando como resultado errores en los valores de tensión superficial determinados con el método de PMB. El incremento de la presión hidrodinámica de la solución que se resiste a la formación de la burbuja adiciona aproximadamente 10 mN/m a la tensión superficial.

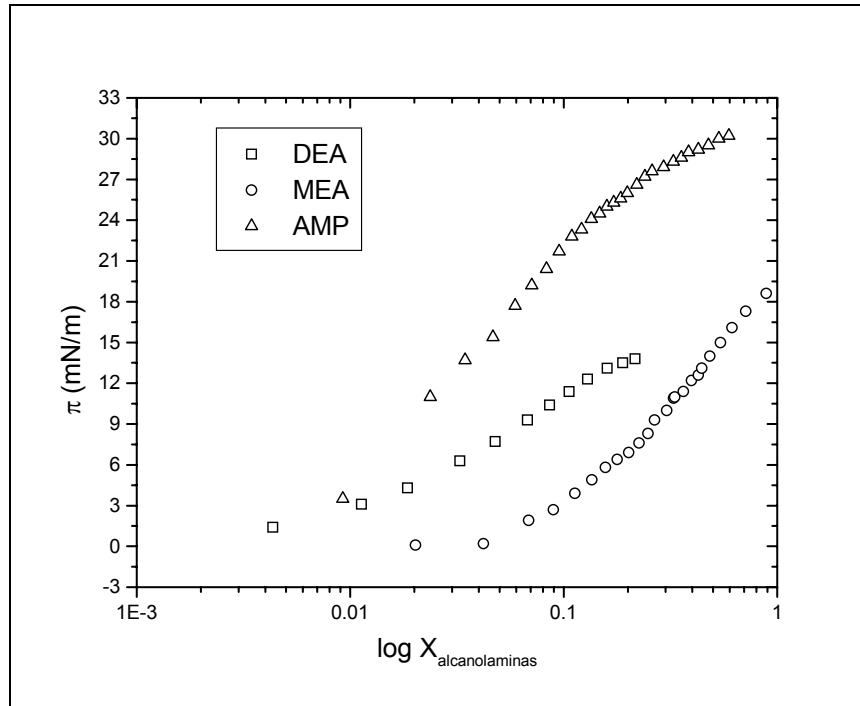


Figura 5.7.- Presión superficial en función del logaritmo natural de la fracción mol de las alcohólaminas MEA, DEA y AMP a 25°C.

5.1.4.- Glimas y Glicoéteres

A continuación se presentan las gráficas de tensión superficial en función de la fracción mol de los sistemas Glimas y Glicoéteres, así como el comportamiento de la presión de superficial en función del logaritmo de la fracción mol a partir de los datos obtenidos de la literatura^{b c}.

Glimas

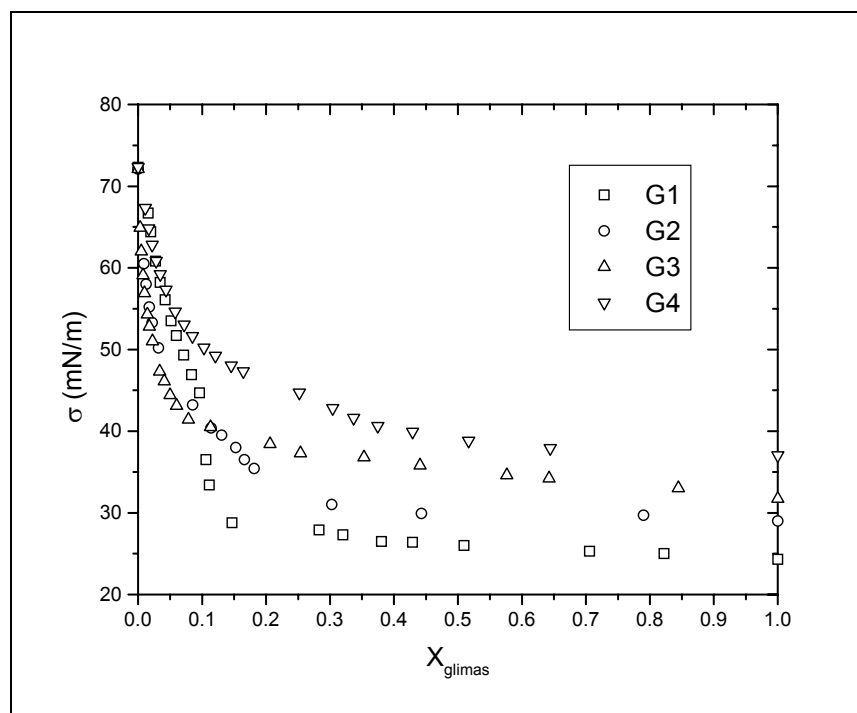


Figura 5.8.- Tensión superficial experimental en función de la fracción mol de las Glimas G1, G2, G3, G4 + agua a 25°C.

^b Trejo Candelas Luis Miguel. Tesis de Doctorado. Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (1995)

^c Rodríguez Alvarado Nora R. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, (2002)

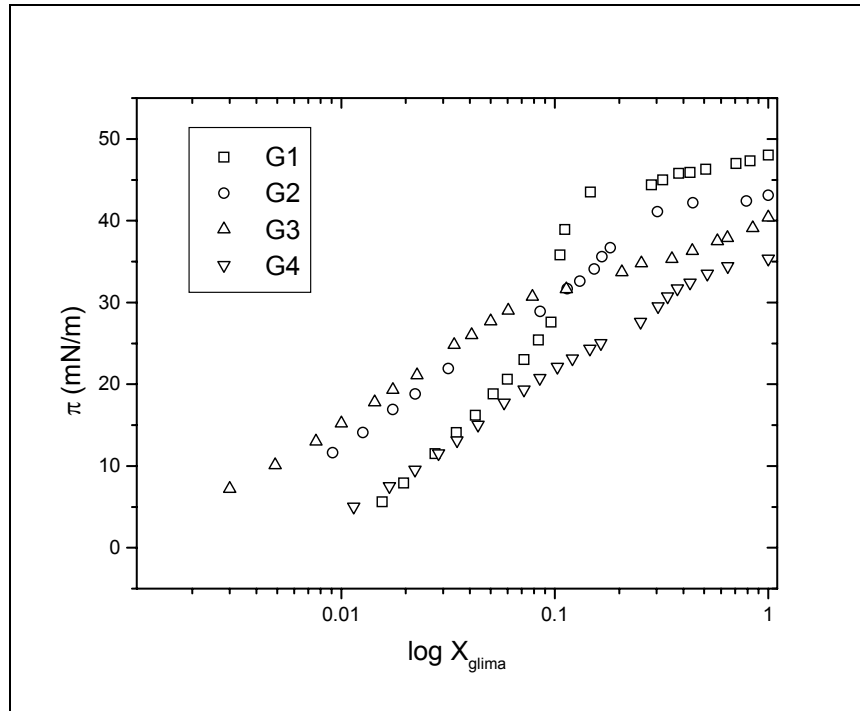


Figura 5.9.- Presión superficial en función del logaritmo de la fracción mol de las Glimas G1, G2, G3 y G4 + agua a 25°C.

Glicoéteres

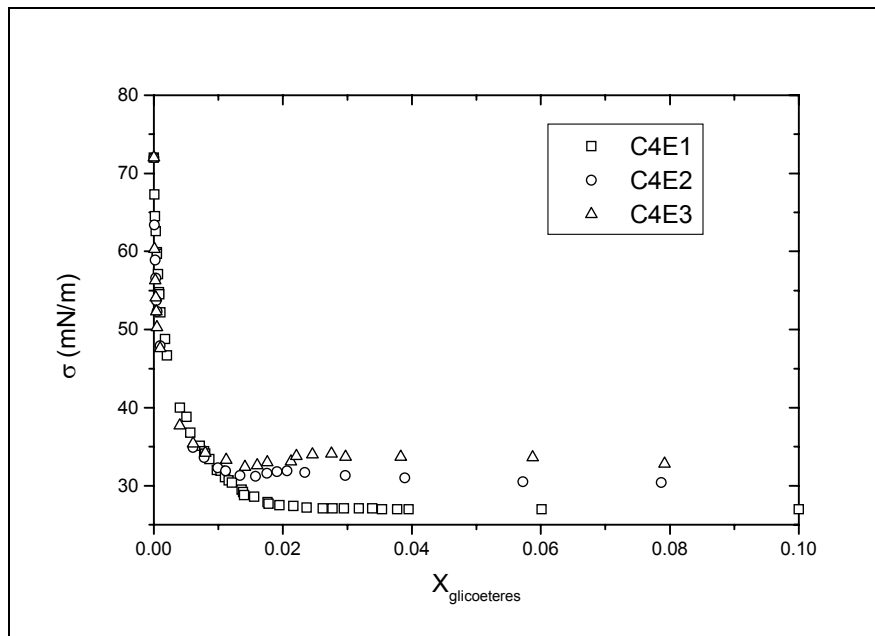


Figura 5.10.- Tensión superficial en función de la fracción mol de los Glicoéteres C4E1, C4E2 y C4E3 + agua a 25°C.

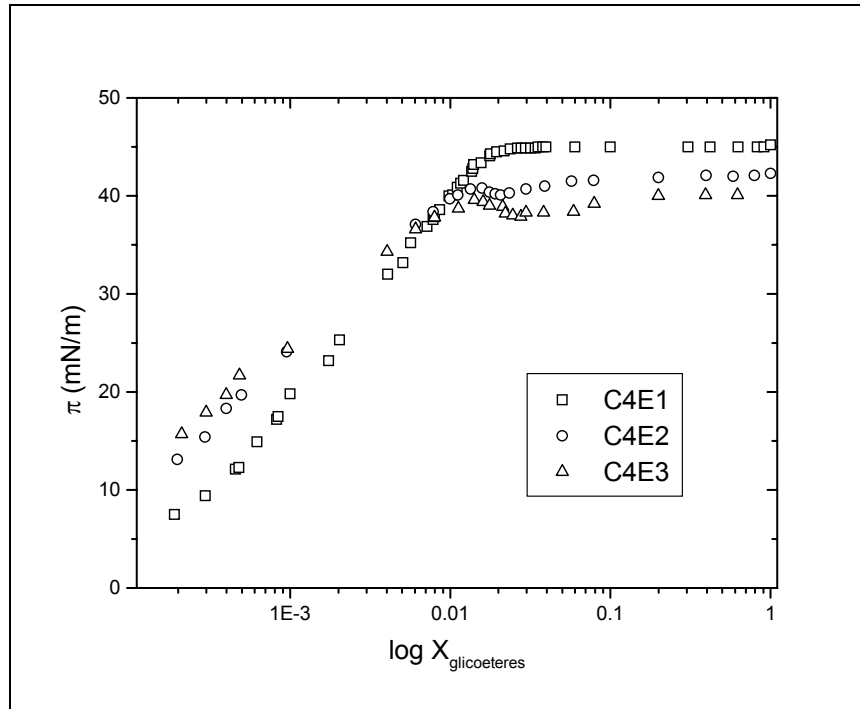


Figura 5.11.- Presión superficial en función del logaritmo de la fracción mol de los Glicoéteres C4E1, C4E2 y C4E3 + agua a 25°C.

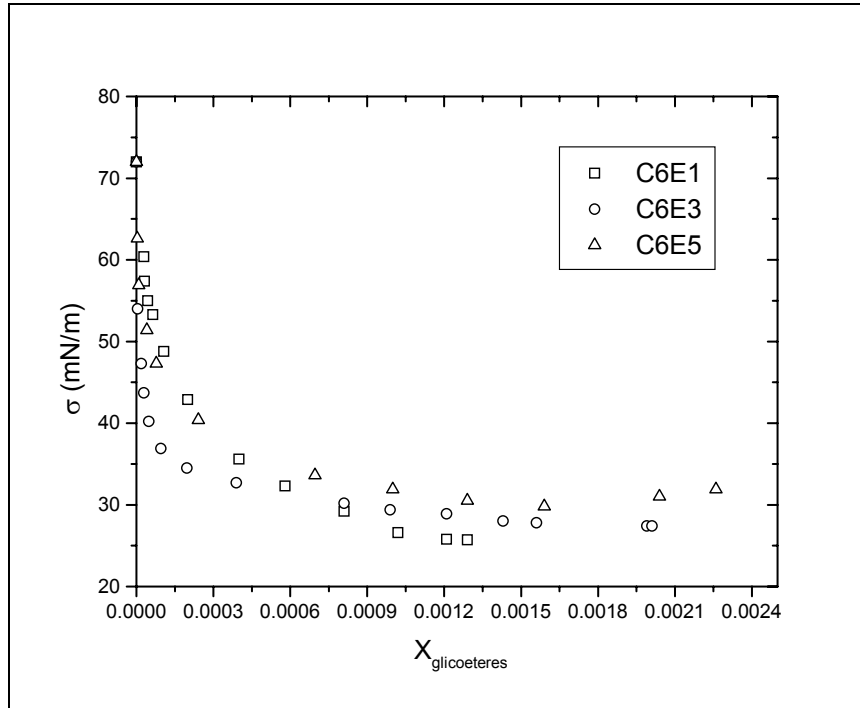


Figura 5.12.- Tensión superficial en función de la fracción mol de los Glicoéteres C6E1, C6E3 y C6E5 + agua a 25°C.

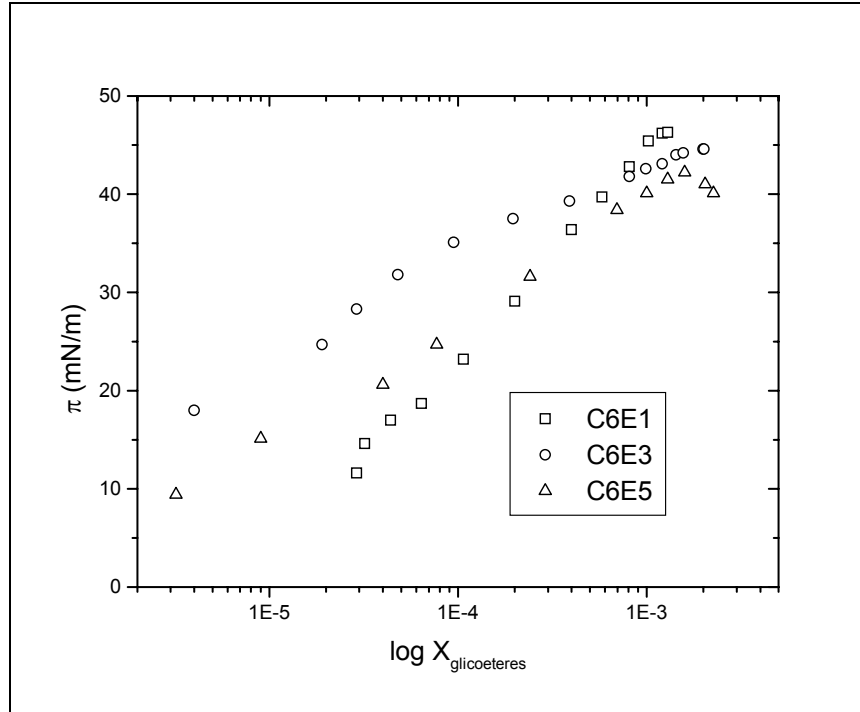


Figura 5.13.- Presión superficial en función del logaritmo de la fracción mol de los Glicoéteres C6E1, C6E3 y C6E5 + agua a 25°C.

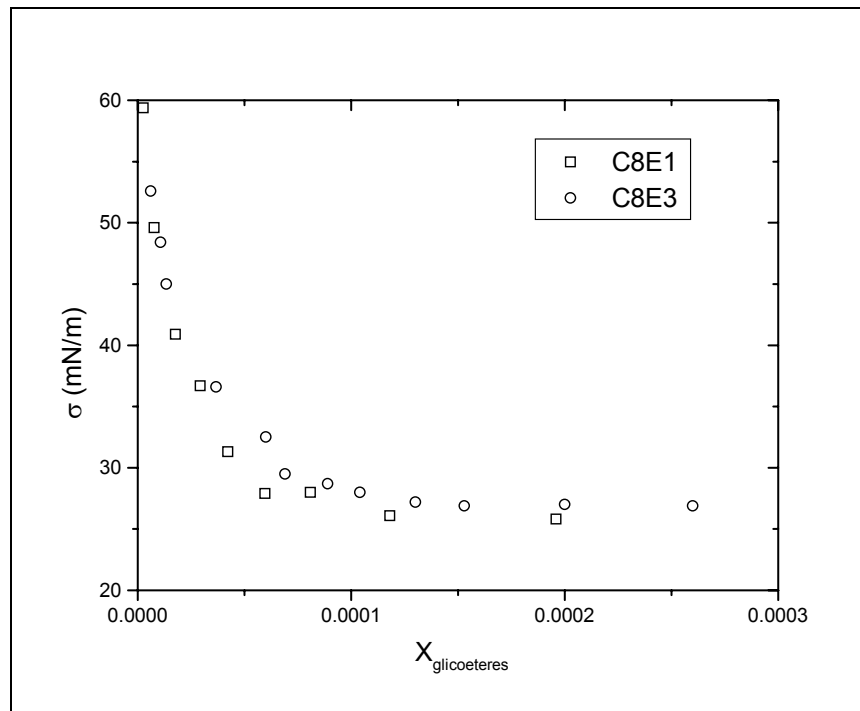


Figura 5.14.- Tensión superficial en función de la fracción mol de los Glicoéteres C8E1 y C8E3 + agua a 25°C.

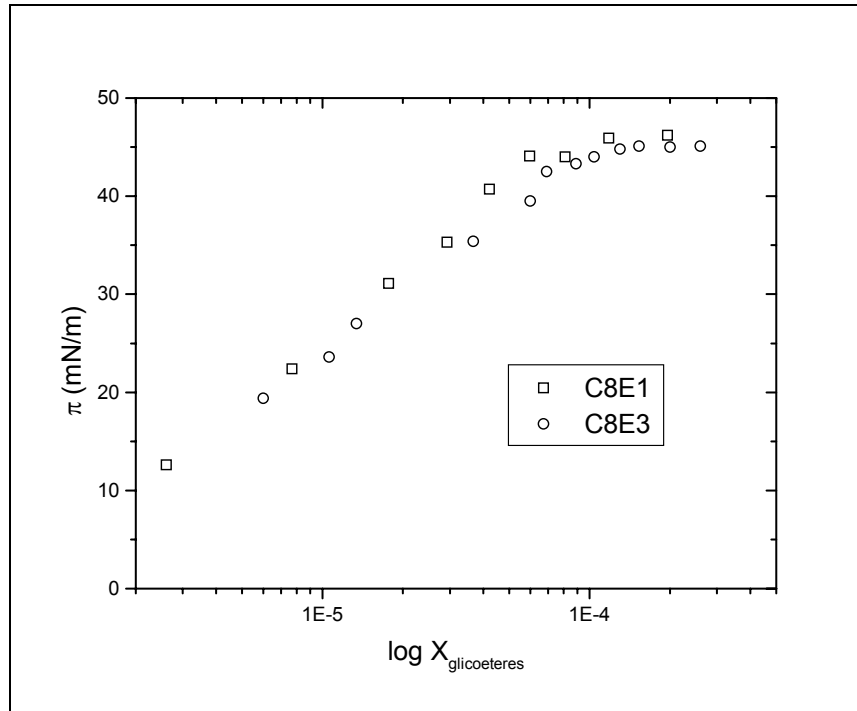


Figura 5.15.- Presión superficial en función del logaritmo de la fracción mol de los Glicoéteres C8E1 y C8E3 + agua a 25°C.

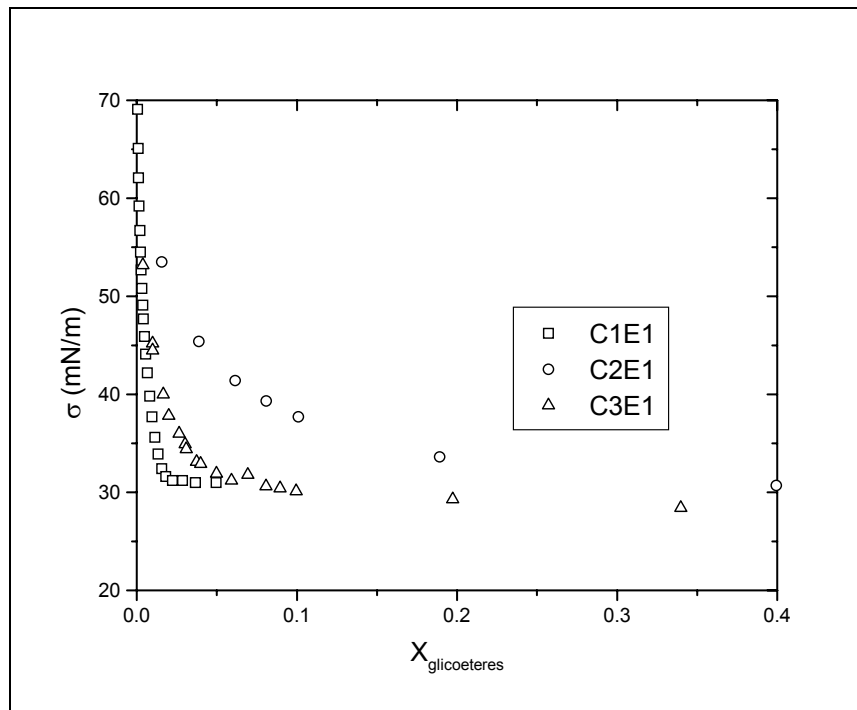


Figura 5.16.- Tensión superficial en función del fracción mol de los Glicoéteres C1E1, C2E1 y C3E1 + agua a 25°C.

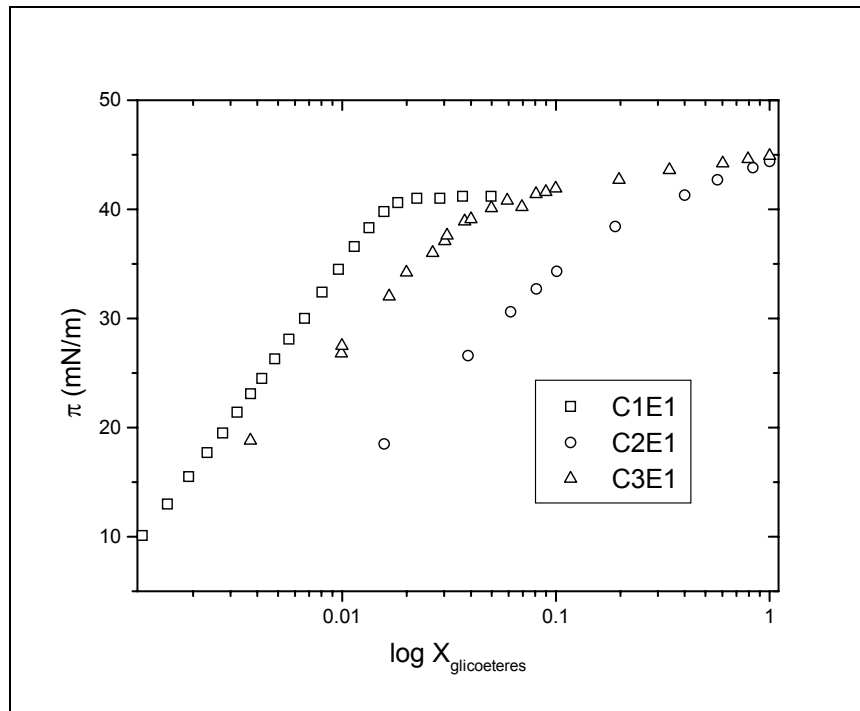


Figura 5.17.- Presión superficial en función del logaritmo de la fracción mol de los Glicoéteres C1E1, C2E1 y C3E1 + agua a 25°C.

5.2.- Índice de Estabilidad en Espumas Transitorias

La figura 5.18 muestra el comportamiento típico de la altura de espuma en función del flujo volumétrico a una composición de bulto fija. En la gráfica se advierte que la regresión lineal sobre los datos experimentales para obtener la pendiente (m), de donde se puede calcular el índice de espumabilidad a concentración fija. De aquí se obtiene un valor para Σ en función de x .

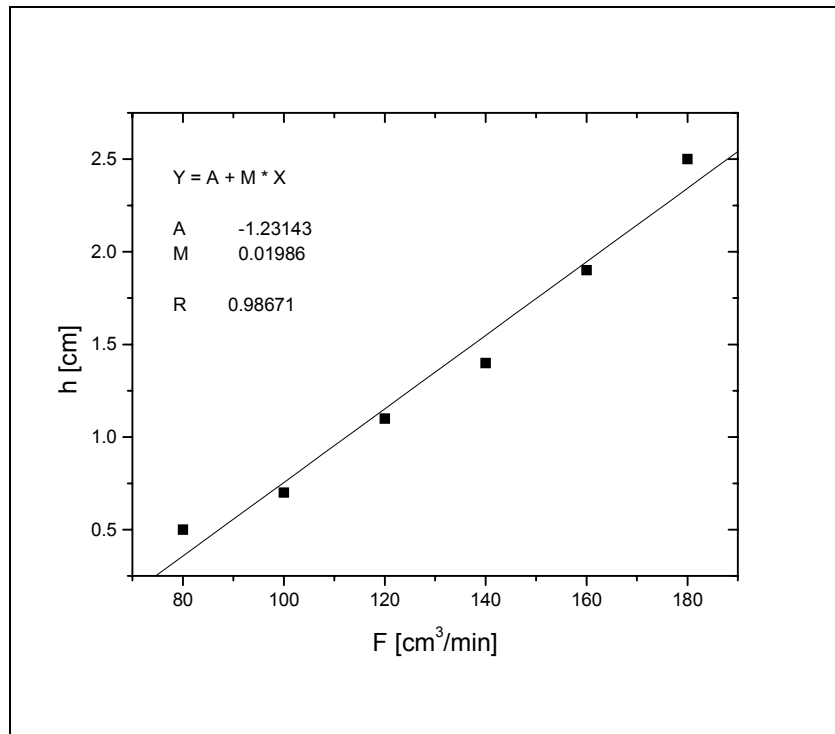


Figura 5.18. Altura de espuma (h) en función del Flujo de Nitrógeno (F) y ajuste lineal para el cálculo de Σ del sistema Butanol – Agua a $x_{but} = 0.00134$, a 25°C.

