Propiedades de Superficie en Soluciones Acuosas Diluidas de Alcoholes con Tres Carbonos

Manuel. S. Páez^{1*}, Efraín. E. Villegas¹ y Armando Alvis²

Universidad de Córdoba, (1) Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Química, (2) Facultad de Ciencias Agrícolas, Departamento de Ingeniería de Alimentos, Carrera 6 No 76-103, Km 3, vía Cereté, Córdoba-Colombia (e-mail: mspaezm@unal.edu.co)

*autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Resumen

Se determinó la tensión superficial de soluciones acuosas diluidas de alcoholes mono y polihidroxílicos a varias temperaturas usando el método de ascenso capilar. Los datos experimentales fueron usados para evaluar la entropía, la entalpía y la concentración superficial, la constante de enlazamiento y la pendiente límite. Se analizan el efecto de la temperatura, del tamaño de la cadena alquílica y de la posición de los grupos hidroxilos en el soluto expuestos al solvente. Los resultados muestran que la tensión superficial de las soluciones varía linealmente con la temperatura y que el carácter hidrofóbico de estos solutos, aumenta según el orden: 123PT, 13PD, 12PD y 1P. Adicionalmente se detectaron procesos de rompimiento de enlaces de las esferas de hidratación (entalpías positivas) y aumento del desorden molecular (entropías positivas), en la región superficial.

Palabras clave: tensión superficial, hidrofobicidad, constante de enlazamiento, polioles

Surface Properties of Aqueous Dilute Solutions of Alcohols with Three Carbons

Abstract

Surface tension of diluted aqueous solutions of mono and polyhydroxilic alcohols was determined at various temperatures using the method of capillary rising. The experimental data were used to evaluate surface entropies, enthalpies, and concentration, binding constants and the limiting slope. The effect of temperature, of the alkyl chain size and of the position of the hydroxyl groups in the solute that were exposed to the solvent are analyzed. The results show that the surface tension of the solutions varies lineally with the temperature and that the hydrophobic character of these solutes rises according to the order: 123PT, 13PD, 12PD y 1P. Additionally, bond breaking processes of the hydration spheres (positive enthalpies) and molecular disorder increase (positive entropies) in the surface region were detected.

Keywords: surface tension, hydrophobicity, binding constants, polyols

INTRODUCCIÓN

Los materiales superficialmente activos (surfactantes) son usados a menudo tanto en aplicaciones industriales (recuperación de aceites, industria farmacéutica y biotecnología); como en la vida diaria (componentes de polvos para lavar, champús y cremas). El entendimiento de las propiedades químicas y físicas de los surfactantes es muy importante para elegir convenientemente tales productos químicos en aplicaciones industriales específicas. Es esencial tener herramientas que puedan describir las propiedades físicas y el comportamiento de fase de los surfactantes en ambientes hidrofóbicos e hidrofílicos. Tales herramientas podrían predecir algunas propiedades importantes de los surfactantes, como la concentración micelar crítica, número de agregación y coeficientes de partición, los cuales dependen de la estructura de los surfactantes (Cheng et al., 2002). La dependencia de los parámetros de estado con la tensión superficial puede proporcionar cierta información incluyendo la dependencia de la entropía superficial con la temperatura y también la composición superficial con la composición al interior de la solución (Azizian et al., 2006). El efecto de la temperatura sobre la tensión superficial de la solución es discutido en términos del balance entre interacciones hidrofóbicas e hidrofílicas de propanodiol y el agua y su efecto sobre la estructura del solvente.

Para describir el efecto de la composición al interior de la solución sobre la tensión superficial de las soluciones acuosas de solutos orgánicos usaremos el modelo desarrollado por Connors y Wright (1989), por cuanto este se ha usado con éxito en la literatura química (Piñeiro et al., 2001; Yano, 2005; Hoke y Chen., 2001; Hoke y Patton., 1992; Hawrylak et al., 1998; Romero y Páez, 2006). Básicamente el modelo queda expresado por la ecuación

$$\sigma = \sigma_1^0 - \left[1 + \frac{b X_1}{1 - a X_1} \right] X_2 (\sigma_1^0 - \sigma_2^0) \quad (1)$$

Donde σ_1^0 , σ_2^0 y σ son respectivamente las tensiones superficiales de los componentes puros 1 (agua) y 2 (solutos) y de la solución, X_1 y X_2 son la fracción molar de los componentes 1 y 2 en el interior de la solución y a, b son parámetros ajustables.