La pendiente tiene unidades min/cm^2 . Para obtener el valor del índice de Espumabilidad Σ , en segundos, hay que multiplicar el valor de la pendiente por el área transversal de la celda (diámetro interior de 2.5 cm.). Posteriormente se multiplica por 60 para obtener Σ en segundos.

Las figuras 5.19 a 5.26 presentan los resultados de la estabilidad de diferentes espumas transitorias formadas por los n-alcoholes y las alcanolaminas. Todas las mezclas estudiadas forman espumas transitorias con un máximo en el índice de estabilidad de espuma (Σ) a una concentración característica.

Alcoholes

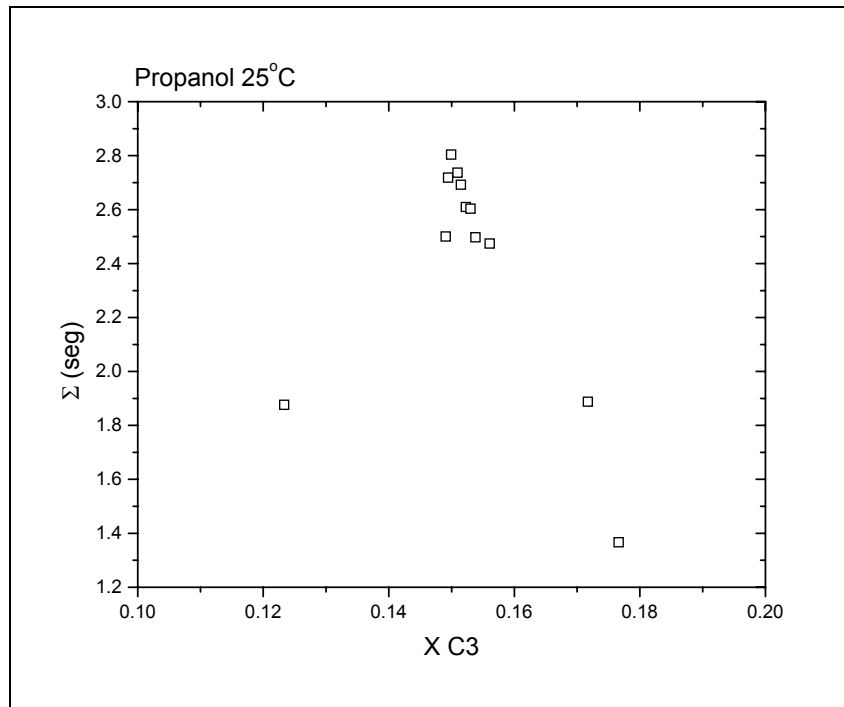


Figura 5.19.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de Propanol + agua

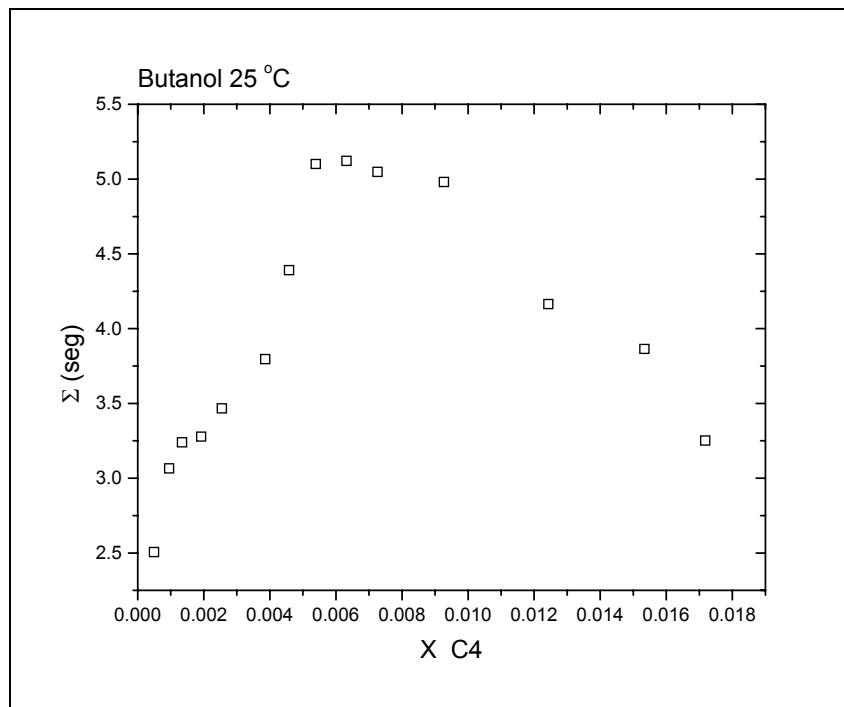


Figura 5.20.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de Butanol + agua

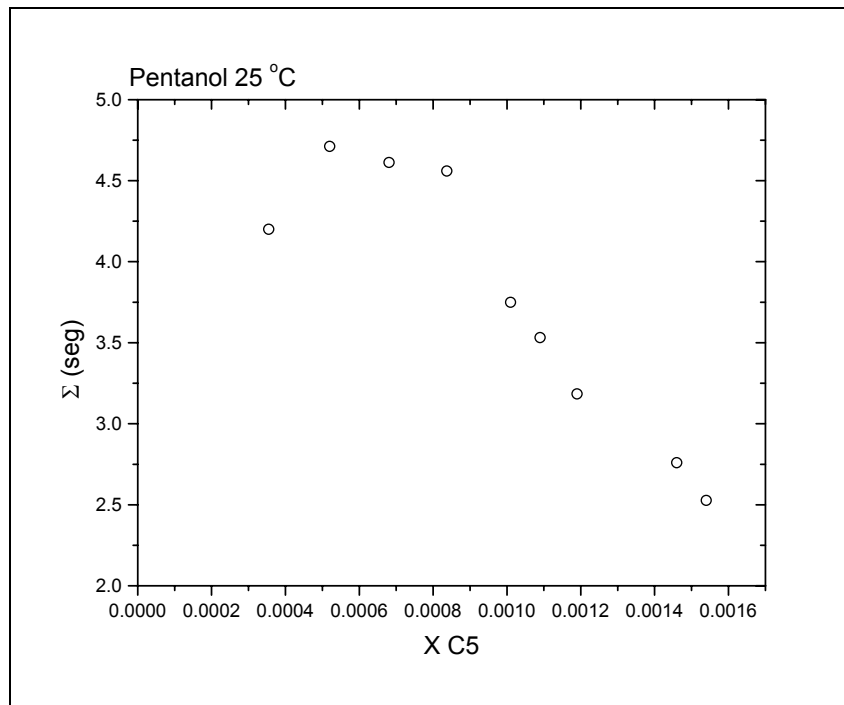


Figura 5.21.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de Pentanol + agua

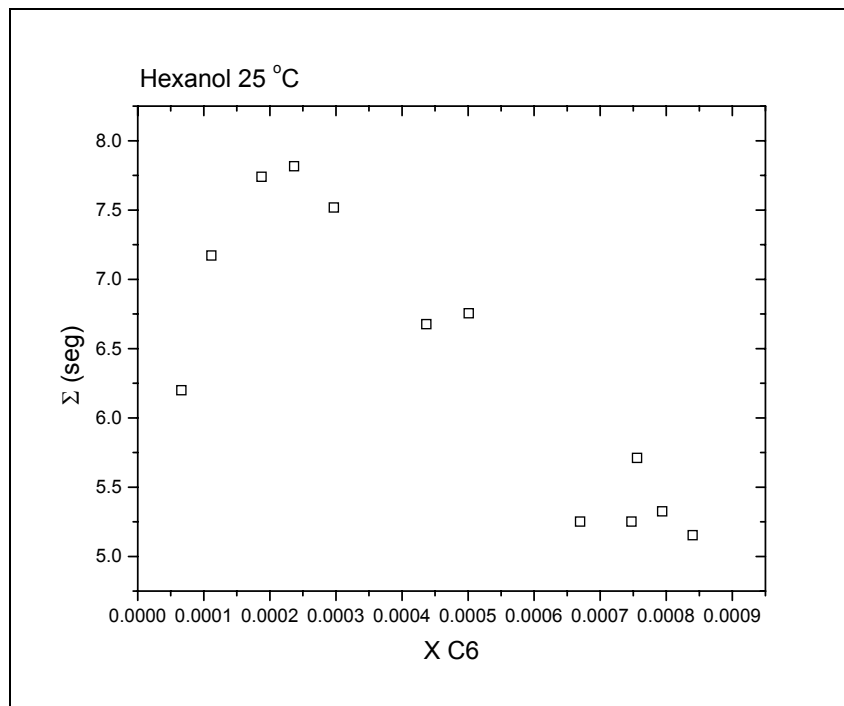


Figura 5.22.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de Hexanol + agua

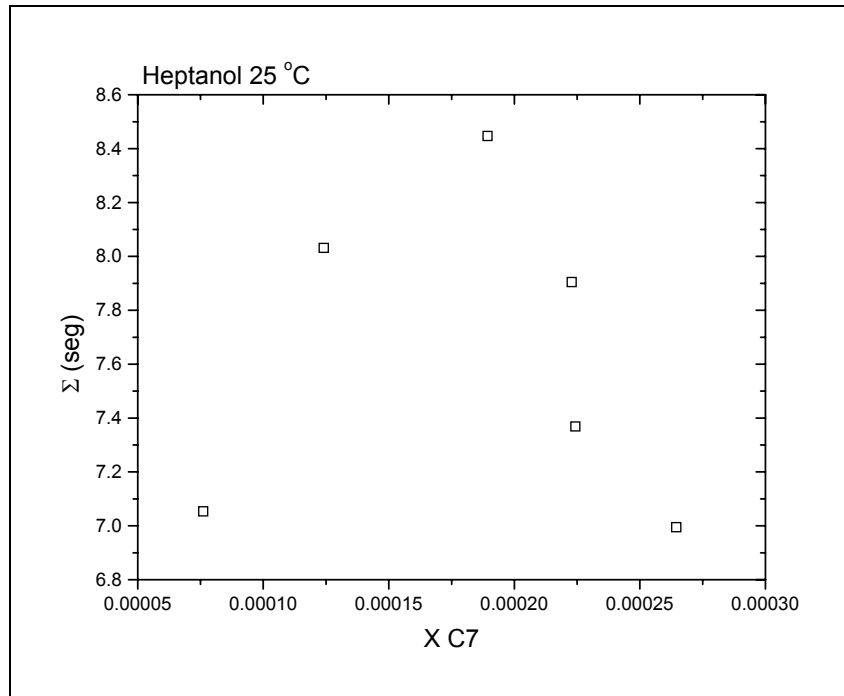


Figura 5.23.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de Heptanol + agua

Alcanolaminas

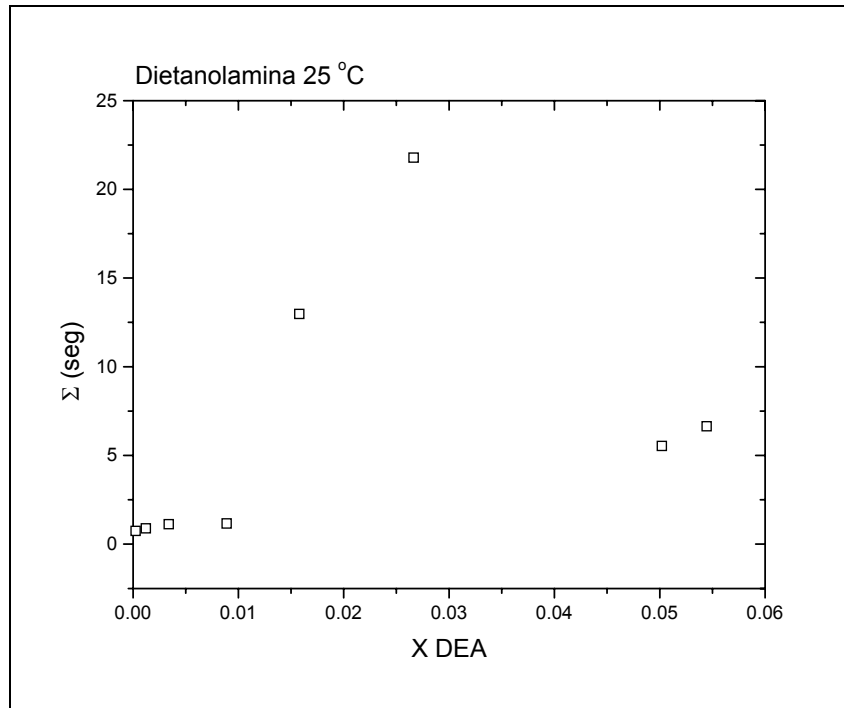


Figura 5.24.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de DEA + agua

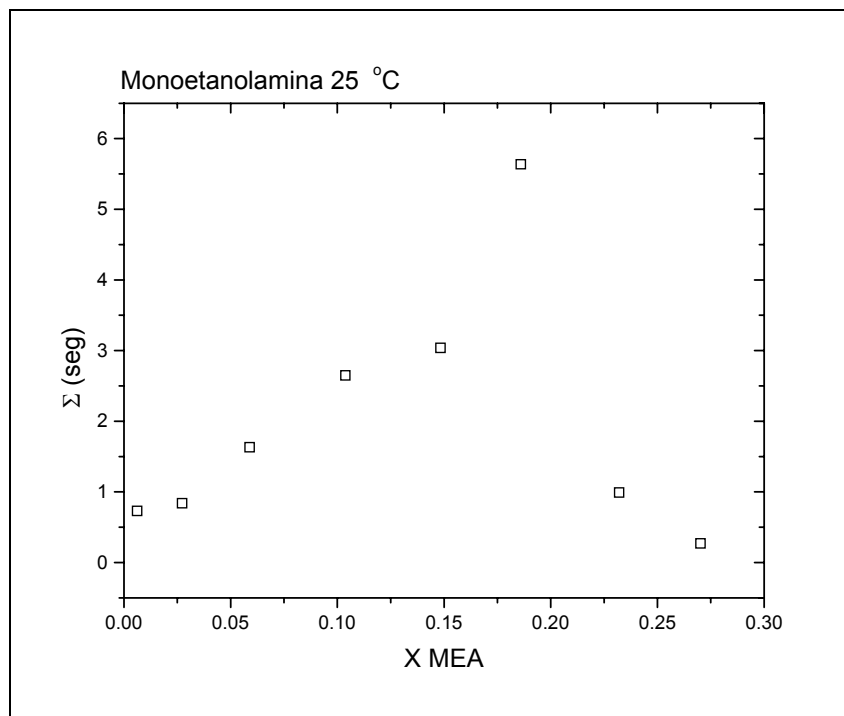


Figura 5.25.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de MEA + agua

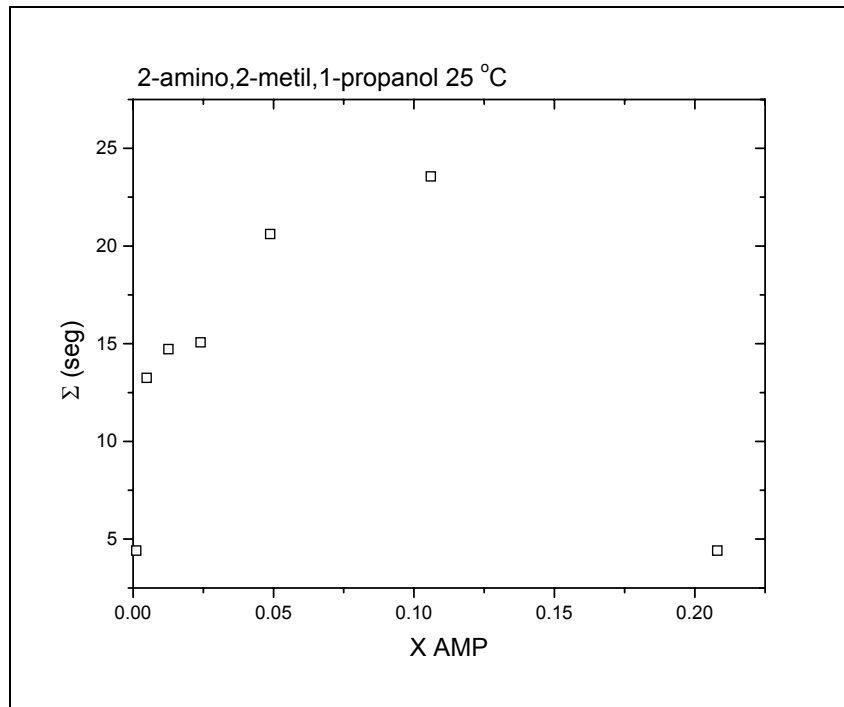


Figura 5.26.- Índice de Espumabilidad Σ en función de la fracción mol de AMP + agua

5.3.- Resultados del Modelo

Para determinar el Módulo de Elasticidad de Gibbs se obtienen los parámetros $\Gamma_{max}RT$ y β a partir de un ajuste de los datos de presión superficial vs fracción mol para cada uno de los sistemas por medio de la ecuación 3.44 o la ecuación 3.45.

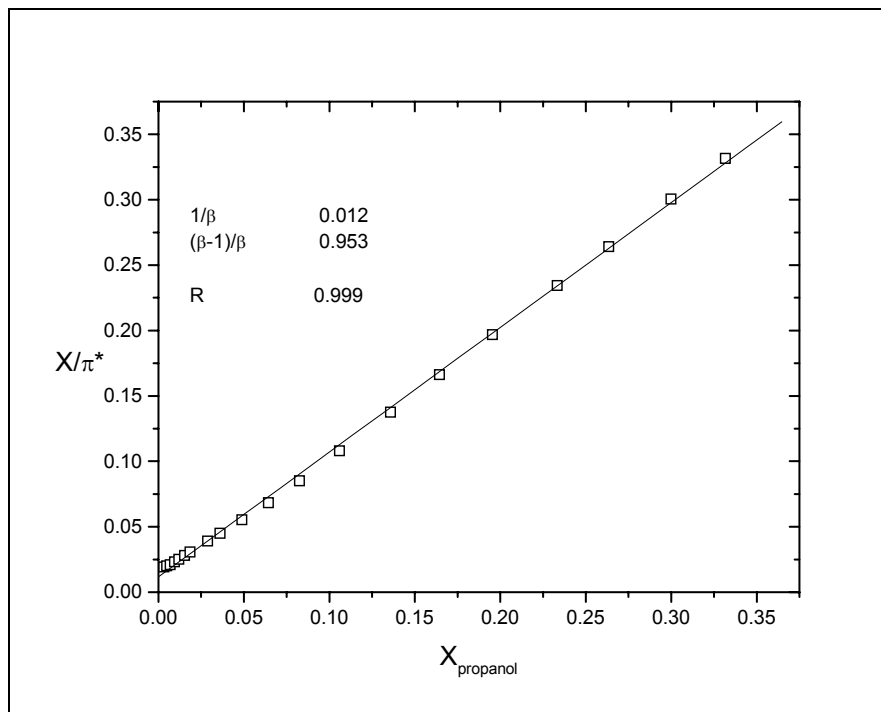


Figura 5.27. Sistema n-propanol en agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la línea de ajuste

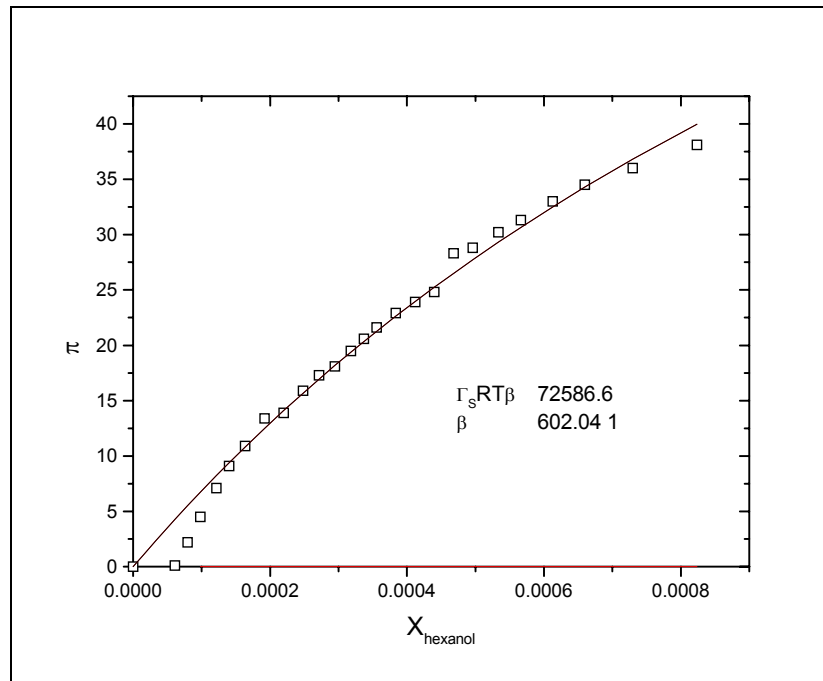


Figura 5.28. Datos del sistema n-hexanol en agua a 25°C según la ecuación 3.45 y la correspondiente curva de ajuste

Las ecuaciones 3.44 y 3.45 reproducen el comportamiento de la presión superficial en función de la composición de los sistemas en estudio, ver *figuras 5.27 y 5.28*. El criterio para utilizar una u otra ecuación radica en la consideración de que $\Gamma_{max}RT = \pi^o$. Cuando esa suposición se cumple, los datos pueden ser ajustados a la ecuación 3.44. En los sistemas donde la representación lineal no arroja buenos resultados, los datos son ajustados utilizando la ecuación 3.45; en estos casos $\Gamma_{max}RT \neq \pi^o$.

Para calcular el módulo de elasticidad de Gibbs se utilizan los parámetros $\Gamma_s RT$ y β en la ecuación 3.46, la cual corresponde al modelo propuesto de predicción del comportamiento de espuma transitoria. Al analizar el modelo, se concluye que éste diverge cuando la fracción mol toma los valores $x = -1/(\beta - 1)$ y $x = 1/(\beta - 1)$, donde sólo el segundo valor tiene significado físico. El comportamiento del Módulo de Elasticidad de Gibbs en función de la fracción mol se muestra en la *figura 5.29*, donde se aprecian dos curvas o ramas asintóticas.

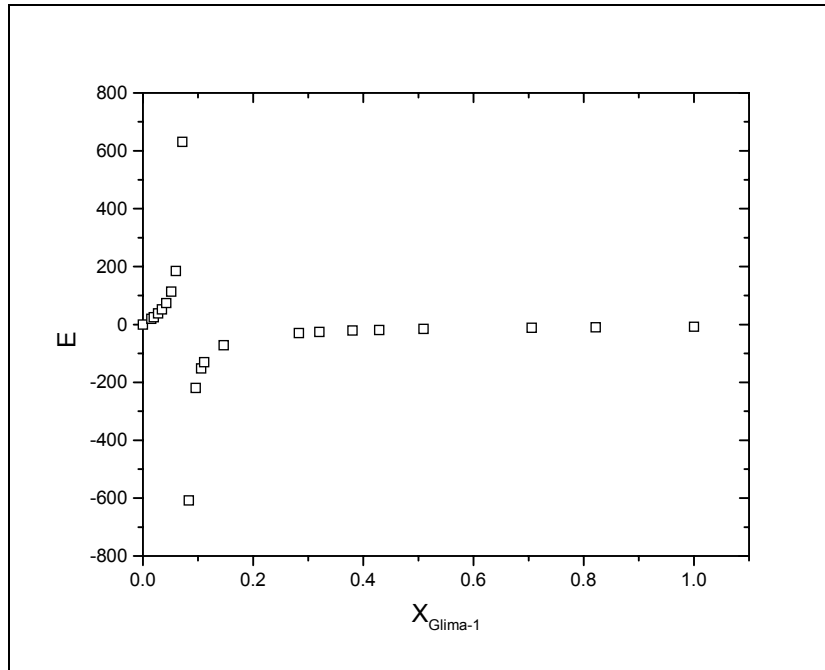


Figura 5.29. Módulo de Elasticidad de Gibbs calculado a partir de la ecuación 3.46 utilizando los parámetros obtenidos del ajuste de la ecuación 3.44 para el sistema Glimma-1 + agua

La rama asintótica negativa no tiene ningún sentido físico ya que el valor que corresponde a la nula estabilidad de la espuma es cero y no a valores negativos. Además, el modelo propuesto está en función de la primera y segunda derivada de la presión superficial con respecto a la fracción mol. ecuación (3.19), las cuales son positivas en todo el intervalo de composición, esto es, $d\pi/dx \geq 0 \Rightarrow E \geq 0$. Bajo estas condiciones, el módulo de elasticidad es siempre positivo, como consecuencia de estas consideraciones, se toma el valor absoluto de la parte negativa. El resultado es la figura 5.29a:

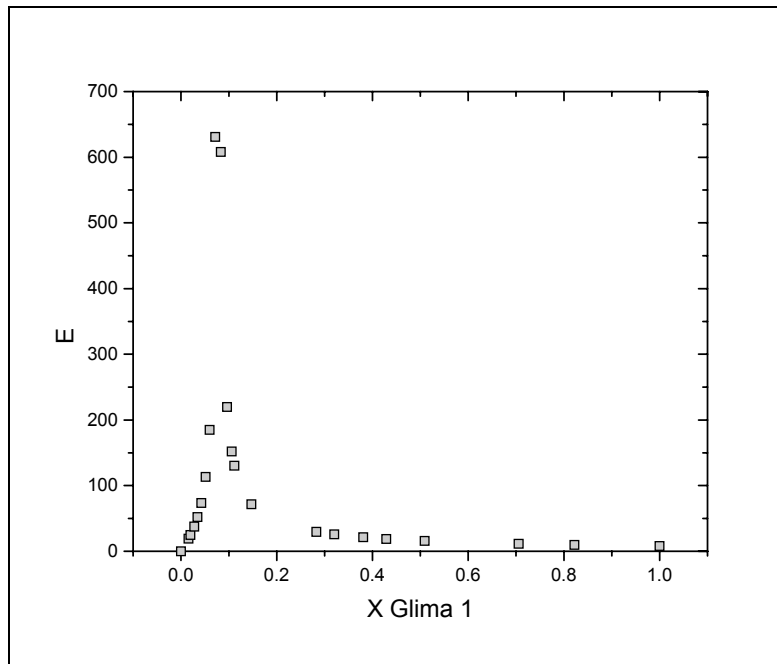


Figura 5.29a. Módulo de Elasticidad de Gibbs del valor absoluto de la parte negativa para el sistema Glima-1 + agua

La figura 5.29a presenta la predicción del comportamiento del módulo de elasticidad a partir del modelo propuesto. Se puede observar que éste reproduce adecuadamente el comportamiento típico de una espuma transitoria; el módulo de elasticidad aumenta con el aumento de la fracción mol, hasta que llega a un máximo en una concentración característica y después decae.

A continuación se presentan las gráficas de ajuste de los parámetros $\Gamma_{max}RT$ y β , las gráficas del módulo de Elasticidad de Gibbs calculado con el modelo, junto con el índice de Espumabilidad para cada sistema estudiado y se procede a hacer una comparación entre el pronóstico del modelo y el índice de espumabilidad (Σ)

Alcoholes

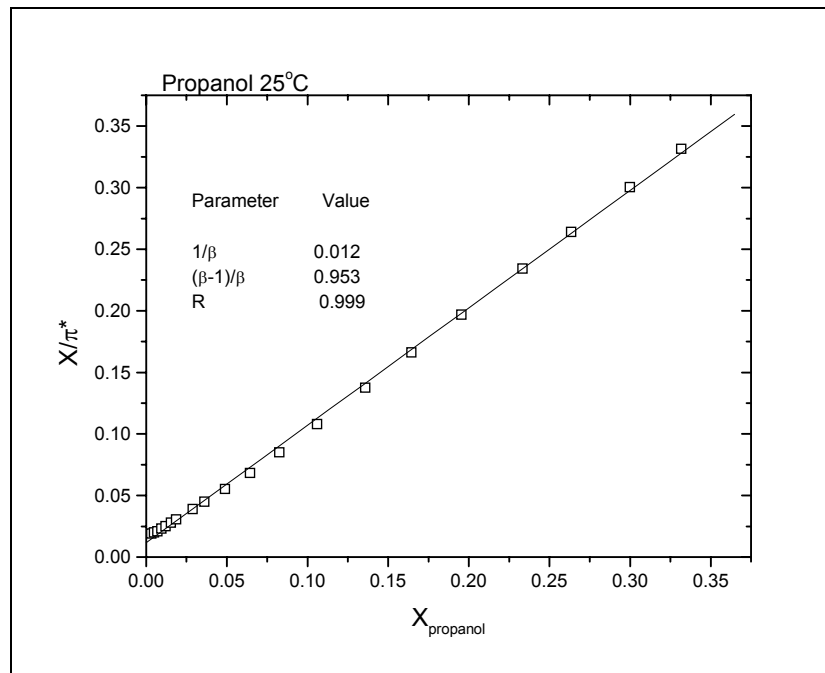


Figura 5.30. Datos del sistema n-propanol + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

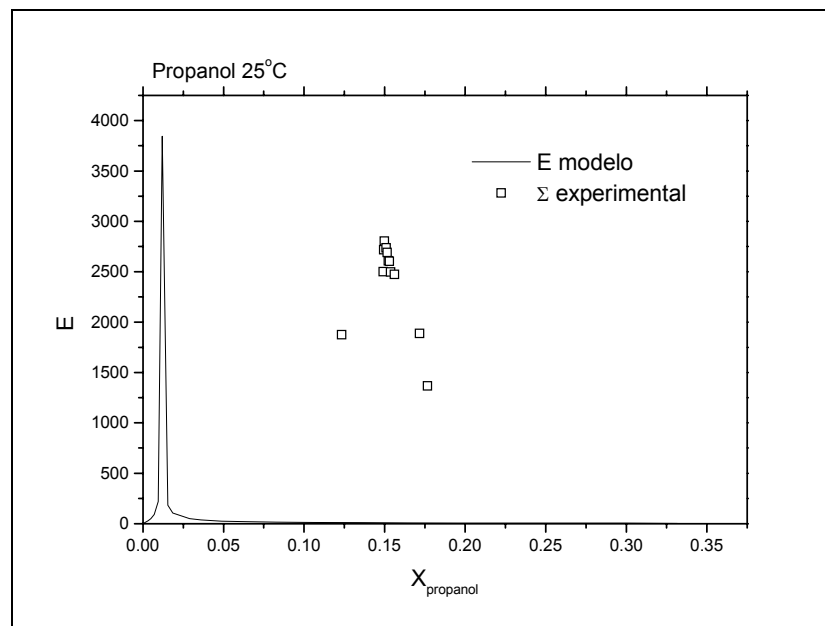


Figura 5.31. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema n-propanol + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

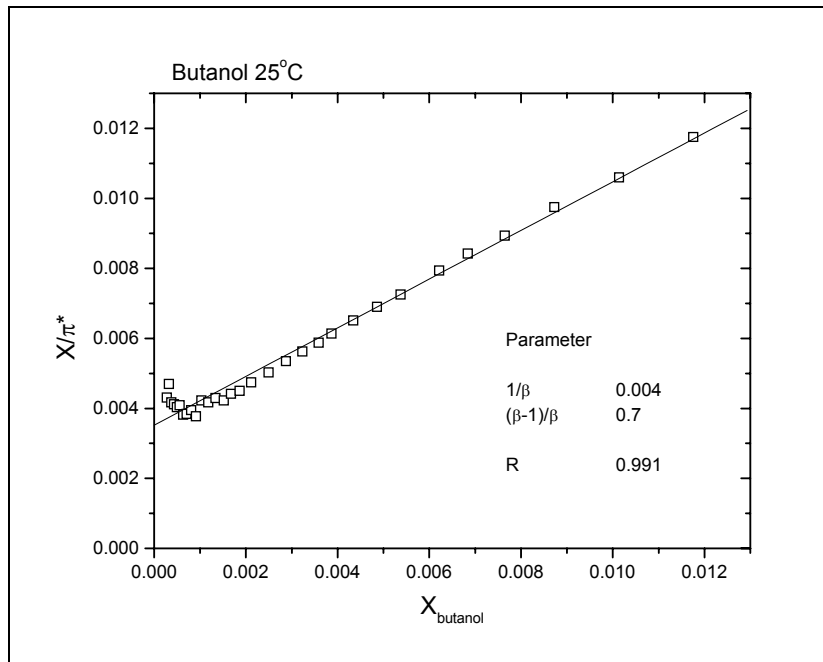


Figura 5.32. Datos del sistema n-butanol + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

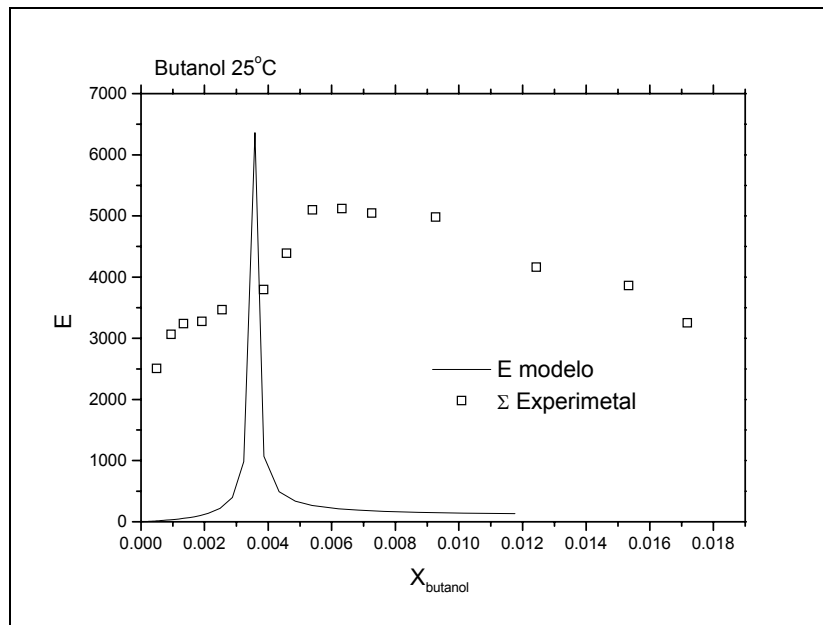


Figura 5.33. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema n-butanol + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

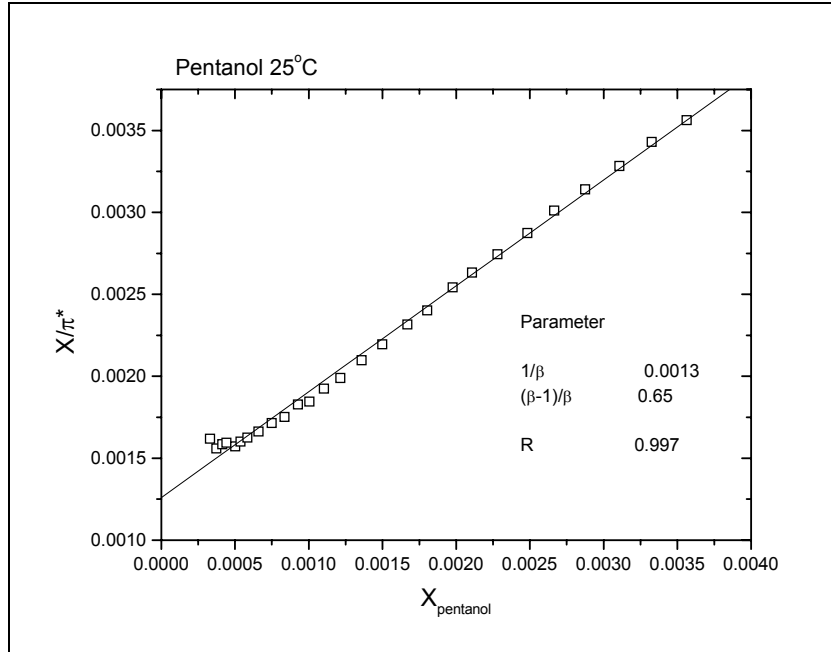


Figura 5.34. Datos del sistema n-pentanol + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

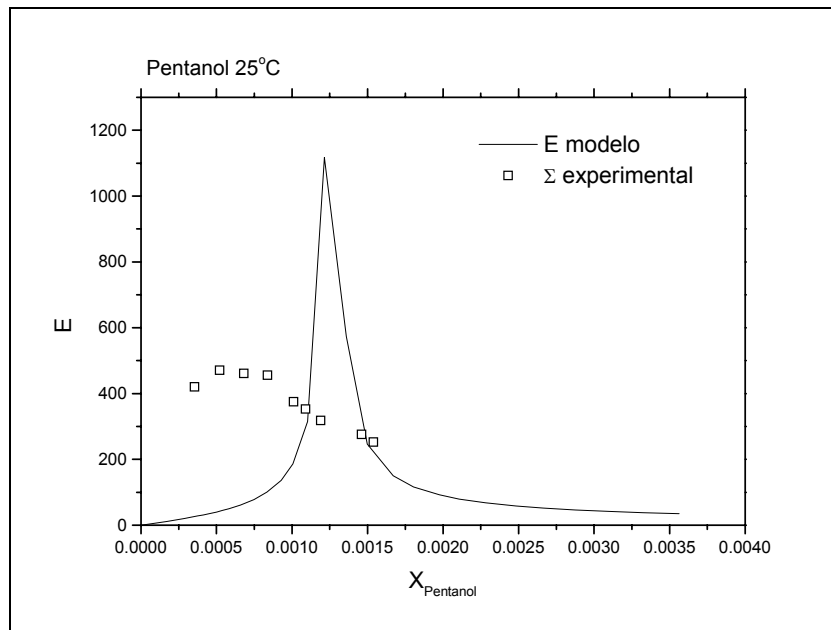


Figura 5.35. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema n-pentanol + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafrícos.

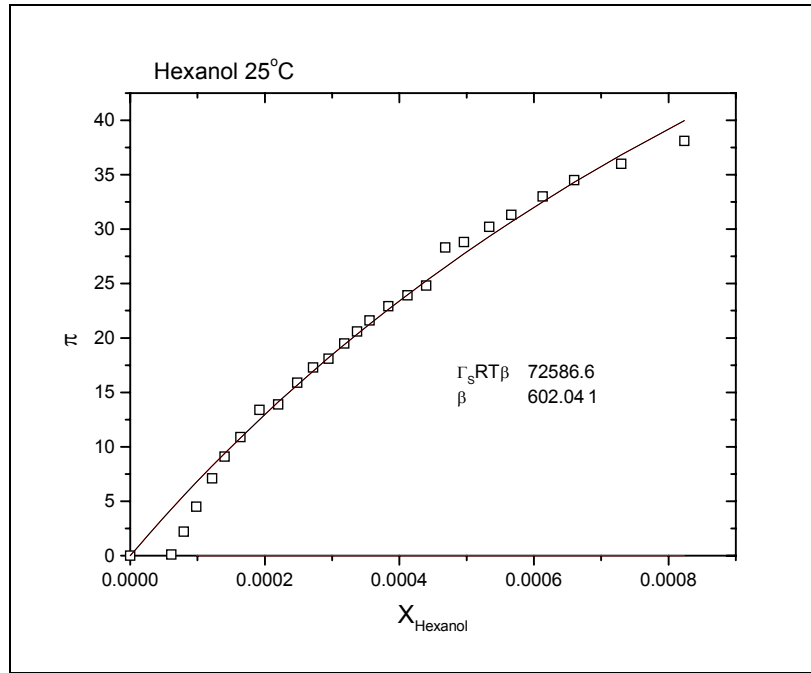


Figura 5.36. Datos del sistema n-hexanol + agua a 25°C según la ecuación 3.45 y la correspondiente línea de ajuste

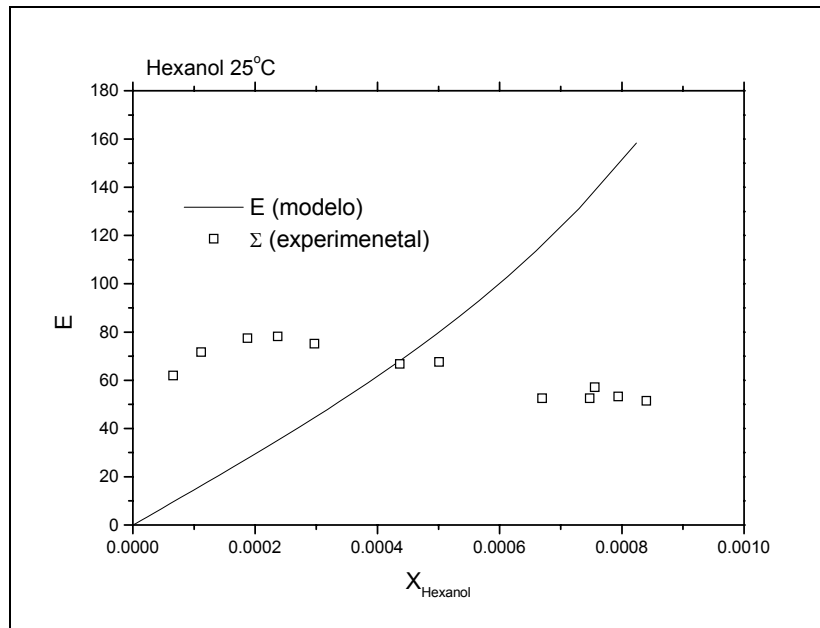


Figura 5.37. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema n-hexanol + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

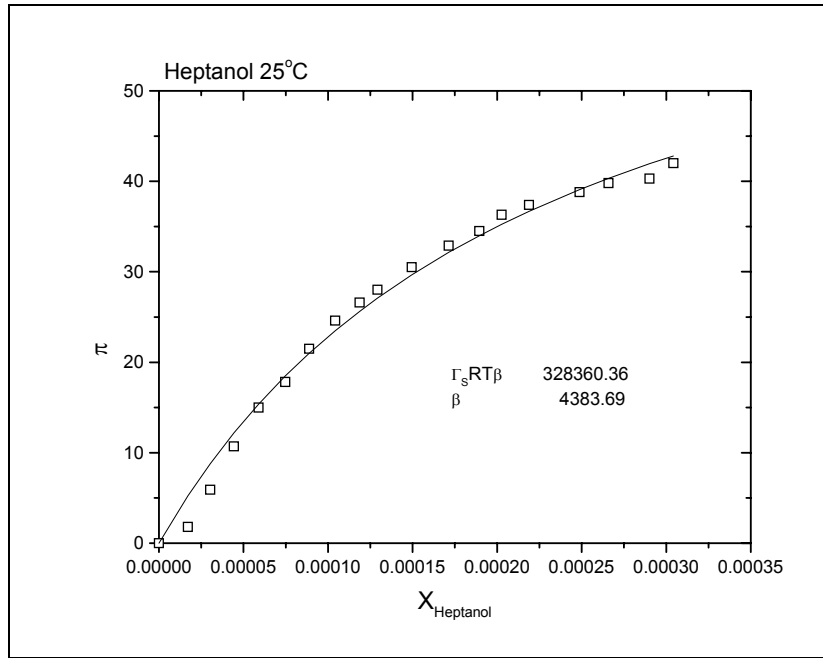


Figura 5.38. Datos del sistema n-heptanol + agua a 25°C según la ecuación 3.45 y la correspondiente línea de ajuste

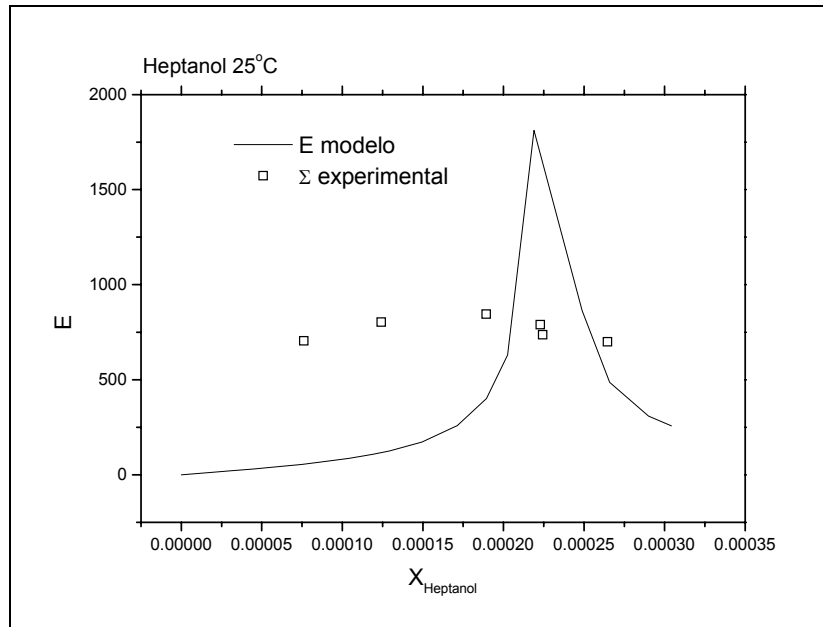


Figura 5.39. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema n-heptanol + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

La *tabla 5.1* presenta los valores de $\Gamma_{max}RT$ y β obtenidos de los ajustes de la presión superficial contra composición para los n-alcoholes utilizando las ecuaciones 3.44 o 3.45. La *tabla 5.2* muestra las concentraciones de máxima espumación obtenidos por medio del modelo (ecuación 3.46), por medio del índice de Espumabilidad.

Tabla 5.1- Parámetros de Ajuste para los n-Alcoholes

<i>Compuesto</i>	$\Gamma_{max}RT$ ergio/cm ²	β
n-Propanol	48.9	85.8
n-Butanol	45.6	284.1
n-Pentanol	42.6	793.7
n-Hexanol	120.5	602.0
n-Heptanol	74.9	4383.7

La *tabla 5.1* muestra que los valores de $\Gamma_{max}RT$ son prácticamente iguales para los tres primeros alcoholes, lo que indica que el área de saturación para estos alcoholes es la misma. Hay que destacar que estos valores se obtuvieron a partir de la ecuación 3.44, donde $\pi^0 = \Gamma_{max}RT$. El parámetro hidrofóbico aumenta conforme la cadena hidrocarbonada crece. Los parámetros del n-Hexanol y n-Heptanol fueron obtenidos del ajuste con la ecuación 3.45.

Tabla 5.2.- Composición de máxima espumabilidad

<i>Compuesto</i>	X_{modelo}	$X_{isafroica}$
n-Propanol	0.012	0.149
n-Butanol	0.004	0.0063
n-Pentanol	0.001	5.20E-04
n-Hexanol	1.66E-03	2.36E-04
n-Heptanol	2.28E-04	1.89E-04

La *tabla 5.2* indica las fracciones mol de máxima estabilidad de espuma predicha por el modelo y las determinadas experimentalmente a partir de la curva isafróica Σ . Se puede apreciar que el modelo calcula una fracción mol mayor a la obtenida experimentalmente para los primeros dos alcoholes. Los alcoholes presentan una alta

presión de vapor, lo que provoca que el equilibrio se desplace. A medida que el peso molecular del alcohol aumenta, el modelo se acerca más al valor experimental, debido a que la volatilidad disminuye.

Alcanolaminas

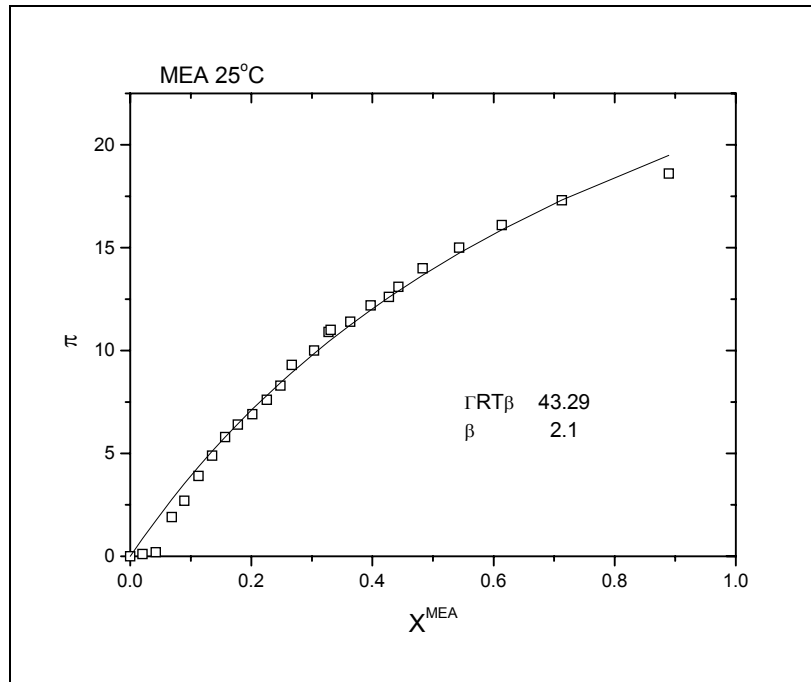


Figura 5.40. Datos del sistema MEA + agua a 25°C según la ecuación 3.45 y la correspondiente línea de ajuste

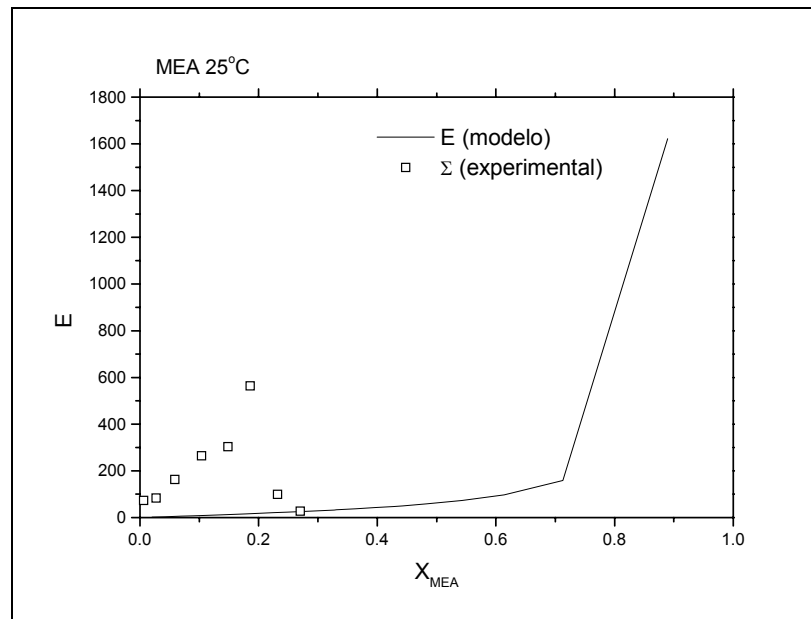


Figura 5.41. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema MEA + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isaféricos.