De acuerdo con el modelo de Connors, la constante de enlazamiento K_2 , describe la asociación del compuesto orgánico en la región superficial. Esta depende del tamaño del grupo hidrofóbico presente en la molécula orgánica y puede ser usada como una medida de la hidrofobicidad relativa del soluto. La evaluación de K_2 es de interés porque tal como lo mostró Connors y Wright (1989), el $\log K_2$ presenta un alto coeficiente de correlación lineal con el logaritmo del coeficiente de partición octanol-agua ($\log P_{oct}$), el cual es generalmente usado como medida de hidrofobicidad.

$$K_2 = \frac{a}{1 - a} \quad (2)$$

La tensión superficial de las soluciones acuosas de 1-propanol, 1,2-propanodiol, 1,3-propanodiol y 1,2,3-propanotriol fue estudiada a bajas concentraciones de estos alcoholes debido a que la mayoría de los cambios en tensión superficial para sistemas no electrolíticos ocurren a muy baja concentración del soluto, mientras que los parámetros superficiales permanecen casi inalterados para altas concentraciones y además porque la influencia de la temperatura sobre las propiedades superficiales de las soluciones acuosas se ha usado para obtener información acerca del efecto que ejerce el soluto sobre la estructura del agua.

De ahí, que el interés los autores de este trabajo, consistió en realizar un estudio sistemático del efecto que ejerce el número y la posición de los grupos OH a lo largo de una cadena alquílica de tres átomos de carbono, sobre el comportamiento de la tensión superficial, dada la habilidad de esta propiedad para reflejar los cambios en la superficie causada por muy pequeñas concentraciones de soluto y porque también refleja cambios en las interacciones moleculares, en virtud a que la energía superficial depende casi exactamente de la variación de las fuerzas intermoleculares y puede ser usada para interpretar el comportamiento de las mezclas.

Finalmente este estudio hace parte de la estrategia desarrollada durante los últimos dos años en laboratorio de termodinámica de la Universidad de Córdoba, la cual tiene como propósito realizar investigaciones sistemáticas de las propiedades fisicoquímicas en mezclas líquidas binarias, a fin de usarlas como una guía cualitativa que ayuden a interpretar el comportamiento de las diferentes interacciones que operan en la interfase y el seno de la solución.

MATERIALES Y METODOS

Los materiales usados son los siguientes: 1-propanol Merck 99.5%, 1,2-propanodiol Merck 99.5%, 1,3-propanodiol Sigma 99.0% y 1,2,3-propanotriol Carlo Erba 99%. Los cuatro alcoholes son reactivos analíticos y fueron destilados y desgasificados antes de su uso. El contenido de agua fue determinado en todos los casos por el método Karl Fisher. El agua fue doblemente destilada, tratada según la literatura y desgasificada antes de su uso (Weissberger, 1972). Todas las soluciones se prepararon por pesada usando una balanza OHAUS con una sensibilidad de 10^{-5} g en el más bajo rango. Las concentraciones finales se corrigieron según el contenido de agua. Las densidades de las soluciones fueron medidas usando picnómetros tipo Wood-Brusie con un volumen de bulbo de 80 cm³ con una incertidumbre de $\pm 5 \times 10^{-5}$ g cm⁻³. Los picnómetros fueron calibrados con agua a 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 303.15 y 308.15 K. La densidad de agua a cada temperatura se tomó de la literatura (Riddick y Bunger, 1974).

La tensión superficial fue determinada a intervalos de 5 K entre (283.15 y 308.15) K, usando el método de ascenso capilar (Romero y Blanco, 1996) con un tubo capilar de 27.0 cm de longitud y 0.0422 cm de radio interno, determinado por calibración con agua a las temperaturas seleccionadas. Las medidas de altura se hicieron con un catetómetro Phylatex-Gerate con una división mínima de 1×10^{-2} cm. Todas las medidas se realizaron en un baño a temperatura constante controlada y las variaciones de temperatura en el mismo se registraron con un termómetro Fluke Hart Scientific de alta precisión con una incertidumbre de ± 0.005 K. La tensión superficial de la solución σ fue evaluada usando la ecuación de cálculo de Poisson-Rayleigh en la que ρ es la densidad de la solución, r es el radio capilar, h es la altura capilar y g es la constante gravitatoria. Cada dato de tensión superficial se tomó como el promedio de tres medidas independientes. En todos los casos la desviación estándar es mucho menor que 0.3 mN m^{-1} .