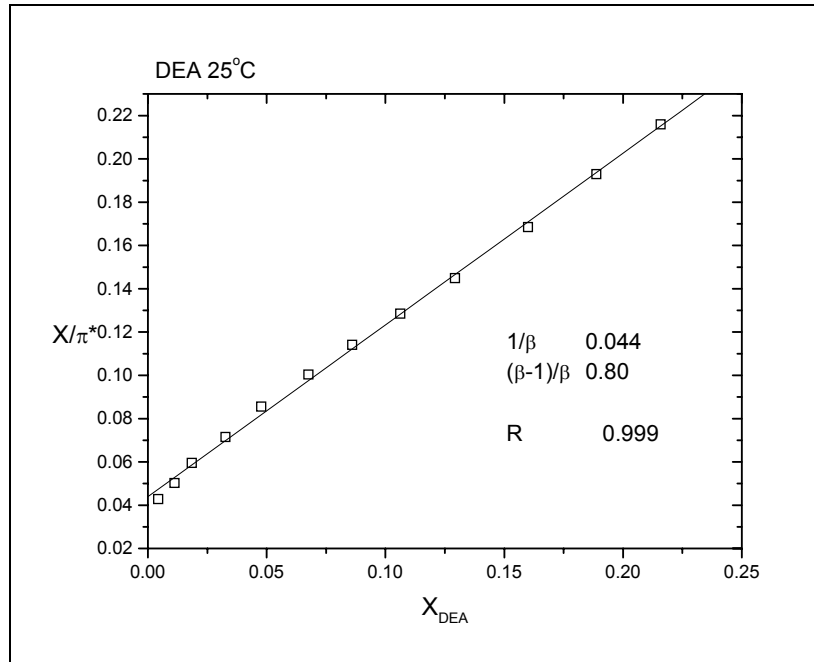


Figura 5.42. Datos del sistema DEA + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

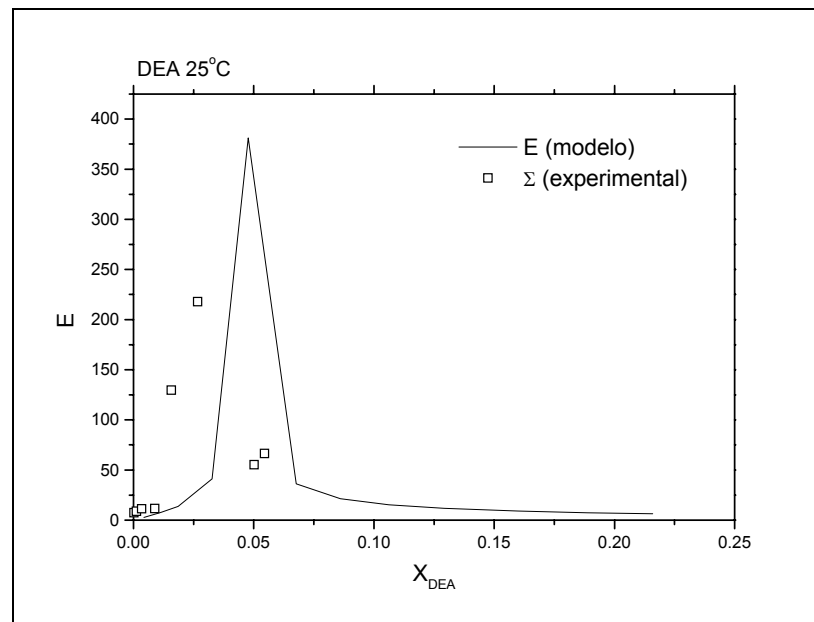


Figura 5.43. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema DEA + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

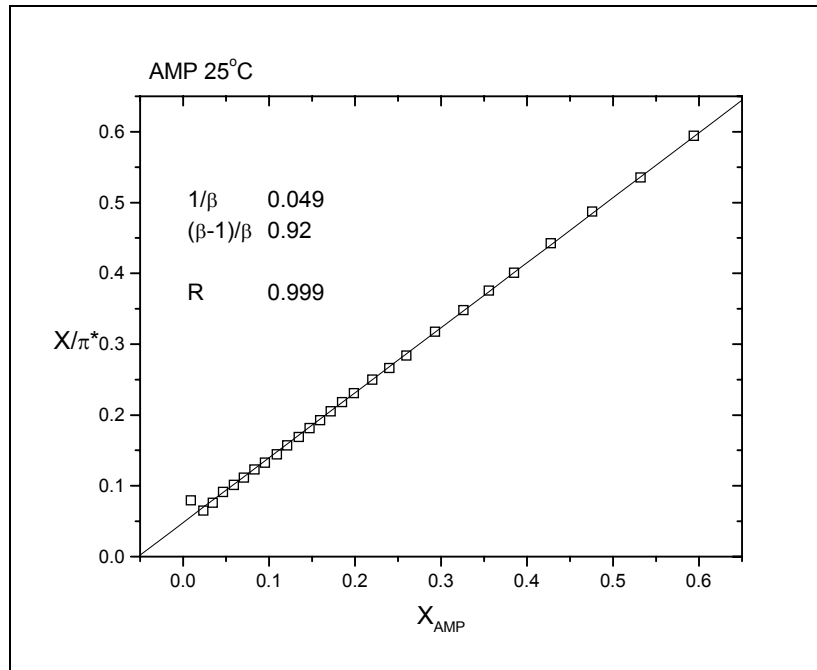


Figura 5.44. Datos del sistema AMP + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

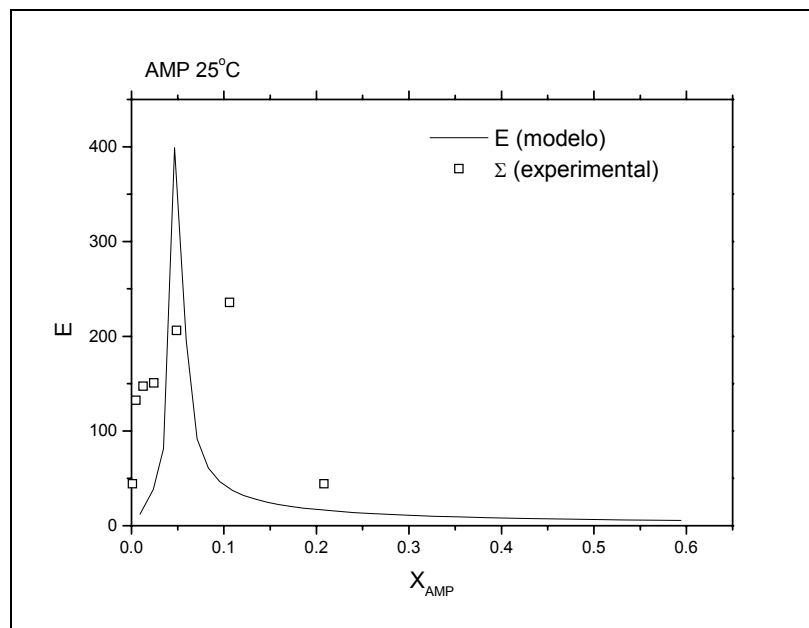


Figura 5.45. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema AMP + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafrícos.

La *tabla 5.3* presenta los valores de $\Gamma_{max}RT$ y β obtenidos de los ajustes para las alcanolaminas. La *tabla 5.4* indica las concentraciones de máxima espumación obtenidos por medio del modelo contra los valores experimentales del índice de Espumabilidad.

Tabla 5.3.- Parámetros de Ajuste para las Alcanolaminas

<i>Compuesto</i>	$\Gamma_{max}RT$ ergio/cm ²	β
MEA	20.6	20.9
DEA	13.8	22.8
AMP	30.2	20.8

La *tabla 5.3* muestra los parámetros de ajuste para las alcanolaminas obtenidos a partir de la ecuación 3.45 (MEA) y la ecuación 3.44 (DEA y AMP).

Tabla 5.4.- Composición de máxima espumabilidad

<i>Compuesto</i>	X_{modelo}	$X_{isafroica}$
MEA	0.050	0.186
DEA	0.046	0.026
AMP	0.050	0.106

Los valores predichos y los obtenidos experimentalmente se muestran en la *tabla 5.4*. La fracción mol calculada es del orden de magnitud que la encontrada con la curva isafróica. Al parecer, la discrepancia se debe a que las alcanolaminas presentan una alta viscosidad y elevados tiempos de difusión del bulto a la superficie comparados con el tiempo de formación de burbuja del aparato utilizado para la determinación de la tensión superficial. Esto repercute directamente en los valores de tensión superficial utilizados en el modelo propuesto.

Glimas

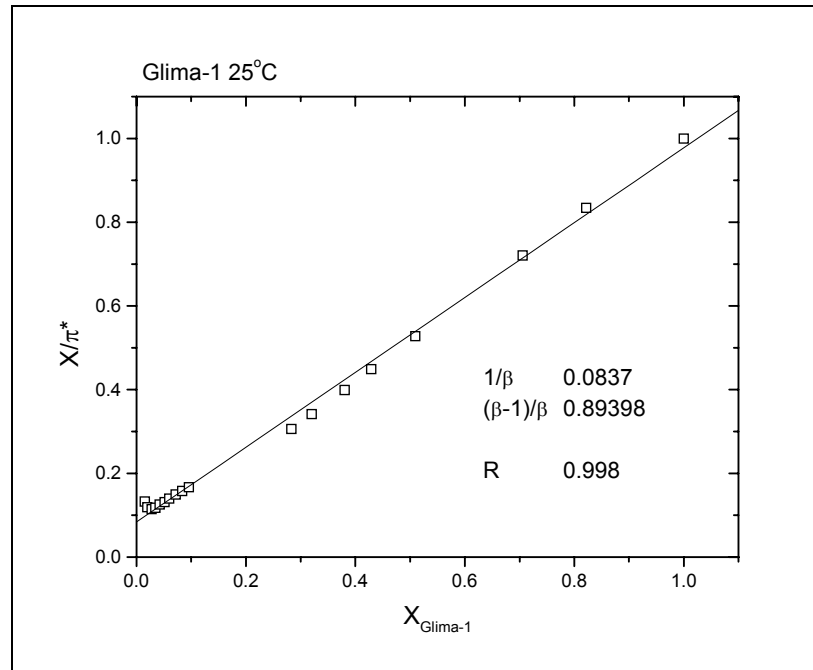


Figura 5.46. Datos del sistema Glima-1 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

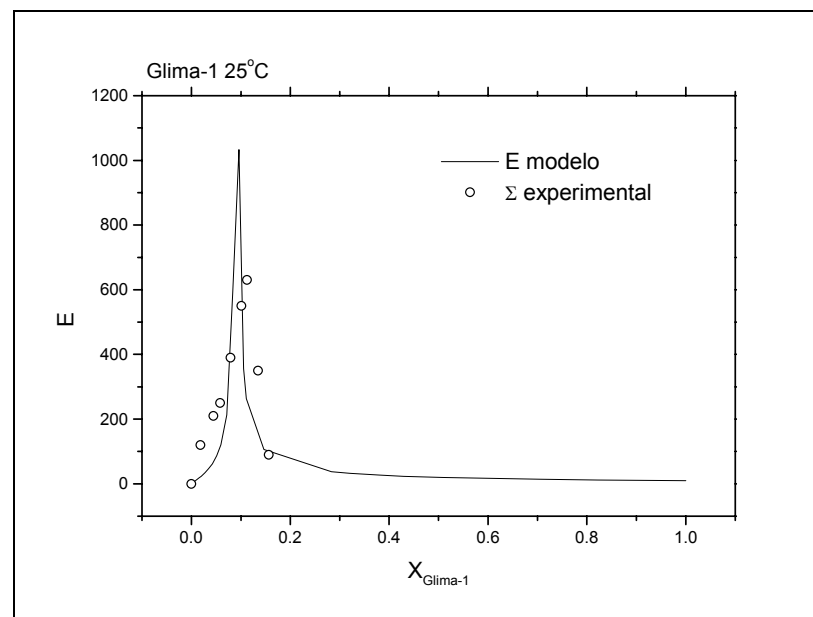


Figura 5.47. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema Glima-1 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isaféricos.

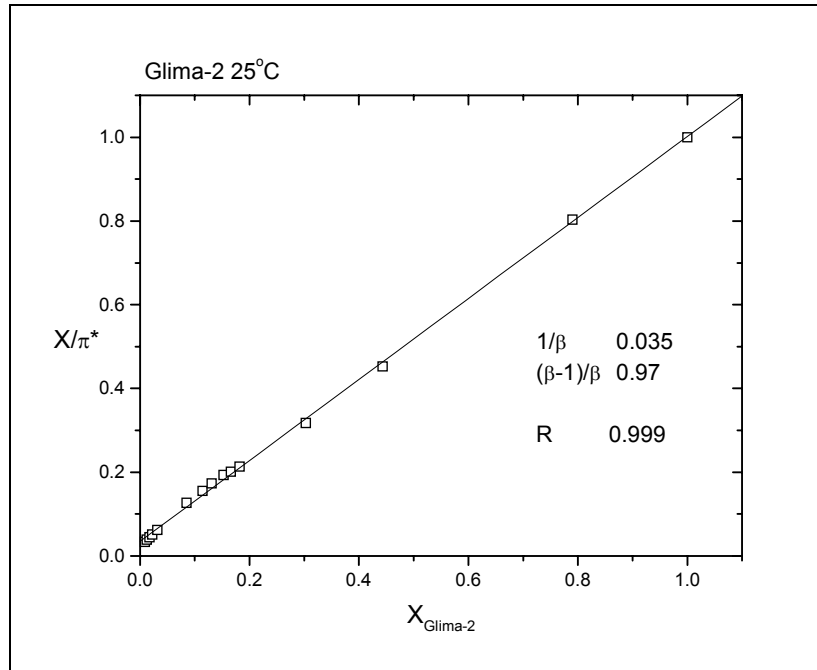


Figura 5.48. Datos del sistema Glima-2 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

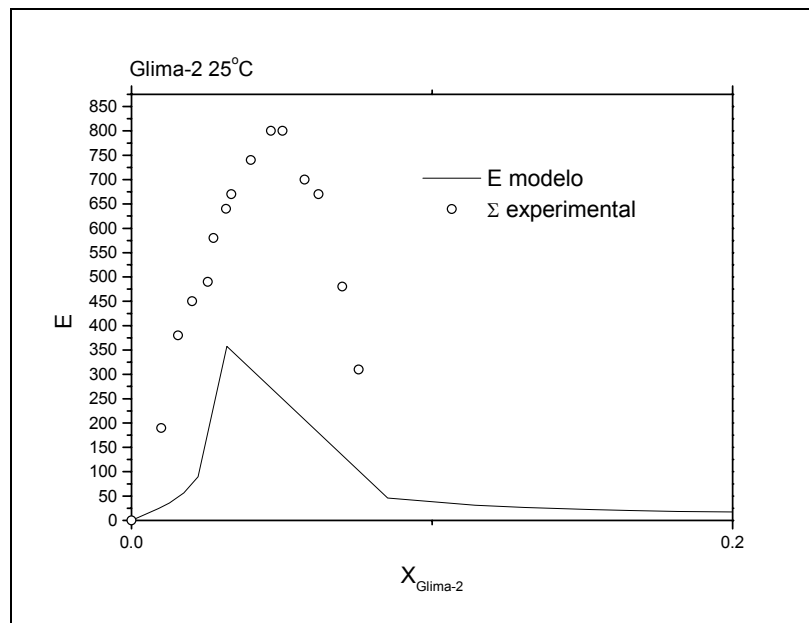


Figura 5.49. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema Glima-2 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafrónicos.

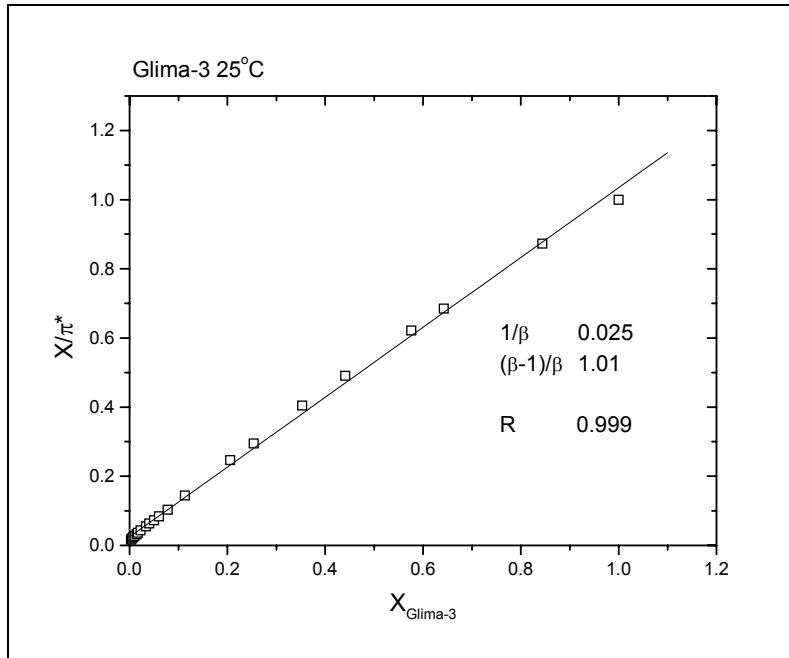


Figura 5.50. Datos del sistema Glima-3 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

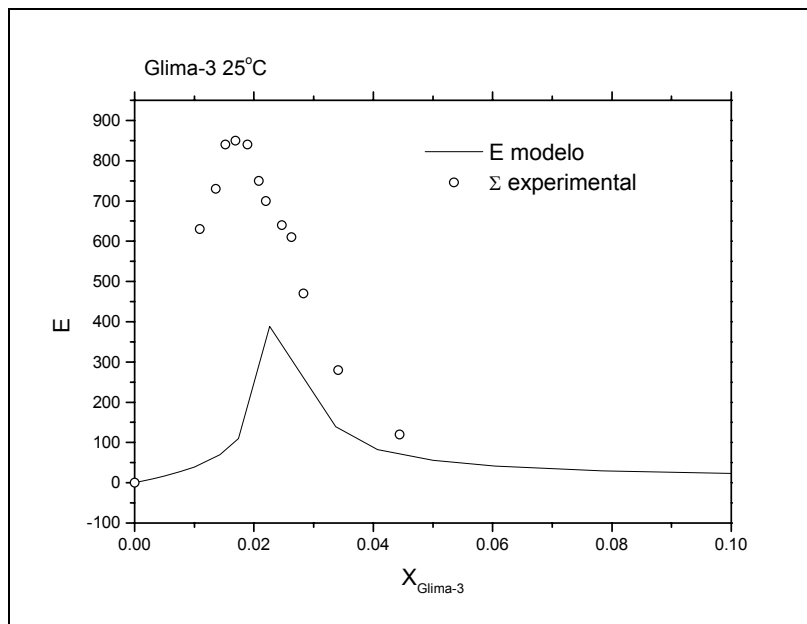


Figura 5.51. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema Glima-3 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isaféricos.

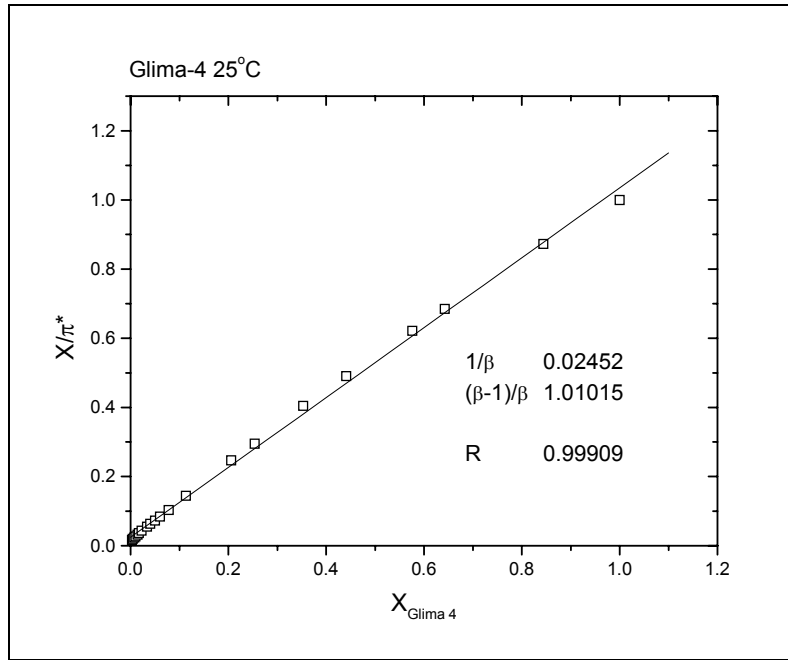


Figura 5.52. Datos del sistema Glima-4 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

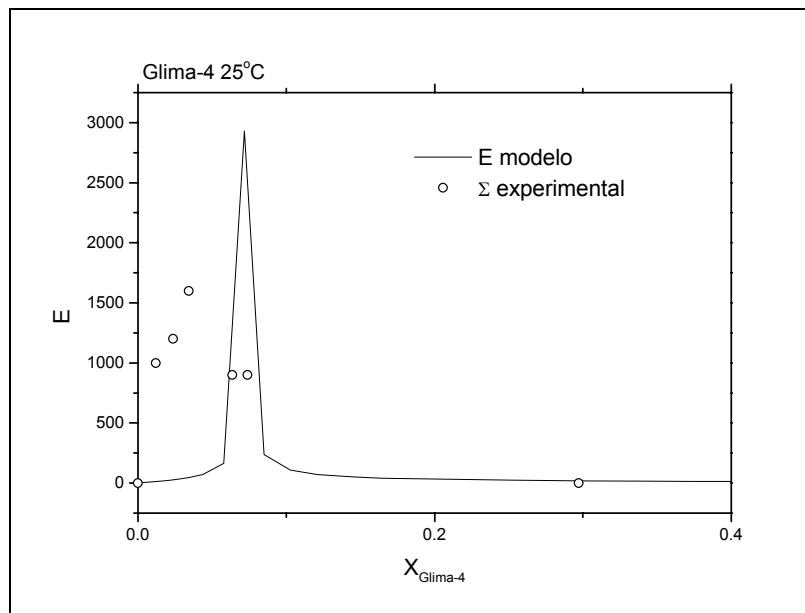


Figura 5.53. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema Glima-4 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isaféricos.

La *tabla 5.5* se presenta los valores de $\Gamma_{max}RT$ y β obtenidos de los ajustes para las Glimas. La *tabla 5.6* indica las concentraciones de máxima espumación obtenidos por medio del modelo (ecuación 3.46) y por mediciones del índice de Espumabilidad.

Tabla 5.5.- Parámetros de Ajuste para las Glimas

<i>Compuesto</i>	$\Gamma_{max}RT$ ergio/cm ²	β
Glima 1	48.0	12.0
Glima 2	43.1	28.9
Glima 3	40.4	40.8
Glima 4	35.3	14.8

Como consecuencia se cumple la condición de $\pi^0 = \Gamma_{max}RT$. Los parámetros de ajuste fueron obtenidos a partir de la ecuación 3.44 para todos los miembros de esta familia. De las gráficas se puede observar que el comportamiento experimental es descrito correctamente por el modelo propuesto.

Tabla 5.6.- Composición de máxima estabilidad

<i>Compuesto</i>	X_{modelo}	$X_{isafroica}$
Glima 1	0.091	0.112
Glima 2	0.036	0.046
Glima 3	0.025	0.016
Glima 4	0.073	0.034

Los valores obtenidos con el modelo concuerdan satisfactoriamente con los obtenidos a través de la curva isafroica. El orden de magnitud es el mismo para ambos valores y la diferencia entre ellos es pequeña si se considera que son valores de la región diluida, justamente donde pequeños errores experimentales afectan fuertemente a las mediciones de tensión superficial porque el tiempo de difusión ocasiona que la tensión superficial sea función del tiempo y no alcance el equilibrio.

Glicoéteres

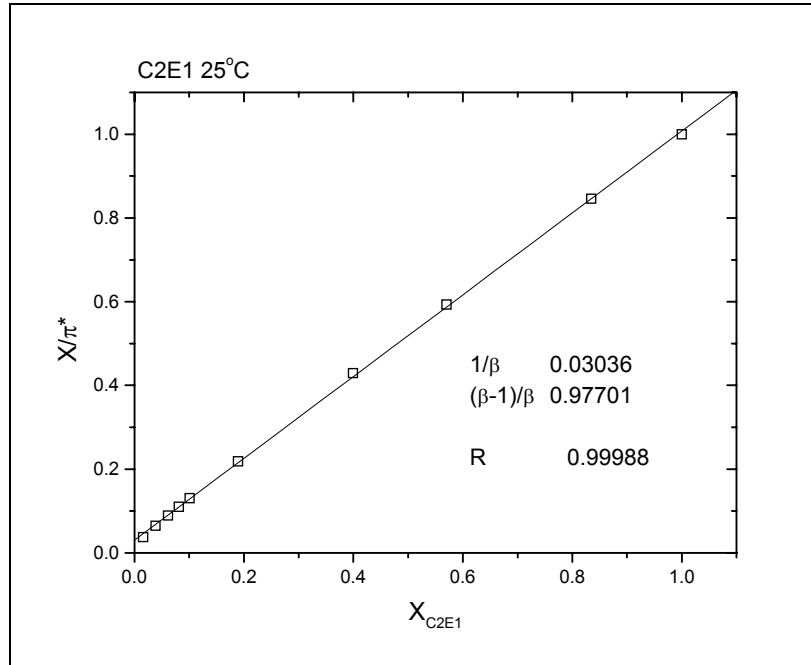


Figura 5.54. Datos del sistema C2E1 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

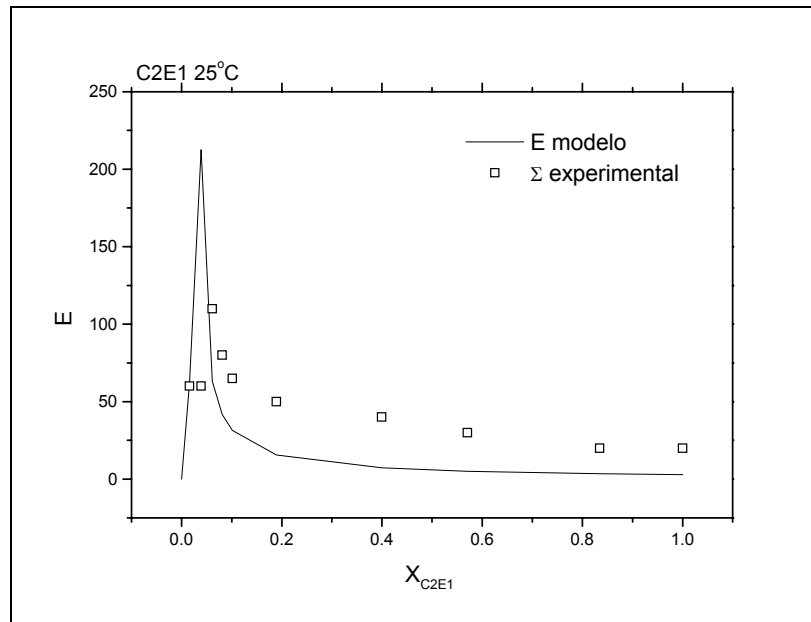


Figura 5.55. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C2E1 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafrícos.

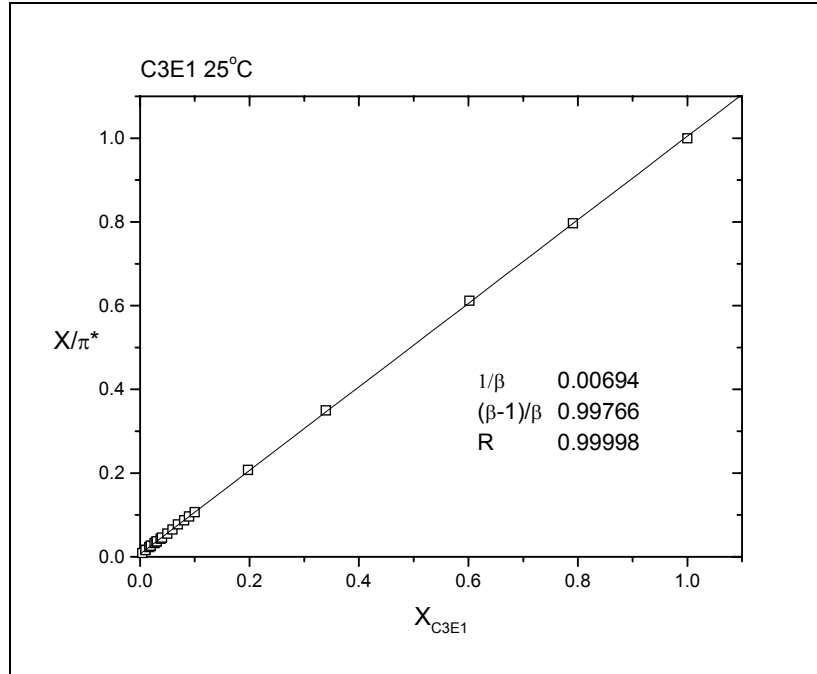


Figura 5.56. Datos del sistema C3E1 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

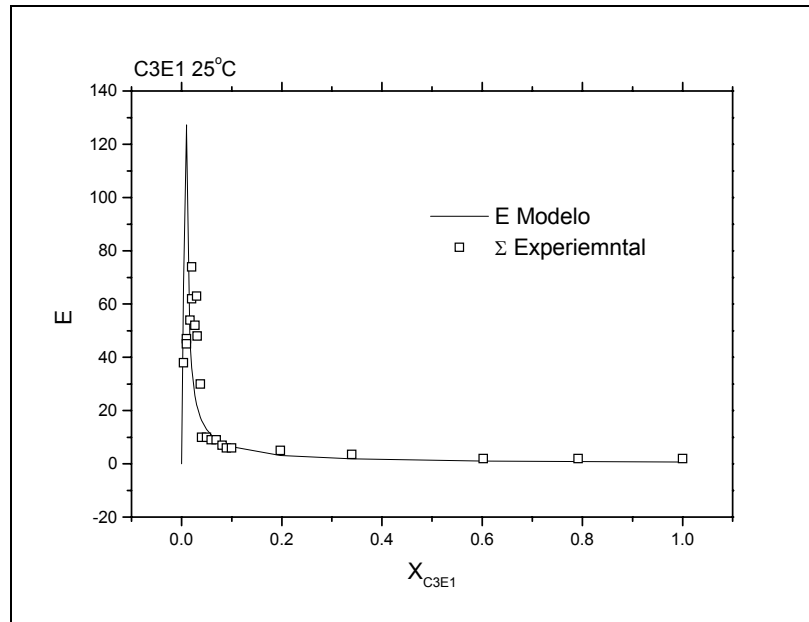


Figura 5.57. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C3E1 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafrícos.

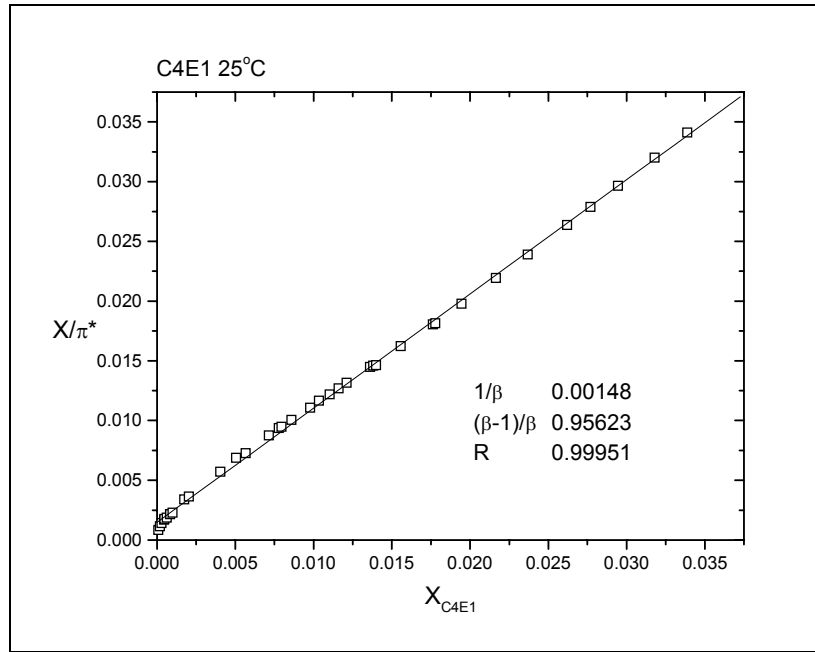


Figura 5.58. Datos del sistema C4E1 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

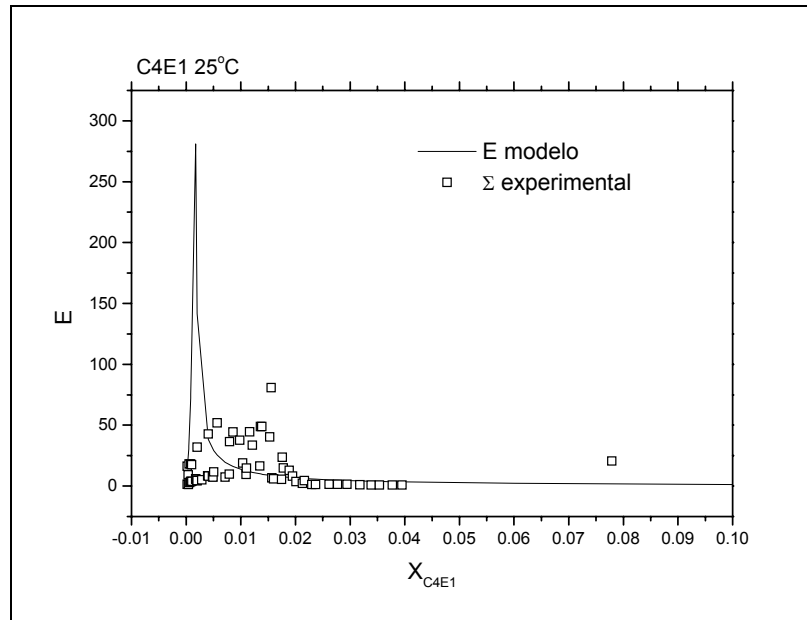


Figura 5.59. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C4E1 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

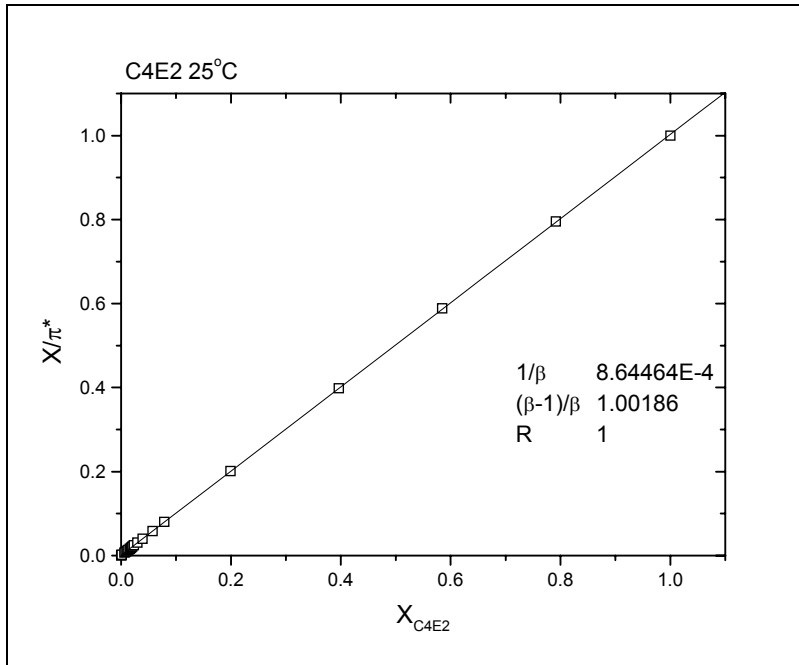


Figura 5.60. Datos del sistema C4E2 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

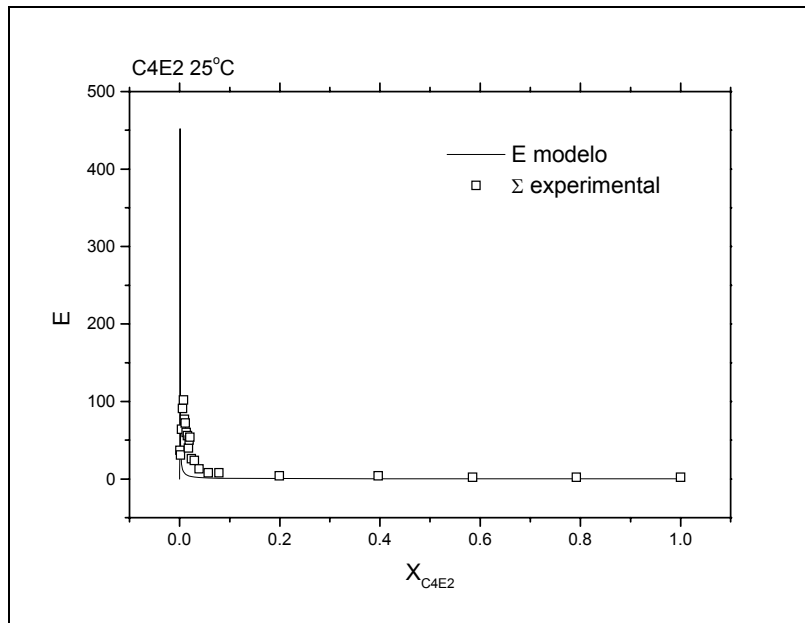


Figura 5.61. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C4E2 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafrícos.

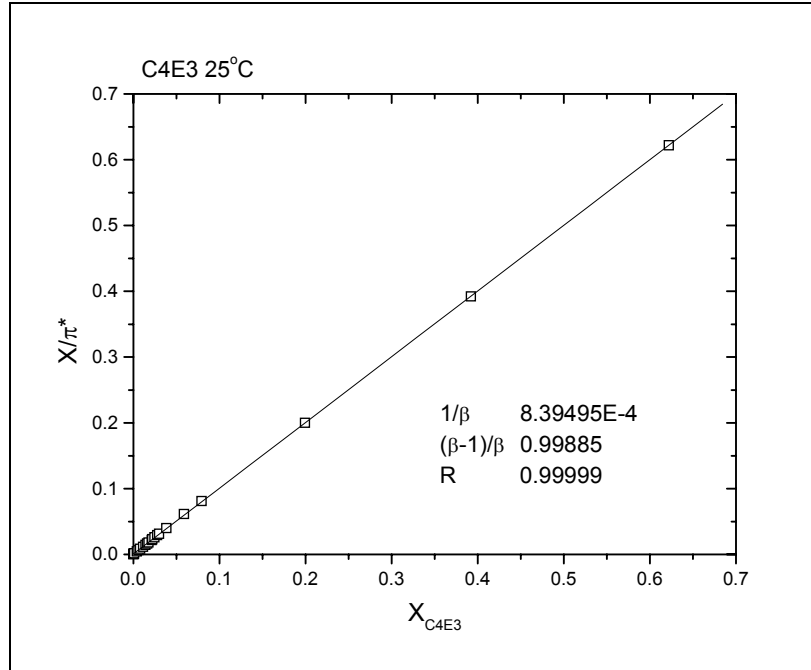


Figura 5.62. Datos del sistema C4E3 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

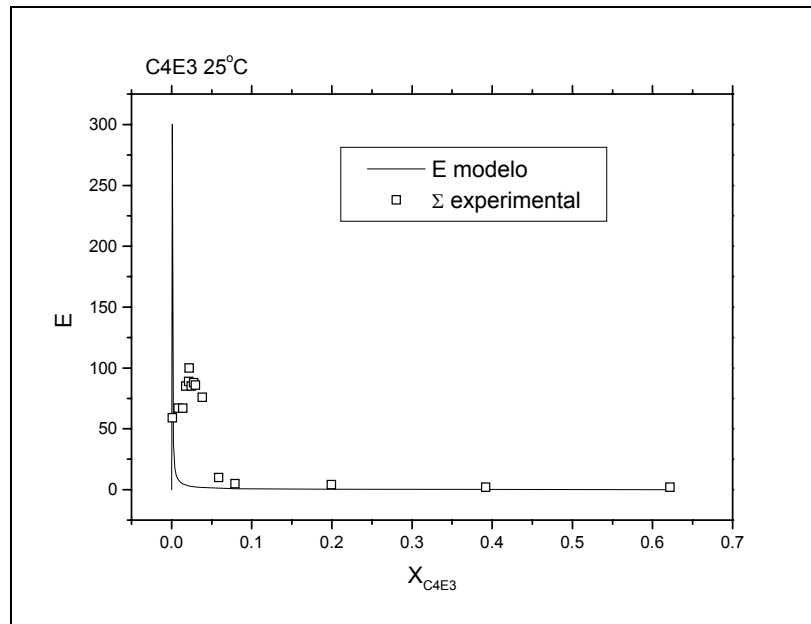


Figura 5.63. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C4E3 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

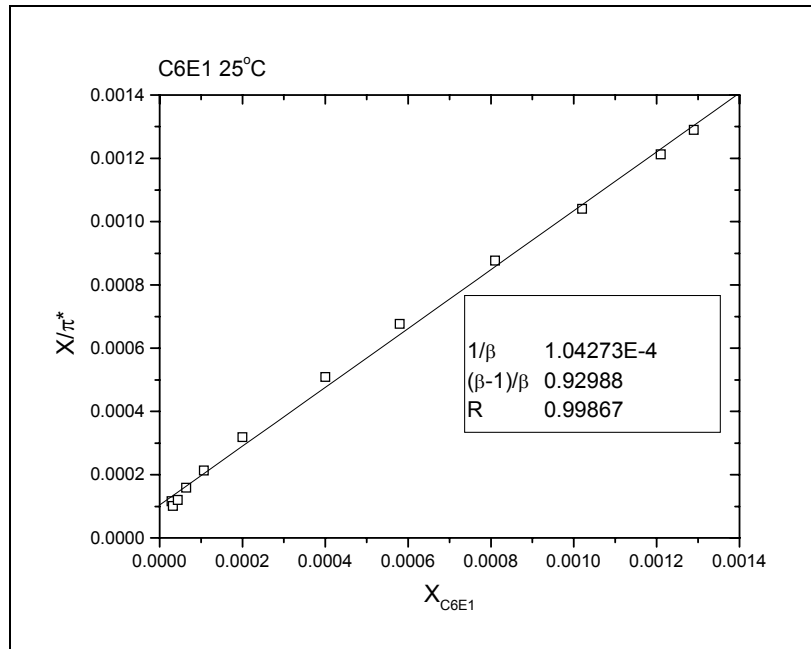


Figura 5.64. Datos del sistema C6E1 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

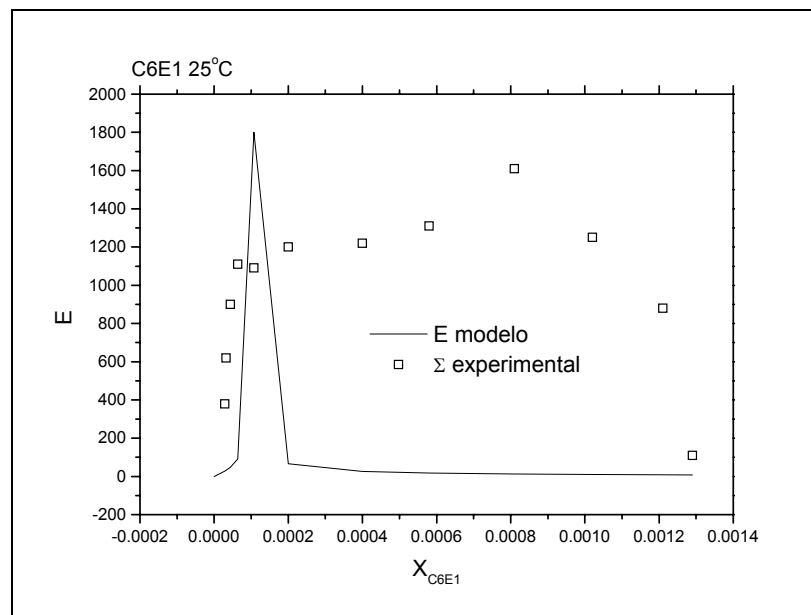


Figura 5.65. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C6E1 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

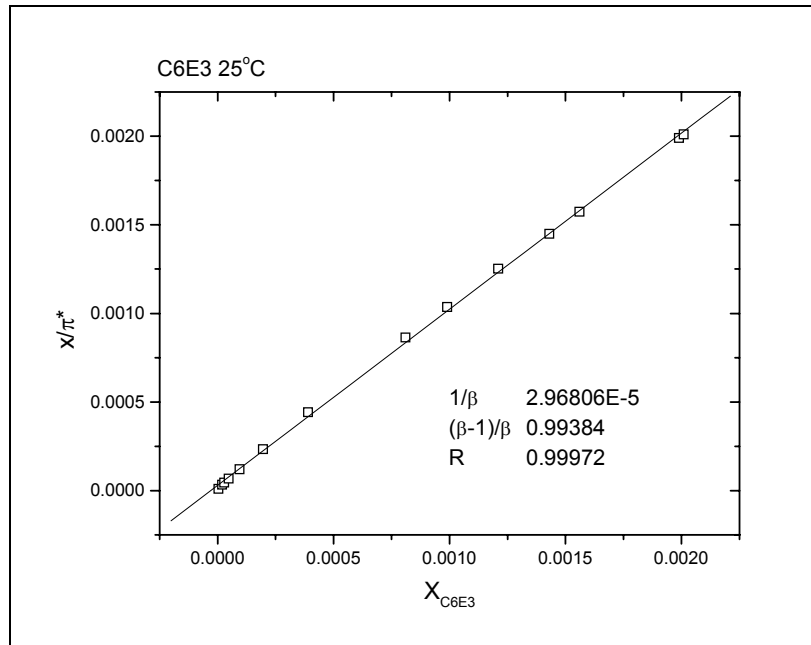


Figura 5.66. Datos del sistema C6E3 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

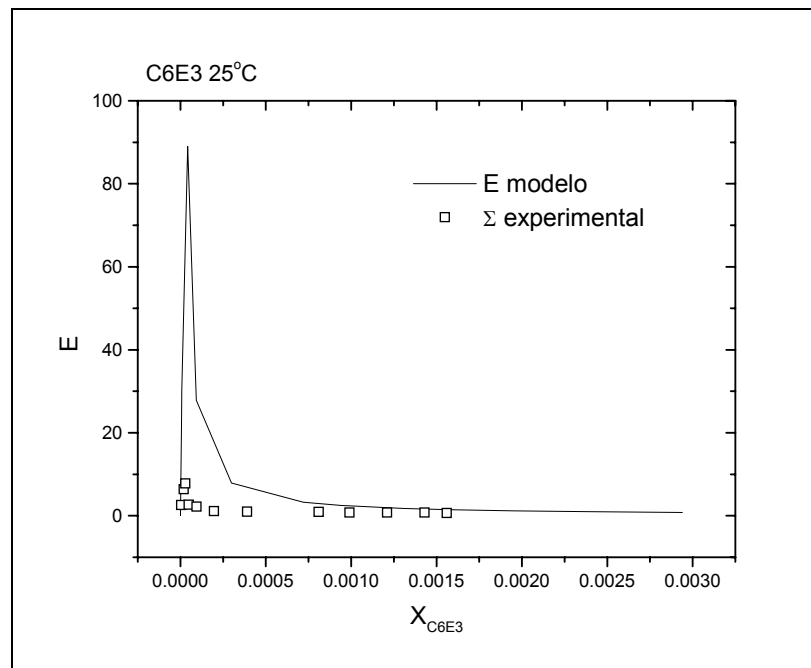


Figura 5.67. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C6E3 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

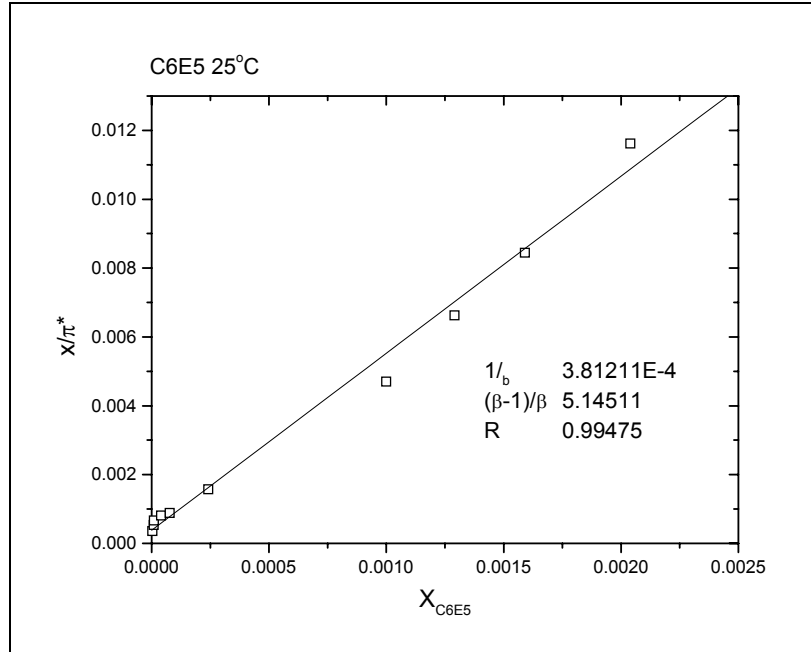


Figura 5.68. Datos del sistema C6E5 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

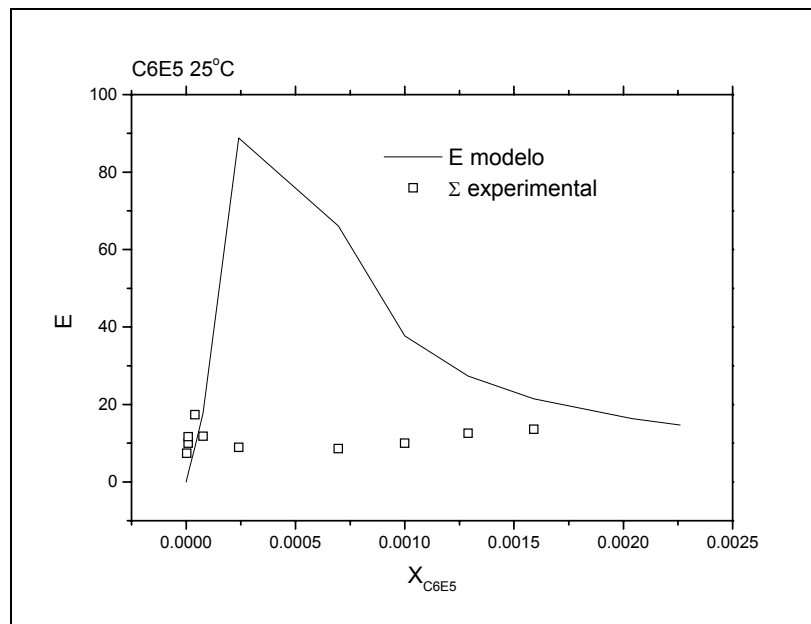


Figura 5.69. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C6E5 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isofríosicos.