$$\sigma = \frac{r \rho g}{2} \left(h + \frac{r}{3} - \frac{0.1288 r^2}{h} + \frac{0.1312 r^3}{h^2} \right) \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tensión superficial experimental (σ) de las soluciones diluidas de 1-propanol (1P), 1,2-propanodiol (12PD), 1,3-propanodiol (13PD) y 1,2,3-propanotriol (123PT) en agua a varias temperaturas se correlacionan en la figura 1. La rápida disminución observada en la tensión superficial con la fracción molar, para algunos de los solutos previamente mostrados, es típica de sistemas acuosos de solutos superficialmente activos o surfactantes. La variación de la tensión superficial con la temperatura es lineal para todos los sistemas estudiados, a cualquier fracción molar tal como se muestra por ejemplo en la figura 2, para el 1-propanol. Las propiedades termodinámicas superficiales son obtenidas por las siguientes ecuaciones. La entropía superficial de exceso por unidad de área (Adamson, 1990) o la variación de entropía por unidad de área debido a la interfase (Motomura, 1978; Hansen, 1962) viene dada por la ecuación (4) y entalpía superficial está dada por la ecuación (5)

$$S^s = - \frac{d\sigma}{dT} \quad (4)$$

$$H^s = \sigma - T \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \quad (5)$$

Estas ecuaciones son extensamente usadas por (Glinski et al., 1998; Glinski et al., 1999a Glinski et al., 1999b; Glinski et al., 1996; Glinski et al., 2001) para investigar la termodinámica superficial de varias mezclas binarias. La entropía y la entalpía superficial de las mezclas alcohol-agua son calculadas de las ecuaciones 4 y 5 y se muestran en la figura 3, como una función de la fracción molar del soluto.

Fig. 1: Tensión superficial (σ) de $\blacklozenge$ 1-P, $\blacksquare$ 12PD, $\triangle$ 13PD y $\times$ 123PT en función de la fracción molar del soluto (x_2) a diferentes temperaturas.

Fig. 2: Tensión superficial (σ) en función de la temperatura para diferentes fracciones molares de 1-propanol $\blacklozenge$ 0.002, $\blacksquare$ 0.009, $\triangle$ 0.020, $\times$ 0.080, $*$ 0.150 y $\bullet$ 0.200

Fig. 3: Entropía (S^s) y entalpía (H^s) superficial de $\blacklozenge$ 1-P, $\blacksquare$ 12PD, $\triangle$ 13PD y $\times$ 123PT en función de la fracción molar del soluto, en la región rica en agua.

En la figura 1, contrasta la rápida disminución de la tensión superficial con tendencia a la estabilización, este punto es notable porque aquí se originan agregados conocidos como clusters ó micelas. La concentración a la cual ocurre este fenómeno se denomina concentración micelar crítica (CMC). Por encima de esta concentración la tensión superficial permanece prácticamente constante, ya que sólo la forma monomérica contribuye a la reducción de la tensión superficial. Para concentraciones por debajo pero muy próximas a la CMC la pendiente de la curva σ vs $\ln C_2$ permanece esencialmente constante, indicando que la concentración superficial de exceso ha alcanzado su máximo valor constante. En este rango se considera que la interfase se saturada con el surfactante (van Voorst Vader, 1960). La reducción continua en la tensión superficial es principalmente debida al aumento de la actividad del surfactante en el interior de la fase liquida más que en la interfase. Cuando se disuelve en agua una sustancia orgánica (anfifílica), la interacción entre las moléculas de agua en el interior de la solución es mayor que la que existe entre el soluto y el solvente o entre las moléculas del soluto; por ello estas sustancias son expulsadas del interior de la solución, ocupando así la interfase liquido-aire. La sustancia adsorbida permanece con sus grupos polares inmersos en la solución y las partes apolares orientadas hacia el aire. En concordancia con los resultados mostrados en la figura 1, según la cual la tensión superficial de estas sustancias en solución cambian muy poco con relación a la del agua pura, podemos inferir que las interacciones soluto-soluto, soluto-solvente y solvente-solvente en el interior de las soluciones acuosas de 13PD y 123PT son muy similares y compatibles con predominio de las interacciones soluto-solvente; en tanto que el 1P y el 12PD en el seno de la solución presentan interacciones energéticamente desfavorables con el solvente, comportamiento que es característico de los solutos hidrofóbicos. Para enfatizar más en esta discusión, es conveniente examinar el comportamiento de la concentración superficial del soluto (Γ) calculada usando la ecuación de Gibbs, teniendo en cuenta que la disociación del alcohol es despreciable. Los resultados se muestran en la figura 4, a temperatura de 283.15K, a manera de ejemplo.

Fig. 4: Concentración superficial (Γ) de 1-P, 12PD, 13PD y 123PT en función de la fracción molar del soluto (x_2) a 283.15K.