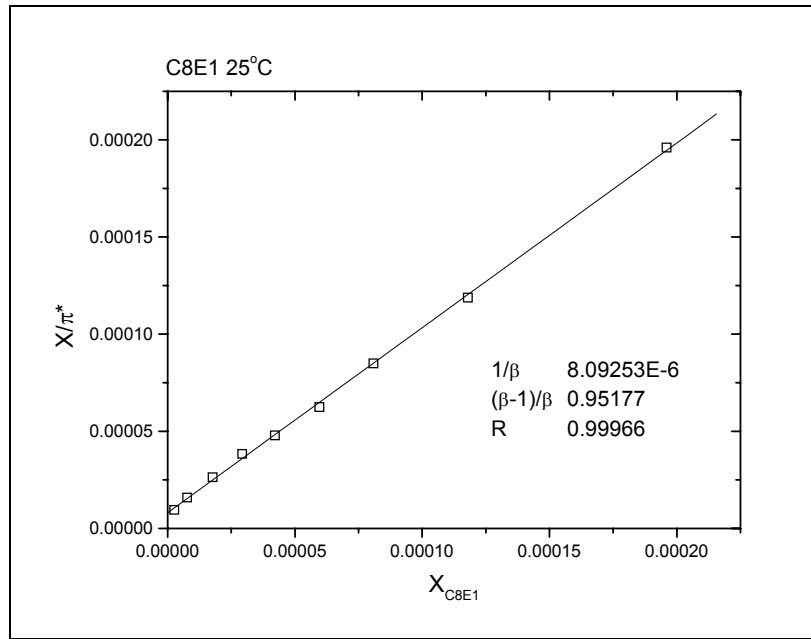


Figura 5.70. Datos del sistema C8E1 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

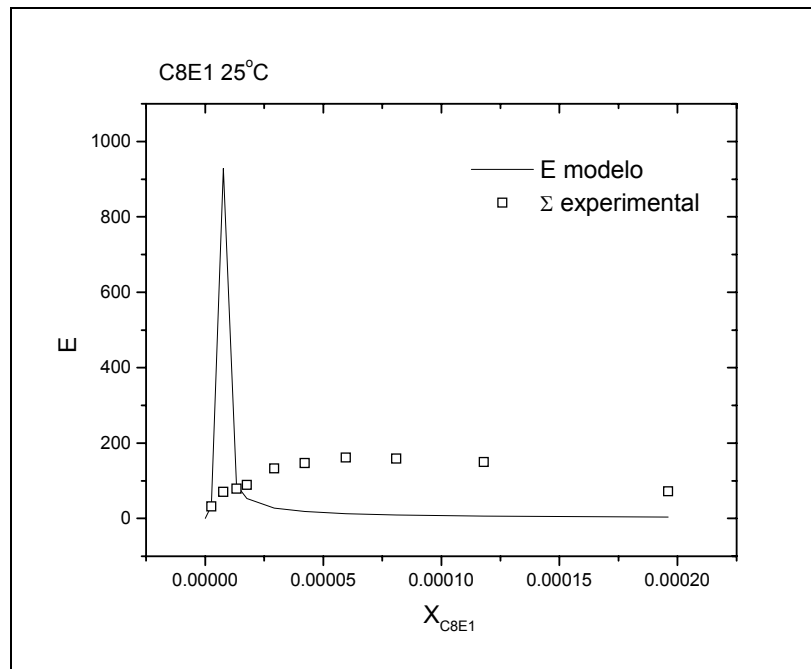


Figura 5.71. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C8E1 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

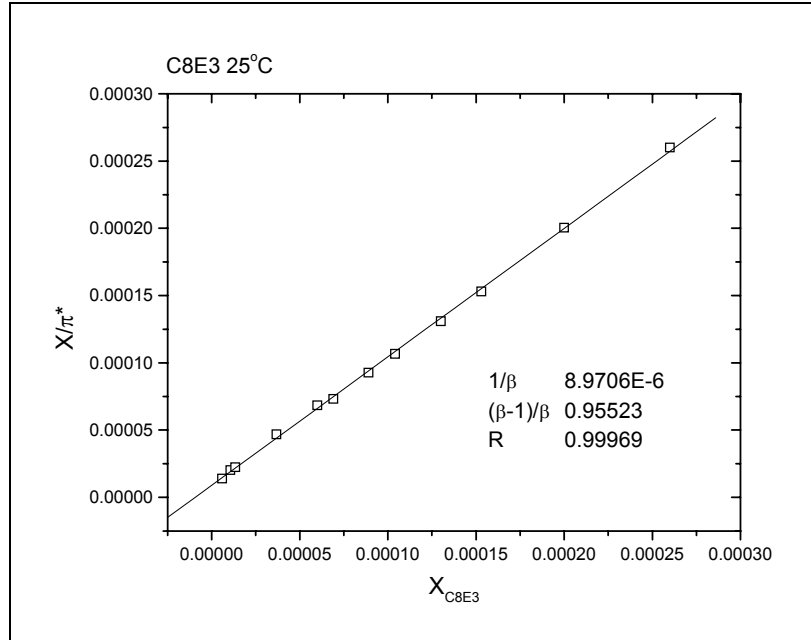


Figura 5.72. Datos del sistema C8E3 + agua a 25°C según la ecuación 3.44 y la correspondiente línea de ajuste

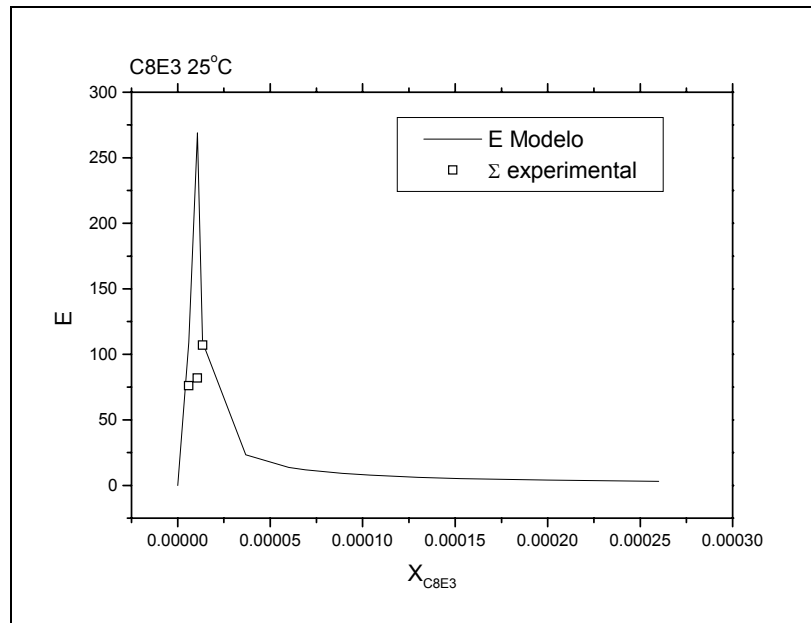


Figura 5.73. Módulo de Elasticidad de Gibbs para el sistema C8E3 + agua a 25°C calculado a partir de la ecuación 3.46 y contornos isafróicos.

La *tabla 5.7* presenta los valores de $\Gamma_{max}RT$ y β obtenidos de los ajustes para los glicoéteres. La *tabla 5.8* indica las concentraciones de máxima espumación obtenidos por medio del modelo propuesto y por medio de las mediciones del índice de Espumabilidad.

Tabla 5.7.- Parámetros de ajuste para los glicoéteres

<i>Compuesto</i>	$\Gamma_{max}RT$ ergio/cm ²	β
C2E1	44.4	32.9
C3E1	44.9	144.1
C4E1	45.2	675.7
C4E2	42.3	1156.8
C4E3	40.1	1191.2
C6E1	46.3	9590.2
C6E3	44.6	33692.0
C6E5	42.2	2623.2
C8E1	46.2	123570.8
C8E3	45.1	111475.3

Entonces, la condición de $\pi^0 = \Gamma_{max}RT$ se cumple y, al igual que con las Glimas, los parámetros de ajuste fueron obtenidos a partir de la ecuación 3.44 para todos los miembros de esta familia. El valor de $\Gamma_{max}RT$ es prácticamente una constante para esta familia de compuestos. El valor del parámetro hidrofóbico, tal y como se esperaba, aumenta a medida que la cadena hidrocarbonada crece. El comportamiento experimental es correctamente descrito por el modelo.

Tabla 5.8.- Composición de máxima espumabilidad

<i>Compuesto</i>	X_{modelo}	$X_{isafroica}$
C2E1	0.031	0.061
C3E1	6.99E-03	0.019
C4E1	1.48E-03	0.015
C4E2	8.65E-04	7.80E-03
C4E3	8.40E-04	0.022
C6E1	1.04E-04	8.10E-04
C6E3	2.97E-05	2.90E-05
C6E5	3.81E-04	4.00E-05
C8E1	8.09E-06	5.96E-05
C8E3	8.97E-06	1.34E-05

Los resultados obtenidos con el modelo concuerdan satisfactoriamente con el resultado de la curva isafroica. Los compuestos que presentan la mayor desviación son C3E1, C4E1 y C4E3 y probablemente es debido a que los compuestos utilizados no eran completamente puros, si no que presentaban una distribución en el número de óxidos de etileno.

5.4.- Estimación de la Incertidumbre de los Valores Obtenidos con del Modelo Propuesto.

Los valores del modulo de elasticidad de Gibbs calculados con el modelo propuestos (ecuación 3.46) son obtenidos empleando datos de equilibrio de superficies en relación con la composición (σ vs x) y su posterior ajuste mediante la ecuación 3.45 por lo cual poseen un incertidumbre asociada en su determinación. Así, de acuerdo con la ecuación 3.46 el modulo de elasticidad de Gibbs depende de $E(M, \beta, x)$ donde M es igual a $\Gamma_{Sat}RT$. Las incertidumbres asociadas a estas variables independientes se deben a la imprecisión de los instrumentos empleados para su determinación, a la imprecisión en las observaciones realizadas por el experimentador o una combinación de ambas.

5.4.1.- Evaluación de la incertidumbre típica combinada^d.

Existen diversos procedimientos para calcular incertidumbre típica combinada, dependiendo de si las variables de entrada son independientes o si existe alguna correlación entre ellas.

Cuando no existe correlación entre estas cantidades que aparecen en una medición, se debe utilizar un procedimiento para obtener la incertidumbre típica combinada basada en las incertidumbres típicas de las cantidades originales y alguna relación funcional entre ellas, de la cual se obtiene la nueva cantidad.

^d Miranda M. del C. J.; Evaluación de la Incertidumbre en Datos Experimentales. UNAM, México D.F. 2001

La incertidumbre típica de y , donde y es la estimación una medición Y , y por lo tanto el resultado de una medición, se obtiene al combinar las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . La incertidumbre típica combinada se denota por $u_c(y)$.

Para calcular esta cantidad, se utiliza la siguiente ecuación:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} u^2(x_i) \quad 5.1$$

en la cual f es relación funcional $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ donde Y es la medición. Cada una de las $u^2(x_i)$ puede ser una incertidumbre típica (es la incertidumbre del resultado de una medida expresado como una desviación típica). A la ecuación 5.1 se le conoce como la ley de propagación de la incertidumbre.

Las derivadas que aparecen en la ecuación 5.1 están evaluadas en $X_i = x_i$ y frecuentemente se les llama coeficientes de sensibilidad y describen como cambia la estimación de salida y con cambios en las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Así, es

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad 5.2$$

en donde

$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad 5.3$$

$$u_i(y) = |c_i|u(x_i) \quad 5.4$$

5.4.2.- Estimación de la Incertidumbre en el cálculo del Modulo de Elasticidad de Gibbs.

Como ya se menciona en la sección 5.3, la ecuación para el cálculo del modulo de elasticidad de Gibbs es:

$$E = 2\Gamma_{Sat} RT \frac{\beta x}{(1-x+\beta x)(1+x-\beta x)} \quad 5.5$$

Estimando la varianza asociada a la ecuación 5.5, mediante la ecuación 5.2, se obtiene:

$$u_E^2 = \left(\frac{\partial E}{\partial M}\right)^2 u_M^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \beta}\right)^2 u_\beta^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)^2 u_x^2 \quad 5.6$$

donde u_M^2 , u_β^2 , u_x^2 , son la incertidumbres típicas de esta mediciones elevadas al cuadrado (varianzas). A continuación se presentan las derivadas parciales :

$$\frac{\partial E}{\partial M} = \frac{2\beta x}{(1-x+\beta x)(1+x-\beta x)} \quad 5.7$$

$$\frac{\partial E}{\partial \beta} = 2Mx \left(\frac{-x}{(1-x+\beta x)^2(1+x-\beta x)} + \frac{x}{(1+x-\beta x)^2(1-x+\beta x)} \right) \quad 5.8$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 2M\beta \left(\frac{(\beta-1)}{(1-x+\beta x)(1+x-\beta x)^2} - \frac{(\beta-1)}{(1+x-\beta x)(1-x+\beta x)^2} \right) \quad 5.9$$

Sustituyendo las ecuaciones 5.7, 5.8 y 5.9 en 5.6:

$$u_E^2 = \left(\frac{2\beta x}{(1-x+\beta x)(1+x-\beta x)} \right)^2 u_M^2 + \left(2Mx \left[\frac{-x}{(1-x+\beta x)^2(1+x-\beta x)} + \frac{x}{(1+x-\beta x)^2(1-x+\beta x)} \right] \right)^2 u_\beta^2 + \left(2M\beta \left[\frac{(\beta-1)}{(1-x+\beta x)(1+x-\beta x)^2} - \frac{(\beta-1)}{(1+x-\beta x)(1-x+\beta x)^2} \right] \right)^2 u_x^2 \quad 5.10$$

u_M , u_β , se obtiene directamente del ajuste de datos ecuación 3.45. Para obtener u_x^2 partimos de la definición de fracción mol para el soluto x:

$$x = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad 5.11$$

como x depende del número de moles de soluto (1) y disolvente (2) u_x^2 es igual a:

$$u_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial n_1} \right)^2 u_{n_1}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial n_2} \right)^2 u_{n_2}^2 \quad 5.12$$

Obteniendo las derivadas parciales de la ecuación 5.11:

$$\frac{\partial x}{\partial n_1} = \frac{n_2}{(n_2 + n_1)^2} \quad 5.13$$

$$\frac{\partial x}{\partial n_2} = -\frac{n_1}{(n_2 + n_1)^2} \quad 5.14$$

Como el número de moles es función de la masa y del peso molecular y estos a su vez tienen una incertidumbre asociada a su determinación, debemos obtener $u_{n_1}^2$ de la siguiente forma:

$$n_1 = \frac{m_1}{PM_1} \quad 5.15$$

por lo tanto:

$$u_{n_1}^2 = \left(\frac{\partial n_1}{\partial m_1} \right)^2 u_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial n_1}{\partial PM} \right)^2 u_{PM}^2 \quad 5.16$$

de la ecuación 5.15 se obtiene:

$$\left(\frac{\partial n_1}{\partial m_1} \right) = \frac{1}{PM_1} \quad 5.17$$

$$\left(\frac{\partial n_1}{\partial PM} \right) = -\frac{m_1}{PM_1^2} \quad 5.18$$

para la incertidumbres asociada la m_1 ; $u_{m_1}^2$ se recurre a:

$$u_{m_1} = u_B = \frac{d.m}{2\sqrt{3}} = \frac{0.001}{2\sqrt{3}} = 0.00028868 \quad 5.19$$

Donde u_B es la incertidumbre de la balanza y $d.m.$ es la precisión de la balanza. La incertidumbre del peso molecular u_{PM}^2 , se determina en base a la incertidumbre de la medición de los pesos moleculares de los elementos que constituyen nuestro compuesto^e: Este mismo desarrollo se realiza para obtener u_{n2}^2 . Por lo tanto el error asociado en el valor del modulo de elasticidad de Gibbs calculado será:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_E^2} \quad 5.20$$

Las estimaciones de lo errores para los valores de modulo de elasticidad de Gibbs se muestran en el apéndice. Estas estimaciones indican que el máximo error en la determinación para el propanol es de 0.186, butanol 0.818, pentanol 0.225, hexanol 0.070, heptanol 5.849, MEA 0.116, DEA 0.827 y AMP 0.035.

^e Pure Appl. Chem. Vol. 75, No 8 pp 1107-1122-2003

Conclusiones

- El modulo de elasticidad de Gibbs, en términos de la primera y segunda derivada de π vs x describe per se comportamiento de la espuma.
- El modelo de estabilidad de espuma, fundamentado en el modulo de elasticidad de Gibbs, bajo la hipótesis de equilibrio local, logra una descripción sobre el comportamiento de la estabilidad de espuma con relación a la composición a temperatura constante.
- El modelo es aplicable a una película de anfifilo en un sistema binario. Mientras que una columna de espuma consiste en un perfil de composiciones superficial y d bulto en función de la posición o altura de espuma. Es por esta razón que la continuidad a esta investigación es la extensión del modelo sobre un perfil de composiciones.
- La medición se efectuó en un sistema abierto donde no es posible evitar la perdida por evaporación de soluto con presión de vapor elevada. Esta perdida genera desviaciones de la condición de equilibrio que sostiene el modelo.
- Los efectos cinéticos de difusión y/o adsorción, retardan las condiciones de equilibrio y por lo tanto la estabilidad y comportamiento general de la estabilidad de la espuma.
- El sistema de medición explicado en este trabajo representa una medición instantánea a tiempos cortos aproximadamente de un segundo, donde los efectos de la viscosidad en el bulto y especialmente de la superficie enriquecida frenan localmente la adquisición de condiciones de equilibrio.

Trabajos Futuros

- El diseño de nuevas ecuaciones de estado que aporten mayor información sobre la estructura de las superficies y sus consecuencias en la estabilidad de la espuma.
- El modelo propuesto esta constituido bajo la hipótesis de equilibrio local, contemplado bajo la ecuación de Gibbs. Es necesario, extender este tratamiento al caso dinámico.
- La identificación de variables de diseño para el escalamiento en procesos industriales.
- Continuar estos estudios en medios acuosos y no acuosos de alta viscosidad cuyo destino sea la construcción de espumas sólidas.
- Con la interpretación y el uso de este modelo poder diseñar espumantes y antiespumantes.

Bibliografía

- Aubert, H. James, Kraynik, M. Andrew. “Investigación y Ciencia”. Julio 1986. Pag 38-47.
- Addison C.C.; Hutchinson S.K. “The Properties of Freshly Formed Surface. Part XI. Factors Influencing Surface Activity and Adsorption Rates in Aqueous Decyl Alcohols Solutions” J. Chem. Soc. 3387-3395 (1949).
- J.J. Bikerman, “The Unit of Foamines”. Trans. Faraday Soc. 34, 634 (1938)
- Bikerman, J. J. “Foams: Theory and Industrial Applications”. Reinhold Publishing Corporation. New York, U.S.A., 1953.
- Bikerman, J.J. “Foams”. Springer-Verlag Berlin, (1973)
- Chenlo, F. ; Moreire, R. ; et al. J. Chem. Eng. Data 46, 276-280 (2001)Falta título.
- Clint, J.H., Corkill J.M., Goodman J. F. & Tate J. R. “Adsorption of n-Alkanols at the Air/Aqueous Solutions Interface”,. Journal of Colloid and Interface Science. F.M. Fowkes (ed.) Hydrophobic Surface 180-188 Academic Press (1969).
- Cruz Aliphath, Jephthe Raquel. Propiedades Superficiales de los sistemas CmEn y CmPn y Agua + 25°C. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México, DF, (2002)
- Curme, G. O. Glycols. Reinhold Pub. Co. (1953)
- Davis, M. I., Douheret, G. “Group Contributions to the thermodynamic properties of cluster formation by non-ionic amphiphiles in their aqueous mixtures”, Journal of the Chemical Society-Faraday Trans. 94, (16): 2389-2394, (1998a)

- Del Valle Medina, Karla. Propiedades superficiales de Sistemas Binarios Alcanonitrilo o Alcohol en agua o Formamida. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México. (2002)
- Domingo, X; Fiquet L. “Foams Ability/Stability of Surfactant”. Tenside Surf. Det. CESIO Working Group 29 (1992)
- Douheret G., Davis M. I. Ulloa J., Hoiland H., Fjellanger J. “Ultrasonic speeds and volumetric properties of binary mixtures of water with 2-(2-(2-alkoxyethoxy)ethoxy) ethanols at 298.15 K”. Journal of the Chemical Society- Faraday Transactions, 92 (13): 2369-2379 (1996).
- Gerhartz, W.” Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry”. Vol A10, VCH Publishers, USA, 1995.
- Gibbs, J. W.; “Liquid Films” in Scientific Papers of J. Willard Gibbs: Thermodynamica, Longmans, Green (1906); vol 1 , 300-314 Dover (1961).
- Gracia, F, J.; Tesis Doctoral, Facultad de Química, UNAM 1990 Falta nombre
- Grayson, M., Eckroth, D., “Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology”, 3rd Ed. John Wiley & Sons, New York, USA, (1994)
- Kahlweit, M.; Strey R.; Aratano, M. “Tricritical Points in H₂O-Oil-Amphiphile Mixtures”. J.Chem. Phys. 95 2842-2953 (1991).
- Kirk Ohtmer, Encyclopedia of Chemical Technology. 3rd. Ed. Vol .11, 127-145, 783-805. (1994)
- Manegold, E. “Schaum, Strassenbau, Chemie und technik” Heidelberg, 1953 Myers Drew “Surfaces, Interfaces, and Colloids” VCH, USA, 1991
- Malysa, K.; Lunkenheimer, K. “Surface Elasticity and Dynamic Estability of Wet Foams” Colloids and Surfaces, 16 9-20, (1985)
- Marangoni, C.”Difesa della Teoria dell’Elasticità Superficiale del Liquid: Plasticità Superficiale” Nuovo Cimento 350-68; 97-123 & 193-211 (1878)

- Myers, D., “Surfaces, Interfaces and Colloids. Principles and Applications”, VCH Public. Inc. Falta año
- NP Division Technical Data Sheet. “The Aminohydroxy Compounds”. IMC Chemical Group, inc., NP Series, TDS No.10.
- NP Division Technical Bulletin. “AMP-95 as a Corrosion Inhibitor in Steam Condensate Lines”. IMC., NP Series TB No. 41.
- Piñeiro, A., Brocos, P., et al. “Extended Langmuir Isotherm for Binary Liquid Mixtures”. *Langmuir*, (2001).
- Plateau, J. A. F. ,1873 *Statique Expérimentale et Théorique des Liquides soumis aux seules Forces Moléculaires*, 2 vols. Gauthier-Villars, Paris
- Posner, A.M., Anderson J.R.”The Surface Tension and Surface Potential of Aqueous Solutions of Normal Aliphatic Alcohols”. *J. Colloid Sc.* 7 623-644, 1952
- Pugh, R.J. ; « Foaming, Foam Films, Antifoaming and Defoaming » *Advance in Colloids and Surface* 16 9-20 (1996)
- Ramírez, Verduzco, L. Felipe. “Estudio de la Tensión Superficial del Sistema Ternario 2- Amino-2-Metil-1-Propanol + Dietanolamina + Agua en Todo el Intervalo de concentración y a Temperaturas entre (323.15-373.15 K). Tesis de Maestría . F. Q. UNAM, 2001.
- Riddick, J.A., Bunger, E.B. and Sakano T.K. “Organic Solvents. Physical Properties and Methods of Purification”. Wiley-Interscience. Vol II, 4ª ed. 1986.
- Del Valle Medina, Karla. Propiedades superficiales de Sistemas Binarios Alcanonitrilo o Alcohol en agua o Formamida. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México. (2002)
- Sokolowski A. & Burczyk. B.; “Chemical Structure and Activity VII. Statistical Evaluation of Adsorption at Aqueous Solution- Air Interface” *J. Colloid Interface Sci.*, 94 369-379 (1983).