El comportamiento de Γ vs x_2 permite establecer que todos los solutos examinados se adsorben en la superficie, pero el 1P se satura más rápidamente en la superficie a concentraciones más bajas del soluto en la fase líquida, seguido por el 12PD. Mientras que el 13PD y 123PT parecen mostrar saturación superficial en la vecindad de la CMC del soluto, este comportamiento es comprensible si se considera que un incremento en la longitud del grupo hidrofóbico incrementa eficiente y ligeramente la efectividad de adsorción como se observa en el 12PD y 1P. La adsorción de estos solutos al interior del agua es debida fundamentalmente a fuerzas de dispersión. De estos resultados se infiere que la adsorción por fuerzas de dispersión se incrementa con el incremento en el peso molecular de la sustancia adsorbida. De acuerdo con Rosen (2004), el área ocupada por una molécula de surfactante con grupos hidrofílicos simples iónicos o no iónicos en la superficie, parece estar determinada por el área ocupada por el grupo hidrofílico hidratado mas que por el grupo hidrofóbico. Por otro lado, si un segundo grupo hidrofílico hidratable es introducido en la molécula, la porción de la molécula con los dos grupos hidrofílicos tiende a situarse en la interfase plana y el área ocupada por la molécula se incrementa. Mientras que la posición central de un grupo hidrofílico más que su posición terminal en una cadena alquílica lineal o ramificada resulta en un incremento del área por molécula en la interfase liquido-aire. Este razonamiento está en buen acuerdo con los resultados mostrados en la figura 4, ya que a mayor Γ menor área molecular.

En cuanto a las curvas presentadas en la figura 3, podemos decir lo siguiente: el signo de estos parámetros se puede interpretar como un proceso de ruptura de los enlaces que constituyen las esferas de hidratación del soluto (H^s positiva) y aumento del desorden molecular (S^s positiva). En términos generales la destrucción de las esferas de hidratación sigue el orden 123PT, 13PD, 12PD y 1P, lo cual es consistente con el comportamiento de la entropía; con excepción donde se producen los máximos. Otro aspecto que llama la atención es que según nuestros datos el 1P sólo presenta un máximo, mientras que para (Glinski et al., 1996) este posee máximos dobles. La pendiente límite experimental fue determinada debido a que el signo y la magnitud de la pendiente reflejan el carácter hidrofóbico e hidrofílico del soluto (Romero y Páez, 2006; Romero et al. 2007). Para todos los solutos considerados en este trabajo las pendientes límites son negativas y con valor bien diferenciable. Ellas se presentan en la tabla 1, indicando en todos los casos un exceso superficial positivo, mientras que la magnitud de la pendiente se relaciona con el tamaño de la cadena del alquílica expuesta al solvente.

A una temperatura fija, la pendiente cambia notablemente con la posición relativa del grupo OH. La pendiente límite de la tensión superficial con respecto a la fracción molar fue calculada usando un conjunto limitado de puntos en la región muy diluida. La incertidumbre experimental de la pendiente límite es aproximadamente del 10%. El 1P presenta una pendiente negativa más grande seguida por 12PD, 13PD y el 123PT. De acuerdo con estos resultados el 1P exhibe el más pronunciado comportamiento hidrofóbico debido a la influencia de la cadena alquílica con un mayor grupo hidrofóbico expuesto al solvente acuoso; este hecho contrasta con un valor negativo más pequeño para el 123PT, tal vez por carecer de grupos hidrofóbicos libres. El comportamiento del 12PD y del 13PD es intermedio a los dos anteriores, y al parecer por la posición estratégica que ocupan los grupos OH en la cadena carbonada. La magnitud de la pendiente límite se hace menos negativa con el aumento de la temperatura.

Tabla 1: Pendientes límites de la tensión superficial para soluciones acuosas de 1-propanol (1P), 1,2-propanodiol (12PD), 1,3-propanodiol (13PD), y 1,2,3-propanotriol (123PT) a 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 303.15 y 308.15K.