- Stephenson, R. M. “Mutual Solubilities: Water-Glycoethers and Water-Glycoesters” J. of Chem. Eng. Data. 38, No1, 134-138, (1993)
- Trejo Candelas Luis Miguel. Estudio Termodinámico de la Agregación de Anfifilos no Iónicos CmEn en Agua y disolventes no polares. Tesis de Doctorado. Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (1995)
- Vázquez, Gonzalo, Álvarez Estrella et al. “Surface Tension of Alcohols + Water from 20 to 50 °C” J. Chem. Eng. Data 40, 611-614 (1995)
- Vázquez Gonzalo, Estrella Alvarez, et al. “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 42, 57-59 (1997)
- VCH publishers USA, 1985.
- Weiland, Ralph H. “Physical Properties of MEA, DEA, MDEA and MDEA-Based Blends Loaded with CO₂ . GPA Research Report No. 152, August 1996.
- Wolfgang, Gerhartz. Ulmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry Vol A10 falta año
- Zan, R.; Eijerabi, R. “Flourescence Probing Investigation of the Self-Association of Alcohols in Aqueous Solution”. J. Phys. Chem. 97 11134-11136 (1993a)
- Zan, R.; Eijerabi, R. “Flourescence Probing Investigation of the Self-Association of Alcohols in Aqueous Solution”. J. Phys. Chem. 97 11134-11136 (1993b)

ANEXO I

Metanol a 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
7.15E-6	71.9	0.1
6.86E-5	71.9	0.1
2.08E-4	71.9	0.1
4.58E-4	71.9	0.1
1.02E-3	71.9	0.1
2.62E-3	71.9	0.1
5.49E-3	71.9	0.1
1.05E-2	71.8	0.2
2.30E-2	66.5	5.5
3.55E-2	62.6	9.4
4.73E-2	60.3	11.7
5.99E-2	55.6	16.4
8.44E-2	51.5	20.5
0.110	47.4	24.6
0.134	45.5	26.5
0.162	42.9	29.1
0.203	39.8	32.2
0.251	37.1	34.9
0.291	35.1	36.9
0.331	33.3	38.7
0.365	32.1	39.9
0.402	30.8	41.2
0.437	29.8	42.2
0.471	29	43

Etanol a 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
4.04E-5	72	0
1.24E-4	72	0
2.90E-4	72	0
4.76E-4	71.9	0.1
8.02E-4	71.9	0.1
1.75E-3	71.9	0.1
3.52E-3	71.5	0.5
5.82E-3	68.8	3.2
8.28E-3	66.5	5.5
1.14E-2	62.8	9.2
1.55E-2	60	12
1.96E-2	57.2	14.8

2.55E-2	54.1	17.9
3.35E-2	50.6	21.4
4.22E-2	47.5	24.5
5.23E-2	44.8	27.2
6.24E-2	42.2	29.8
7.60E-2	39.6	32.4
9.00E-2	37.1	34.9
0.103	35.4	36.6
0.118	33.4	38.6
0.132	31.9	40.1
0.142	31.5	40.5
0.167	30.2	41.8
0.189	29.1	42.9
0.212	28.1	43.9
0.237	27.1	44.9
0.261	26.5	45.5
0.287	25.9	46.1
0.319	25.4	46.6
0.357	24.8	47.2
0.386	24.4	47.6

1-propanol a 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión Superficial (mN/m)
0	72	0
1.15E-5	71.9	0.1
4.70E-5	71.9	0.1
1.11E-4	71.8	0.2
1.89E-4	71.8	0.2
3.36E-4	71.8	0.2
6.00E-4	71.8	0.2
1.11E-3	71.7	0.3
1.92E-3	68.8	3.2
3.28E-3	63.6	8.4
4.94E-3	59.9	12.1
6.99E-3	55.7	16.3
9.44E-3	52.1	19.9
1.19E-2	48.7	23.3
1.54E-2	45	27
1.857E-2	42.4	29.6
2.88E-2	35.9	36.1
3.60E-2	32.8	39.2
4.88E-2	28.8	43.2
6.439E-2	26	46
8.24E-2	24.6	47.4
0.105	24.1	47.9

0.135	23.7	48.3
0.164	23.6	48.4
0.195	23.5	48.5
0.233	23.3	48.7
0.263	23.2	48.8
0.299	23.2	48.8
0.331	23.1	48.9

Butanol 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
1.44E-5	71.9	0
2.88E-5	71.9	0.3
4.32E-5	71.9	0.9
6.61E-5	71.9	1.7
9.23E-5	71.8	2.1
1.11E-4	71.6	2.7
1.40E-4	71.4	3.7
1.71E-4	70.8	4.5
2.04E-4	70.5	5.4
2.40E-4	70	6.4
2.74E-4	69.1	7.4
3.19E-4	68.9	8.3
3.75E-4	67.9	9.4
4.33E-4	67.2	10.7
4.95E-4	66.4	11.9
5.56E-4	65.8	13.2
6.28E-4	64.5	14.1
7.07E-4	63.6	15.3
8.05E-4	62.7	16.7
9.10E-4	61	17.7
1.03E-3	60.9	18.9
1.18E-3	59.1	20.4
1.34E-3	57.8	21.9
1.52E-3	55.6	23.2
1.68E-3	54.7	24.5
1.87E-3	53.1	26.4
2.11E-3	51.7	28.3
2.49E-3	49.4	30.1
2.87E-3	47.5	32
3.23E-3	45.8	34.3
3.58E-3	44.2	36.4
3.86E-3	43.3	38.2
4.34E-3	41.6	40.2
4.86E-3	39.9	42.2

5.37E-3	38.2	43.9
6.21E-3	36.3	45.1
6.84E-3	35	46.2
7.64E-3	33	46.5
8.72E-3	31.2	46.2
1.01E-2	28.4	
1.17E-2	26.4	

Pentanol 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión Interfacial (mN/m)
0	72	0
2.48E-5	71.9	0.1
1.69E-4	69.5	2.5
2.87E-4	64.8	7.2
3.30E-4	63.3	8.7
3.73E-4	61.8	10.2
4.13E-4	60.9	11.1
4.41E-4	60.2	11.8
5.01E-4	58.4	13.6
5.37E-4	57.7	14.3
5.83E-4	56.7	15.3
6.59E-4	55.1	16.9
7.48E-4	53.4	18.6
8.34E-4	51.7	20.3
9.27E-4	50.4	21.6
1E-3	48.8	23.2
1.1E-3	47.6	24.4
1.21E-3	46	26
1.36E-3	44.4	27.6
1.5E-3	42.9	29.1
1.67E-3	41.3	30.7
1.8E-3	40	32
1.98E-3	38.9	33.1
2.11E-3	37.9	34.1
2.28E-3	36.6	35.4
2.48E-3	35.2	36.8
2.66E-3	34.3	37.7
2.88E-3	33	39
3.11E-3	31.7	40.3
3.33E-3	30.7	41.3
3.56E-3	29.4	42.6

Hexanol 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
4.68E-6	--	4.68256E-6

1.40E-5	--	1.40476E-5
2.34E-5	--	2.34124E-5
3.27E-5	--	3.2777E-5
4.68E-5	--	4.68237E-5
6.08E-5	71.9	6.08699E-5
7.95E-5	69.8	7.95976E-5
9.83E-5	67.5	9.83246E-5
1.21E-4	64.9	1.21732E-4
1.40E-4	62.9	1.40458E-4
1.63E-4	61.1	1.63864E-4
1.91E-4	58.6	1.91949E-4
2.20E-4	58.1	2.20033E-4
2.48E-4	56.1	2.48115E-4
2.71E-4	54.7	2.71516E-4
2.94E-4	53.9	2.94916E-4
3.18E-4	52.5	3.18315E-4
3.37E-4	51.4	3.37033E-4
3.55E-4	50.4	3.5575E-4
3.83E-4	49.1	3.83825E-4
4.11E-4	48.1	4.11898E-4
4.39E-4	47.2	4.39969E-4
4.68E-4	43.7	4.68039E-4
4.96E-4	43.2	4.96108E-4
5.33E-4	41.8	5.3353E-4
5.66E-4	40.7	5.66272E-4
6.13E-4	39	6.13043E-4
6.59E-4	37.5	6.59809E-4
7.29E-4	36	7.2995E-4
8.23E-4	33.9	8.23457E-4

Heptanol 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72.1	0
1.71E-5	70.3	1.8
3.03E-5	66.2	5.9
4.44E-5	61.4	10.7
5.89E-5	57.1	15
7.47E-5	54.3	17.8
8.88E-5	50.6	21.5
1.04E-4	47.5	24.6
1.187E-4	45.5	26.6
1.29E-4	44.1	28
1.49E-4	41.6	30.5
1.71E-4	39.2	32.9
1.89E-4	37.6	34.5

2.02E-4	35.8	36.3
2.18E-4	34.7	37.4
2.48E-4	33.3	38.8
2.65E-4	32.3	39.8
2.90E-4	31.8	40.3
3.04E-4	30.1	42

Octanol 25 °C

IX	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	71.9	0
3.19E-6	71.9	0
4.96E-6	71.8	0.1
8.51E-6	71.8	0.1
1.20E-5	71.8	0.1
1.70E-5	71.3	0.6
2.27E-5	68.5	3.4
2.87E-5	63.5	8.4
3.40E-5	59.2	12.7
3.97E-5	54.3	17.6
4.43E-5	50.1	21.8
4.93E-5	40.5	31.4

Dietanolamina a 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión Superficial (mN/m)
0	72	0
4.34E-3	70.6	1.4
1.12E-2	68.9	3.1
1.85E-2	67.7	4.3
3.26E-2	65.7	6.3
4.77E-2	64.3	7.7
6.76E-2	62.7	9.3
8.59E-2	61.6	10.4
0.106	60.6	11.4
0.129	59.7	12.3
0.160	58.9	13.1
0.188	58.5	13.5
0.215	58.2	13.8

Monoetanolamina 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión Superficial (mN/m)
0	71.9	0
2.02E-2	71.8	0.1
4.20E-2	71.7	0.2
6.85E-2	70	1.9
8.95E-2	69.2	2.7

0.112	68	3.9
0.135	67	4.9
0.156	66.1	5.8
0.177	65.5	6.4
0.201	65	6.9
0.225	64.3	7.6
0.248	63.6	8.3
0.266	62.6	9.3
0.303	61.9	10
0.327	61	10.9
0.331	60.9	11
0.363	60.5	11.4
0.397	59.7	12.2
0.427	59.3	12.6
0.442	58.8	13.1
0.483	57.9	14
0.543	56.9	15
0.613	55.8	16.1
0.712	54.6	17.3
0.889	53.3	18.6

2-amino-2-metil-1-propanol 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión Superficial (mN/m)
0	72	0
3.5	68.5	3.5
11	61	11
13.7	58.3	13.7
15.4	56.6	15.4
17.7	54.3	17.7
19.2	52.8	19.2
20.4	51.6	20.4
21.7	50.3	21.7
22.8	49.2	22.8
23.3	48.7	23.3
24.1	47.9	24.1
24.5	47.5	24.5
25	47	25
25.3	46.7	25.3
25.6	46.4	25.6
26	46	26
26.6	45.4	26.6
27.2	44.8	27.2
27.6	44.4	27.6
27.9	44.1	27.9
28.3	43.7	28.3

28.6	43.4	28.6
29	43	29
29.2	42.8	29.2
29.5	42.5	29.5
30	42	30
30.2	41.8	30.2

Glima1 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72.3	0
1.55E-2	66.7	5.6
1.96E-2	64.4	7.9
2.75E-2	60.8	11.5
3.46E-2	58.2	14.1
4.24E-2	56.1	16.2
5.15E-2	53.5	18.8
5.99E-2	51.7	20.6
7.16E-2	49.3	23
8.36E-2	46.9	25.4
9.61E-2	44.7	27.6
0.105	36.5	35.8
0.111	33.4	38.9
0.146	28.8	43.5
0.283	27.9	44.4
0.320	27.3	45
0.380	26.5	45.8
0.429	26.4	45.9
0.509	26	46.3
0.705	25.3	47
0.822	25	47.3
1	24.3	48

Glima2 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión Superficial (mN/m)
0	72.1	0
9.1E-3	60.5	11.6
1.26E-3	58	14.1
1.74E-3	55.2	16.9
2.22E-3	53.3	18.8
3.17E-3	50.2	21.9
8.52E-3	43.2	28.9
0.114	40.4	31.7
0.130	39.5	32.6
0.152	38	34.1
0.166	36.5	35.6

0.181	35.4	36.7
0.302	31	41.1
0.443	29.9	42.2
0.790	29.7	42.4
1	29	43.1

Glima3 25 °C

X	Tensión superficial (<i>mN/m</i>)	Presión superficial (<i>mN/m</i>)
0	72.1	0
3.0E-3	64.9	7.2
4.9E-3	62	10.1
7.6E-3	59.1	13
1.0E-2	56.9	15.2
1.43E-2	54.3	17.8
1.74E-2	52.8	19.3
2.26E-2	51	21.1
3.37E-2	47.3	24.8
4.07E-2	46.1	26
5.0E-2	44.4	27.7
6.04E-2	43.1	29
7.28E-2	41.4	30.7
0.113	40.5	31.6
0.206	38.4	33.7
0.254	37.3	34.8
0.353	36.8	35.3
0.440	35.8	36.3
0.576	34.6	37.5
0.642	34.2	37.9
0.844	33	39.1
1	31.7	40.4

Glima4 25 °C

X	Tensión superficial (<i>mN/m</i>)	Presión superficial (<i>mN/m</i>)
0	72.3	0
1.14E-2	67.3	5
1.E-268	64.8	7.5
2.21E-2	62.8	9.5
2.E-285	60.8	11.5
3.48E-2	59.2	13.1
4.3E-2	57.3	15
5.79E-2	54.6	17.7
7.17E-2	53	19.3
8.51E-2	51.6	20.7
0.102	50.2	22.1
0.120	49.2	23.1

0.145	48	24.3
0.164	47.3	25
0.252	44.7	27.6
0.304	42.8	29.5
0.336	41.6	30.7
0.374	40.6	31.7
0.429	39.9	32.4
0.516	38.8	33.5
0.644	37.9	34.4
1	37	35.3

C8E1 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
2.6E-6	59.4	12.6
7.7E-6	49.6	22.4
1.33E-5	--	--
1.77E-5	40.9	31.1
2.93E-5	36.7	35.3
4.22E-5	31.3	40.7
5.96E-5	27.9	44.1
8.09E-5	28	44
1.18E-4	26.1	45.9
1.96E-4	25.8	46.2

C8E3 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
6E-6	52.6	19.4
1.06E-5	48.4	23.6
1.34E-5	45	27
3.67E-5	36.6	35.4
6E-5	32.5	39.5
6.9E-5	29.5	42.5
8.9E-5	28.7	43.3
1.04E-4	28	44
1.3E-4	27.2	44.8
1.53E-4	26.9	45.1
2E-4	27	45
2.6E-4	26.9	45.1

C6E1 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
2.9E-5	60.4	11.6

3.2E-5	57.4	14.6
4.4E-5	55	17
6.4E-5	53.3	18.7
1.07E-4	48.8	23.2
2E-4	42.9	29.1
4E-4	35.6	36.4
5.8E-4	32.3	39.7
8.1E-4	29.2	42.8
1.02E-3	26.6	45.4
1.21E-3	25.8	46.2
1.29E-3	25.7	46.3

C6E3 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
4E-6	54	18
1.9E-5	47.3	24.7
2.9E-5	43.7	28.3
4.8E-5	40.2	31.8
9.5E-5	36.9	35.1
1.96E-4	34.5	37.5
3.9E-4	32.7	39.3
8.1E-4	30.2	41.8
9.9E-4	29.4	42.6
1.21E-3	28.9	43.1
1.43E-343	28	44
1.56E-3	27.8	44.2
1.99E-3	27.4	44.6
2.01E-3	27.4	44.6

C6E5 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
3.2E-6	62.6	9.4
9E-6	56.9	15.1
1E-5	--	--
4E-5	51.4	20.6
7.7E-5	47.3	24.7
2.41E-4	40.4	31.6
6.96E-4	33.6	38.4
1E-3	31.9	40.1
1.29E-3	30.5	41.5
1.59E-3	29.8	42.2
2.04E-3	31	41
2.26E-3	31.9	40.1

C4E1 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
8.6E-5	67.3	4.7
1.89E-4	64.5	7.5
2.94E-4	62.6	9.4
4.54E-4	59.9	12.1
4.78E-4	59.7	12.3
6.2E-4	57.1	14.9
8.2E-4	54.8	17.2
8.4E-4	54.5	17.5
1E-3	52.2	19.8
1.74E-3	48.8	23.2
2.03E-3	46.7	25.3
4.05E-3	40	32
5.05E-3	38.8	33.2
5.66E-3	36.8	35.2
7.14E-3	35.1	36.9
7.79E-3	34.4	37.6
7.95E-3	34.1	37.9
8.59E-3	33.4	38.6
9.79E-3	32	40
1.03E-2	31.9	40.1
1.10E-2	31.1	40.9
1.16E-2	30.7	41.3
2.12E-2	30.4	41.6
1.36E-2	29.5	42.5
1.38E-2	29.2	42.8
1.4E-2	28.8	43.2
1.55E-2	28.6	43.4
1.76E-2	27.9	44.1
1.77E-2	27.7	44.3
1.94E-2	27.5	44.5
2.16E-2	27.4	44.6
2.36E-2	27.2	44.8
2.61E-2	27.1	44.9
2.77E-2	27.1	44.9
2.945E-2	27.1	44.9
3.17E-2	27.1	44.9
3.38E-2	27.1	44.9
3.53E-2	27	45
3.77E-2	27	45
3.95E-2	27	45
6.01E-2	27	45

0.1	27	45
0.304	27	45
0.418	27	45
0.626	27	45
0.826	27	45
0.908	27	45
1	26.8	45.2

C4E2 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
9E-5	63.4	8.6
1.97E-4	58.9	13.1
2.93E-4	56.6	15.4
3.99E-4	53.7	18.3
4.96E-4	52.3	19.7
9.5E-4	47.9	24.1
1.98E-3	--	--
4.04E-3	--	--
6.05E-3	34.9	37.1
7.8E-3	33.6	38.4
9.9E-3	32.3	39.7
1.11E-2	31.9	40.1
1.33E-2	31.3	40.7
1.57E-2	31.2	40.8
1.75E-2	31.6	40.4
1.91E-2	31.8	40.2
2.06E-2	31.9	40.1
2.33E-2	31.7	40.3
2.96E-2	31.3	40.7
3.89E-2	31	41
5.72E-2	30.5	41.5
7.86E-2	30.4	41.6
0.199	30.1	41.9
0.396	29.9	42.1
0.584	30	42
0.791	29.9	42.1
1	29.7	42.3

C4E3 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
1.04E-4	60.3	11.7
2.1E-4	56.3	15.7
2.98E-4	54.1	17.9

3.99E-4	52.3	19.7
4.81E-4	50.3	21.7
9.6E-4	47.6	24.4
2.1E-3	--	--
4.02E-3	37.7	34.3
6.05E-3	35.4	36.6
7.96E-3	34.2	37.8
1.12E-2	33.3	38.7
1.41E-2	32.4	39.6
1.60E-2	32.6	39.4
1.75E-2	33	39
2.12E-2	33.1	38.9
2.20E-2	33.8	38.2
2.45E-2	34	38
2.75E-2	34.1	37.9
2.97E-2	33.7	38.3
3.82E-2	33.7	38.3
5.87E-2	33.6	38.4
7.91E-2	32.8	39.2
0.199	32	40
0.392	31.9	40.1
0.621	31.9	40.1

C3E1 25°C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión superficial (mN/m)
0	72	0
3.71E-3	53.2	18.8
9.9E-3	45.2	26.8
9.97E-3	44.5	27.5
1.65E-2	40	32
1.99E-2	37.8	34.2
1.99E-2	37.8	34.2
2.65E-2	36	36
3.019E-2	34.9	37.1
3.08E-2	34.4	37.6
3.74E-2	33.1	38.9
3.99E-2	32.9	39.1
4.98E-2	31.9	40.1
5.91E-2	31.2	40.8
6.92E-2	31.8	40.2
8.07E-2	30.6	41.4
8.95E-2	30.4	41.6
9.96E-2	30.1	41.9
0.197	29.3	42.7
0.339	28.4	43.6

0.602	27.8	44.2
0.791	27.4	44.6
1	27.1	44.9

C2E1 25 °C

X	Tensión superficial (mN/m)	Presión Superficial (mN/m)
0	72	0
1.57E-2	53.5	18.5
3.87E-2	45.4	26.6
6.14E-2	41.4	30.6
8.08E-2	39.3	32.7
0.101	37.7	34.3
0.189	33.6	38.4
0.399	30.7	41.3
0.570	29.3	42.7
0.834	28.2	43.8
1	27.6	44.4

C1E1 25 °C

X	Tensión Superficial (mN/m)	Presión Superficial (mN/m)
0	72.2	0
2.99E-4	72.1	0.1
5.3E-4	69.1	3.1
8.3E-4	65.1	7.1
1.16E-3	62.1	10.1
1.52E-3	59.2	13
1.91E-3	56.7	15.5
2.33E-3	54.5	17.7
2.76E-3	52.7	19.5
3.22E-3	50.8	21.4
3.72E-3	49.1	23.1
4.2E-3	47.7	24.5
4.83E-3	45.9	26.3
5.62E-3	44.1	28.1
6.66E-3	42.2	30
8.03E-3	39.8	32.4
9.61E-3	37.7	34.5
1.13E-2	35.6	36.6
1.33E-2	33.9	38.3
1.56E-2	32.4	39.8
1.82E-2	31.6	40.6
2.22E-2	31.2	41
2.86E-2	31.2	41
3.66E-2	31	41.2
4.96E-2	31	41.2

1-propanol 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental*	σ_E
0	0	0.00134	--	0
1.15E-5	0.09702	0.05842	--	1.311E-05
4.70E-5	0.39499	0.10332	--	5.339E-05
1.11E-4	0.93551	0.14907	250.045	1.264E-04
1.89E-4	1.59399	0.14946	271.833	2.155E-04
3.36E-4	2.82876	0.14994	280.38	2.155E-04
6.00E-4	5.05507	0.15046	--	3.827E-04
1.11E-3	9.40165	0.15095	273.667	6.841E-04
1.92E-3	16.55741	0.1515	269.189	1.273E-03
3.28E-3	29.84613	0.15229	260.942	2.248E-03
4.94E-3	50.30636	0.15302	260.353	4.071E-03
6.99E-3	90.50816	0.15381	249.73	6.917E-03
9.44E-3	220.977	0.15488	--	1.266E-02
1.19E-2	3844.38768	0.15608	247.394	3.299E-02
1.54E-2	182.42747	0.15753	--	1.864E-01
1.85E-2	105.19392	0.15948	--	2.241E-02
2.88E-2	48.53073	0.16297	--	1.335E-02
3.60E-2	36.25281	0.17172	188.785	6.308E-03
4.883E-2	25.36477	0.17663	136.655	4.734E-03
6.43E-2	18.74253	0.1421	--	3.326E-03
8.24E-2	14.43449	0.12334	187.607	2.465E-03
0.105	11.15438	--	--	1.906E-03
0.135	8.65616	--	--	1.488E-03
0.164	7.12842	--	--	1.187E-03
0.195	5.99258	--	--	1.031E-03
0.233	5.01102	--	--	9.894E-04
0.263	4.43591	--	--	9.317E-04
0.299	3.89632	--	--	9.559E-04
0.331	3.52159	--	--	1.011E-03

* Σ multiplicada por 100

Butanol 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental*	σ_E
0	0	4.93949E-4	250.63	0
1.440E-5	0.374	9.50987E-4	306.59	1.367E-4
2.88E-5	0.752	1.34E-3	323.96	2.735E-4
4.32E-5	1.133	1.92E-3	327.797	4.103E-4
6.61E-5	1.745	2.55E-3	346.646	6.281E-4
9.23E-5	2.456	3.15E-3	--	8.771E-4
1.11E-4	2.995	3.86E-3	379.632	1.064E-3
1.40E-4	3.798	4.58E-3	439.125	1.338E-3
1.71E-4	4.671	5.39E-3	510.103	1.632E-3

2.04E-4	5.636	6.32E-3	512.16	1.952E-3
2.40E-4	6.679	7.26E-3	504.802	2.292E-3
2.74E-4	7.705	8.24E-3	--	2.621E-3
3.19E-4	9.101	9.27E-3	498.028	3.059E-3
3.75E-4	10.874	1.051E-2	--	3.604E-3
4.33E-4	12.799	1.15E-2	--	4.180E-3
4.95E-4	14.935	1.24E-2	416.447	4.803E-3
5.56E-4	17.113	1.37E-2	--	5.4222E-3
6.28E-4	19.807	1.53E-2	386.406	6.167E-3
7.07E-4	22.954	1.71E-2	325.146	7.014E-3
8.05E-4	27.077	--	--	8.089E-3
9.10E-4	31.813	--	--	9.283E-3
1.03E-3	37.615	--	--	1.071E-3
1.18E-3	46.023	--	--	1.265E-3
1.34E-3	55.907	--	--	1.4925E-2
1.52E-3	69.227	--	--	1.780E-2
1.68E-3	82.818	--	--	2.074E-2
1.87E-3	102.570	--	--	2.486E-2
2.11E-3	136.518	--	--	3.147E-2
2.49E-3	219.629	--	--	4.779E-2
2.87E-3	400.517	--	--	8.269E-2
3.23E-3	984.528	--	--	0.2023
3.58E-3	6360.096	--	--	0.8185
3.86E-3	1069.869	--	--	0.1743
4.34E-3	493.219			7.79E-2
4.86E-3	337.300			5.037E-2
5.37E-3	268.477			3.810E-2
6.21E-3	213.389			2.774E-2
6.84E-3	190.684			2.327E-2
7.64E-3	171.487			1.946E-2
8.72E-3	155.140			1.606E-2
1.01E-2	141.902			0.131
1.17E-2	132.392			1.096E-2

* Σ multiplicada por 100

Pentanol 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental	σ_E
0	0	1.73046E-4	--	0
2.48658E-5	1.682	3.54789E-4	419.981	3.494E-4
1.69275E-4	11.656	5.20052E-4	471.127	2.422E-3
2.87733E-4	20.523	6.80885E-4	461.213	4.266E-3
3.30561E-4	23.999	8.37292E-4	455.912	4.990E-3
3.73386E-4	27.671	1.01E-3	374.92	5.754E-3
4.13036E-4	31.282	1.19E-3	318.373	6.506E-3
4.41581E-4	34.028	1.39E-3	--	7.078E-3

5.01839E-4	40.312	1.54E-3	252.695	8.388E-3
5.37778E-4	44.438	1.46E-3	275.962	9.249E-3
5.83756E-4	50.226	1.09E-3	353.126	1.045E-2
6.59848E-4	61.420	--	--	1.279E-2
7.48607E-4	78.130	--	--	1.629E-2
8.34709E-4	100.387	--	--	2.095E-2
9.27134E-4	136.307	--	--	2.851E-2
1E-3	185.776	--	--	3.816E-2
1.1E-3	315.334	--	--	6.557E-2
1.21E-3	1116.995	--	--	0.2255
1.36E-3	573.370	--	--	0.1138
1.5E-3	246.412			0.0501
1.67E-3	150.242			3.086E-2
1.8E-3	116.652			2.421E-2
1.98E-3	91.957			1.887E-2
2.11E-3	79.619			1.638E-2
2.28E-3	67.981			1.405E-2
2.48E-3	58.423			1.210E-2
2.66E-3	52.073			1.079E-2
2.88E-3	46.345			9.563E-3
3.11E-3	41.495			8.568E-3
3.33E-3	37.799			7.807E-3
3.56E-3	34.532			7.154E-3

* Σ multiplicada por 100

Hexanol 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental*	σ_E
0	0	6.61E-5	61.995	0
4.68E-6	0.679	1.11E-4	71.749	1.804E-05
1.40E-5	2.039	1.87E-4	77.399	5.415E-05
2.34E-5	3.399	2.36E-4	78.164	9.040E-05
3.27E-5	4.760	2.96E-4	75.185	1.269E-4
4.68E-5	6.802	3.95E-4	--	1.832E-4
6.08E-5	8.848	4.36E-4	66.767	2.424E-4
7.95E-5	11.581	5.01E-4	67.553	3.291E-4
9.83E-5	14.323	5.77E-4	--	4.296E-4
1.21E-4	17.766	6.69E-4	52.512	5.828E-4
1.40E-4	20.536	7.47E-4	52.512	7.339E-4
1.63E-4	24.020	8.40E-4	51.529	9.663E-4
1.91E-4	28.240	7.93E-4	53.248	1.319E-3
2.20E-4	32.510	7.55E-4	57.106	1.766E-3
2.48E-4	36.837	--	--	2.317E-3
2.71E-4	40.493	--	--	2.865E-3
2.94E-4	44.201	--	--	3.500E-3
3.18E-4	47.964	--	--	4.231E-3

3.37E-4	51.019	--	--	4.888E-3
3.55E-4	54.117	--	--	5.616E-3
3.83E-4	58.850	--	--	6.850E-3
4.11E-4	63.697	--	--	8.269E-3
4.39E-4	68.670	--	--	9.892E-3
4.68E-4	73.782	--	--	1.174E-2
4.96E-4	79.045	--	--	1.384E-2
5.33E-4	86.326	--	--	1.707E-2
5.66E-4	92.972	--	--	2.037E-2
6.13E-4	102.971	--	--	2.595E-2
6.59E-4	113.653	--	--	3.275E-2
7.29E-4	131.217	--	--	4.586E-2
8.23E-4	158.310	--	--	7.082E-2

* Σ multiplicada por 10

Heptanol 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental	σ_E
0	0	7.611E-5	705.369	0
1.71E-5	11.325	1.168E-4	--	2.312E-09
3.03E-5	20.282	1.241E-4	803.148	1.339E-3
4.44E-5	30.312	1.476E-4	--	2.412E-3
5.89E-5	41.456	1.893E-4	844.675	3.656E-3
7.47E-5	54.987	2.228E-4	790.483	5.149E-3
8.88E-5	68.740	2.645E-4	699.478	7.220E-3
1.04E-4	86.463	2.243E-4	736.881	9.733E-3
1.18E-4	106.890	--	--	1.374E-2
1.29E-4	125.003	--	--	1.960E-2
1.49E-4	171.977	--	--	2.599E-2
1.71E-4	258.657	--	--	4.805E-2
1.89E-4	400.912	--	--	0.109
2.02E-4	630.606	--	--	0.270
2.18E-4	1811.472	--	--	0.685
2.48E-4	863.879	--	--	5.849
2.65E-4	487.022	--	--	1.420
2.90E-4	308.903	--	--	0.469
3.04E-4	256.991	--	--	0.199

* Σ multiplicada por 100

MEA 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental	σ_E
2.02E-2	1.777	6.16E-3	7.46	0
4.20E-2	3.693	2.726E-2	8.86	9.649E-3
6.85E-2	6.053	5.89E-2	11.26	0.116
8.95E-2	7.939	0.103	11.61	2.295E-2
0.112	10.073	0.148	129.76	1.388E-2

0.135	12.167	0.186	217.88	9.311E-3
0.156	14.221	0.232	55.31	7.218E-3
0.177	16.271	0.270	66.38	5.988E-3
0.201	18.684	--	--	5.156E-3
0.225	21.166	--	--	4.463E-3
0.248	23.643	--	--	3.946E-3
0.266	25.786	--	--	3.555E-3
0.303	30.220	--	--	3.286E-3
0.327	33.376	--	--	2.868E-3
0.331	33.834	--	--	2.646E-3
0.363	38.411	--	--	2.618E-3
0.397	43.763	--	--	2.376E-3
0.427	49.050	--	--	2.1679E-3
0.442	52.023	--	--	2.011E-3
0.483	60.677	--	--	1.938E-3
0.543	76.991	--	--	1.773E-3
0.613	104.88	--	--	1.574E-3
0.712	182.047	--	--	1.390E-3
0.889	3568.353	--	--	1.195E-3

* Σ multiplicada por 10

DEA 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental	σ_E
4.34E-3	2.751	2.494E-4	7.46	0
1.12E-2	7.543	1.23E-3	8.86	1.784E-3
1.85E-2	13.917	3.39E-3	11.26	4.997E-3
3.26E-2	41.386	8.89E-3	11.61	9.565E-3
4.77E-2	381.211	1.579E-3	129.76	3.553E-3
6.76E-2	36.361	2.664E-3	217.88	0.827
8.59E-2	21.580	5.02E-3	55.31	2.04E-2
0.106	15.363	5.44E-3	66.38	1.214E-2
0.129	11.747	--	--	8.731E-3
0.160	9.032	--	--	6.726E-3
0.188	7.467	--	--	5.203E-3
0.215	6.433	--	--	4.317E-3

* Σ multiplicada por 10

AMP 25 °C

X	E modelo	X	Σ experimental	σ_E
9.22E-3	12.003	1.15E-3	44.1	0
2.36E-2	38.204	4.87E-3	132.5	1.680E-4
3.44E-2	81.436	1.25E-2	147.2	5.377E-05
4.65E-2	398.927	2.40E-2	150.7	4.551E-05
5.92E-2	195.317	4.88E-2	206.1	4.459E-05
7.08E-2	91.440	0.106	235.6	4.680E-05

8.30E-2	60.954	0.208	44.1	5.295E-05
9.52E-2	46.658	--	--	6.005E-05
0.109	37.257	--	--	6.859E-05
0.121	31.958	--	--	7.742E-05
0.134	27.626	--	--	8.726E-05
0.147	24.607	--	--	9.636E-05
0.159	22.289	--	--	1.059E-4
0.171	20.380	--	--	2.355E-05
0.184	18.684	--	--	1.234E-4
0.198	17.212	--	--	1.318E-4
0.22	15.346	--	--	1.408E-4
0.239	13.948	--	--	1.504E-4
0.259	12.803	--	--	1.597E-4
0.293	11.242	--	--	1.674E-4
0.326	10.048	--	--	1.235E-4
0.355	9.177	--	--	1.215E-4
0.385	8.453	--	--	1.195E-4
0.427	7.583	--	--	1.168E-4
0.475	6.797	--	--	3.541E-2
0.531	6.068	--	--	1.035E-4
0.594	5.423	--	--	9.773E-05

* Σ multiplicad por 10

Glima 1 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	0
1.55E-2	18.301	1.8E-2	120
1.96E-2	23.564	4.43E-2	210
2.75E-2	34.683	5.8E-2	250
3.46E-2	46.329	7.9E-2	390
4.24E-2	61.982	0.101	550
5.15E-2	86.586	0.112	630
5.99E-2	120.521	0.135	350
7.16E-2	212.936	0.156	90
8.36E-2	590.168	--	--
9.61E-2	1032.798	--	--
0.105	355.417	--	--
0.111	263.469	--	--
0.146	106.228	--	--
0.283	37.735	--	--
0.320	32.525	--	--
0.380	26.683	--	--
0.429	23.3687	--	--
0.509	19.4163	--	--
0.705	13.795	--	--

0.822	11.788	--	--
1	9.651	--	--

* Σ multiplicada por 100

Glima 2 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	0
9.1E-3	24.183	9.9E-3	190
1.26E-2	35.734	1.55E-2	380
1.74E-2	56.551	2.02E-2	450
2.22E-2	89.371	2.54E-2	490
3.17E-2	357.385	2.7E-2	580
8.52E-2	45.759	3.15E-2	640
0.114	31.122	3.32E-2	670
0.130	26.487	3.97E-2	740
0.152	22.193	4.64E-2	800
0.166	20.263	5.03E-2	800
0.181	18.363	5.76E-2	700
0.302	10.743	6.22E-2	670
0.443	7.283	7.01E-2	480
0.790	4.065	7.56E-2	310
1	3.210	--	--

* Σ multiplicada por 100

Glima 3 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	0
3.0E-3	10.028	1.09E-2	630
4.9E-3	16.784	1.36E-2	730
7.6E-3	27.563	1.52E-2	840
1.0E-2	39.148	1.69E-2	850
1.43E-2	69.670	1.89E-2	840
1.74E-2	110.089	2.08E-2	750
2.26E-2	388.635	2.2E-2	700
3.37E-2	139.258	2.47E-2	640
4.07E-2	82.701	2.63E-2	610
5.0E-2	55.725	2.83E-2	470
6.04E-2	41.692	3.41E-2	280
7.84E-2	29.599	4.44E-2	120
0.113	19.384	--	--
0.206	10.259	--	--
0.254	8.278	--	--
0.353	5.926	--	--
0.440	4.737	--	--
0.576	3.618	--	--

0.642	3.246	--	--
0.844	2.467	--	--
1	2.083	--	--

* Σ multiplicada por 100

Glima 4 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	0
1.14E-2	12.186	1.21E-2	1000
1.6E-2	18.506	2.37E-2	1200
2.21E-2	25.392	3.43E-2	1600
2.85E-2	35.122	6.37E-2	900
3.48E-2	47.094	7.38E-2	900
4.36E-2	71.066	2.971E-2	0
5.79E-2	165.606	--	--
7.17E-2	2931.135	--	--
8.51E-2	238.014	--	--
0.102	107.149	--	--
0.120	71.312	--	--
0.145	50.234	--	--
0.164	41.646	--	--
0.252	23.803	--	--
0.304	19.181	--	--
0.336	17.127	--	--
0.374	15.247	--	--
0.429	13.193	--	--
0.516	10.857	--	--
0.644	8.646	--	--
1	5.529	--	--

Σ multiplicada por 1000

C8E3 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
6E-6	109.166	6E-6	76
1.06E-5	268.985	1.06E-5	82
1.34E-5	109.426	1.34E-5	107
3.67E-5	23.449	3.67E-5	
6E-5	13.794	6E-5	
6.9E-5	11.928	6.9E-5	
8.9E-5	9.185	8.9E-5	
1.04E-4	7.838	1.04E-4	
1.3E-4	6.254	1.3E-4	
1.53E-4	5.306	1.53E-4	
2E-4	4.053	2E-4	

2.6E-4	3.115	2.6E-4	
--------	-------	--------	--

Σ multiplicado por 10

C8E1 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
2.6E-6	33.103	2.6E-6	32
7.7E-6	928.656	7.7E-6	71
1.33E-5	89.275	1.33E-5	79
1.77E-5	53.411	1.77E-5	89
2.93E-5	27.628	2.93E-5	133
4.22E-5	18.395	4.22E-5	147
5.96E-5	12.782	5.96E-5	162
8.09E-5	9.336	8.09E-5	159
1.18E-4	6.366	1.18E-4	150
1.96E-4	3.821	1.96E-4	72

Σ multiplicada por 10

C6E5 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
3.2E-6	0.708	3.2E-6	74
9E-6	1.993	9E-6	100
1E-5	2.215	1E-5	117
4E-5	8.954	4E-5	174
7.7E-5	17.772	7.7E-5	118
2.41E-4	88.835	2.41E-4	89
6.96E-4	66.110	6.96E-4	86
1E-3	37.678	1E-3	100
1.29E-3	27.350	1.29E-3	126
1.59E-3	21.486	1.59E-3	136
2.04E-3	16.355	2.04E-3	--
2.26E-3	14.664	2.26E-3	--

Σ multiplicada por 10

C6E3 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
4E-6	12.243	4E-6	260
1.9E-5	96.743	1.9E-5	640
2.9E-5	1920.023	2.9E-5	780
4.8E-5	89.309	4.8E-5	270
9.5E-5	30.885	9.5E-5	220
1.96E-4	13.825	1.96E-4	110
3.9E-4	6.828	3.9E-4	100

8.1E-4	3.273	8.1E-4	90
9.9E-4	2.676	9.9E-4	80
0.00121	2.189	1.21E-3	80
0.00143	1.852	1.43E-3	80
0.00156	1.697	1.56E-3	70
0.00199	1.330	1.99E-3	
0.00201	1.317	2.01E-3	

Σ multiplicad por 100

C6E1 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
2.9E-5	27.912	2.9E-5	380
3.2E-5	31.371	3.2E-5	620
4.4E-5	47.536	4.4E-5	900
6.4E-5	91.175	6.4E-5	1110
1.07E-4	1800.695	1.07E-4	1090
2E-4	66.319	2E-4	1200
4E-4	25.904	4E-4	1220
5.8E-4	17.207	5.8E-4	1310
8.1E-4	12.124	8.1E-4	1610
1.02E-3	9.568	1.02E-3	1250
1.21E-3	8.041	1.21E-3	880
1.29E-3	7.535	1.29E-3	110

Σ multiplicada por 100

C4E3 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
1.04E-4	10.090	1.04E-4	--
2.1E-4	21.398	2.1E-4	--
2.98E-4	32.565	2.98E-4	--
3.99E-4	49.217	3.99E-4	--
4.81E-4	68.353	4.81E-4	--
9.6E-4	300.204	9.6E-4	59
2.1E-3	38.235	2.1E-3	--
4.02E-3	17.542	4.02E-3	--
6.05E-3	11.366	6.05E-3	--
7.96E-3	8.567	7.96E-3	67
1.121E-2	6.050	1.12E-2	--
1.412E-2	4.793	1.4E-2	67
1.60E-2	4.216	1.60E-2	--
1.75E-2	3.849	1.75E-2	85
2.12E-2	3.180	2.12E-2	89
2.20E-2	3.058	2.20E-2	100

2.45E-2	2.749	2.45E-2	85
2.75E-2	2.450	2.75E-2	88
2.97E-2	2.269	2.97E-2	86
3.82E-2	1.763	3.82E-2	76
5.82E-2	1.148	5.87E-2	10
7.91E-2	0.851	7.91E-2	5
0.199	0.338	0.199	4
0.392	0.172	0.392	2
0.621	0.108	0.621	2

Σ multiplicada por 10

C4E2 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
9E-5	8.904	9E-5	--
1.97E-4	20.333	1.97E-4	--
2.93E-4	32.388	2.93E-4	--
3.99E-4	49.595	3.99E-4	--
4.96E-4	72.301	4.96E-4	--
9.5E-4	452.186	9.5E-4	37
0.001.98E-3	45.732	1.98E-3	31
0.004.04E-3	19.005	4.04E-3	64
0.006.05E-3	12.361	6.05E-3	91
0.007.8E-3	9.509	7.8E-3	102
0.009.9E-3	7.456	9.9E-3	77
0.01.11E-2	6.628	1.11E-2	72
0.01.33E-2	5.502	1.33E-2	60
0.01.57E-2	4.665	1.57E-2	56
0.01.75E-2	4.184	1.75E-2	40
0.01.91E-2	3.841	1.91E-2	50
0.02.06E-2	3.552	2.06E-2	54
0.02.33E-2	3.137	2.33E-2	26
0.02.96E-2	2.469	2.96E-2	24
0.03.89E-2	1.882	3.89E-2	13
0.05.72E-2	1.281	5.72E-2	8
0.07.86E-2	0.931	7.86E-2	8
0.199	0.367	0.199	4
0.396	0.184	0.396	4
0.584	0.125	0.584	2
0.791	0.092	0.791	2
1	0.073	1	2

Σ multiplicada por 10

C4E1 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
---	----------	---	----------------

0	0	2.2E-4	1.5
8.6E-5	5.270	2.2E-4	16.3
1.89E-4	11.735	3.9E-4	9.2
2.94E-4	18.693	4.3E-4	1.2
4.54E-4	30.601	5.8E-4	18.1
4.78E-4	32.585	6.2E-4	2.9
6.2E-4	45.901	8.2E-4	3.6
8.2E-4	72.177	8.2E-4	18.1
8.4E-4	75.584	8.4E-4	3.6
1E-3	112.113	1E-3	17.6
1.74E-3	281.074	1.04E-3	3.8
2.03E-3	141.581	1.74E-3	6
4.05E-3	38.257	1.8E-3	5.6
5.05E-3	29.076	1.97E-3	4.6
5.66E-3	25.453	2.02E-3	4.5
7.14E-3	19.640	2.03E-3	32
7.79E-3	17.872	2.88E-3	5.2
7.95E-3	17.486	3.95E-3	8.3
8.59E-3	16.10	4.05E-3	42.7
9.79E-3	14.028	4.06E-3	8.1
1.03E-2	13.249	4.8E-3	7.5
1.10E-2	12.377	4.93E-3	7.3
1.16E-2	11.760	5.05E-3	11.6
1.21E-2	11.239	5.66E-3	52
1.36E-2	9.977	7.14E-3	7.3
1.38E-2	9.822	7.79E-3	20.6
1.4E-2	9.693	7.9E-3	9.8
1.55E-2	8.697	7.95E-3	36.4
1.76E-2	7.669	8.59E-3	44.3
1.77E-2	7.6	9.79E-3	37.6
1.94E-2	6.935	1.034E-2	18.9
2.16E-2	6.230	1.1E-2	9.5
2.36E-2	5.689	1.10E-2	14.6
2.61E-2	5.140	1.16E-2	44.6
2.77E-2	4.858	1.21E-2	33.6
2.94E-2	4.568	1.34E-2	16.5
3.17E-2	4.23	1.36E-2	48.9
3.38E-2	3.969	1.38E-2	48.8
3.53E-2	3.802	1.52E-2	40.4
3.77E-2	3.563	1.55E-2	80.9
3.95E-2	3.401	1.56E-2	6.7
6.01E-2	2.233	1.6E-2	6
0.1	1.342	1.74E-2	5.6
0.304	0.440	1.76E-2	23.7
0.418	0.320	1.77E-2	14.8

0.626	0.214	1.88E-2	12.8
0.826	0.162	1.94E-2	8.1
0.908	0.147	2.01E-2	3.7
1	0.134	2.12E-2	2.2
		2.16E-2	4.6
		2.29E-2	1.3
		2.36E-2	1.3
		2.61E-2	1.4
		2.77E-2	1.4
		2.94E-2	1.5
		3.17E-2	1
		3.38E-2	0.9
		3.53E-2	0.9
		3.77E-2	0.8
		3.95E-2	0.8

C3E1 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
0	0	0	--
337E-3	66.843	3.71E-3	38
9.9E-3	127.236	9.9E-3	47
9.97E-3	124.611	9.E-3	45
1.65E-2	46.430	1.65E-2	54
1.99E-2	36.154	1.99E-2	62
1.99E-2	36.107	1.99E-2	74
2.65E-2	25.629	2.65E-2	52
3.01E-2	22.117	3.01E-2	63
3.08E-2	21.577	3.08E-2	48
3.74E-2	17.508	3.74E-2	30
3.99E-2	16.322	3.99E-2	10
4.98E-2	12.928	4.98E-2	10
5.91E-2	10.838	5.91E-2	9
6.92E-2	9.214	6.92E-2	9
8.07E-2	7.884	8.07E-2	7
8.95E-2	7.103	8.95E-2	6
9.96E-2	6.374	9.96E-2	6
0.197	3.208	0.197	5
0.339	1.860	0.339	3.5
0.602	1.049	0.602	2
0.791	0.798	0.791	2
1	0.631	1	2

Σ multiplicada por 10

C2E1 25°C

X	E modelo	X	Σ experimental
---	----------	---	----------------

0	0	0	--
1.57E-2	61.344	1.57E-2	60
3.87E-2	212.663	3.877E-2	60
6.14E-2	63.113	6.14E-2	110
8.08E-2	41.73	8.08E-2	80
0.101	31.409	0.101	65
0.189	15.582	0.189	50
0.399	7.223	0.399	40
0.570	5.043	0.570	30
0.834	3.441	0.834	20
1	2.870	1	20

Σ multiplicada por 100

Glosarios de términos y abreviaturas.

V	= volumen de la espuma cm^3
F	= flujo volumétrico cm^3/min
h	= altura de la espuma cm
X_{op}	= fracción mol operacional
ΔG_{ads}	= cambio en la energía libre de Gibbs de adsorción
ΔH_{ads}	= cambio en el entalpía de adsorción
T	= temperatura
ΔS_{ads}	= cambio en la entropía de adsorción
A^s	= área transversal ($\text{\AA}^2/\text{molécula}$)
n_D^{20}	= índice de refracción
X	= fracción mol
M	= peso molecular (g/mol)
P_{vapor}	= presión de vapor
$T_{ebullición}$	= temperatura de ebullición
C_p	= color específico
ΔP	= diferencia entre las presiones interna y externa
R	= radio de la esfera
E	= modulo de elasticidad de Gibbs
a	= área de superficie asociada a una lamela
A	= área de superficie por mol de soluto
A_0	= área de superficie por mol de soluto en condiciones de saturación
x	= concentración de bulto
R	= constante universal de los gases
v_{ads}	= velocidad de adsorción
v_{des}	= velocidad de desorción
k_1	= constante de velocidad de adsorción

k_2 = constante de velocidad de desorción

Letras griegas

Σ	= unidad de espumabilidad seg
σ	= tensión superficial mN/m
Γ_{sat} o Γ_{Max}	= concentración superficial de saturación o máxima (moles/cm ²)
ρ	= densidad (Kg/m ³)
μ	= viscosidad
Γ	= concentración superficial
π	= presión superficial mN/m
θ	= fracción de espacios cubiertos
β	= parámetro hidrofóbico (constante de Henry en dos dimensiones)
ϕ_B^s	= fracción volumétrica en la superficie del soluto
ϕ_B	= fracción volumétrica en el bulto de soluto
ϕ_A^s	= fracción volumétrica en la superficie del soluto
π^o	= presión máxima de superficie
π^*	= presión superficial reducida
λ	= parámetro interactivo
α	= parámetro interactivo más uno

Abreviaturas

<i>cac</i>	= concentración de agregación crítica
<i>cmc</i>	= concentración micelar crítica
<i>Xop</i>	= concentración operacional