T / K	$(d\sigma/dx_2)_{x_2 \rightarrow 0}$			
	1-P	12-PD	13-PD	123-PT
283.15	-2039.3±172.1	-473.4±41.8	-81.1±9.8	-61.6±3.2
288.15	-2020.7±170.7	-453.6±24.3	-78.3±8.5	-64.6±3.8
293.15	-2019.5±170.9	-444.8±25.1	-75.7±4.6	-66.6±3.7
298.15	-2009.8±178.3	-434.0±34.4	-74.5±6.4	-71.6±4.6
303.15	-2009.8±178.3	-426.4±41.2	-72.9±6.0	-74.7±5.4
308.15	-1998.8±192.1	-430.8±30.8	-72.2±7.4	-75.5±5.7

Los datos de tensión superficial para las soluciones acuosas de 1P, 12PD y 123PT, obtenidas en este trabajo, son tratadas de acuerdo con el modelo propuesto por Connors y de esta forma se obtienen las constantes de enlazamiento. En la tabla 2, se presentan los parámetros resultantes y las constantes de enlazamiento con sus correspondientes incertidumbres. El modelo no se pudo aplicar al 13PD por no presentar convergencia. Para todos los solutos considerados en este trabajo la constante de enlazamiento K_2 es positiva como se esperaba. El más alto valor es para el 1P seguido por 12PD y 123PT. Este comportamiento confirma los resultados obtenidos por la pendiente límite.

Tabla 2: para soluciones acuosas de 1-propanol, 1,2-propanodiol, 1,3-propanodiol y 1,2,3-propanotriol a diferentes temperaturas.

T/ K	1-propanol			1,2-propanodiol			1,2,3-propanotriol		
	a	b	K_2	a	b	K_2	a	b	K_2
283.15	0.990±0.003	1.006 ± 0.006	99.0 ± 1.2	0.96 ± 0.03	0.85 ± 0.01	24.0 ± 1.5	0.958 ± 0.009	0.350 ± 0.002	22.8 ± 1.5
288.15	0.990±0.004	1.002 ± 0.007	99.0 ± 1.2	0.96 ± 0.04	0.81 ± 0.02	24.0 ± 1.9	0.958 ± 0.008	0.385 ± 0.002	22.8 ± 1.9
293.15	0.990±0.005	1.001 ± 0.008	99.0 ± 1.2	0.96 ± 0.04	0.77 ± 0.01	24.0 ± 1.9	0.958 ± 0.009	0.418 ± 0.002	22.8 ± 1.9
298.15	0.990±0.006	1.002 ± 0.009	99.0 ± 1.5	0.96 ± 0.04	0.72 ± 0.02	24.0 ± 2.0	0.958 ± 0.005	0.449 ± 0.001	22.8 ± 2.0
303.15	0.990±0.007	1.003 ± 0.009	99.0 ± 1.2	0.96 ± 0.05	0.70 ± 0.02	24.0 ± 2.6	0.958 ± 0.006	0.488 ± 0.002	22.8 ± 2.6
308.15	0.990±0.008	0.998 ± 0.009	99.0 ± 1.2	0.96 ± 0.04	0.68 ± 0.01	24.0 ± 2.0	0.958 ± 0.008	0.500 ± 0.002	22.8 ± 2.0

La dependencia de los parámetros de tensión superficial con temperatura ha sido discutida por el (Hoke y Chen, 1991). De acuerdo con sus resultados, para soluciones acuosas de 2-propanol y etilenglicol a y b tienen una dependencia pequeña con la temperatura. Mientras a se incrementa con la temperatura, b muestra una pequeña disminución con la temperatura. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el parámetro b disminuye al aumentar la temperatura respecto a los sistemas: 1P y 12PD; mientras que el 123PT presenta un comportamiento contrario. En cambio no se observó ninguna dependencia con temperatura para el parámetro a . Dado que la constante de enlazamiento es una función del parámetro a , es obvio que esta permanezca constante, lo cual probablemente se deba a que nuestros datos de tensión superficial se garantizan con una décima.

CONCLUSIONES

Se discuten las interacciones que ocurren al interior y en la superficie de la solución. Se establece que la disminución en la tensión superficial es resultado del aumento de la actividad del soluto en el seno de la solución. La adsorción de estos solutos por el agua es dominada por fuerzas de dispersión. El área ocupada por estos solutos en la región superficial parece estar dominada por los grupos hidrofílicos hidratados, de esta manera el signo positivo de la entalpía y la entropía superficial parecen indicar rompimiento de los enlaces que constituyen las esferas de hidratación, y como consecuencia se incrementa el desorden molecular. Estos rompimientos en términos generales confirman los resultados encontrados para la constante de enlazamiento y las pendientes límites. Los resultados obtenidos para los parámetros superficiales y la constante de enlazamiento no mostraron ser sensibles a los cambios de temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Loa autores agradecen a la Universidad de Córdoba por el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

NOMENCLATURA

X_2	Fracción molar del soluto	r	Densidad de la solución (g cm-3)
K_2	Constante de enlazamiento	σ	Tensión superficial (mN m-1)
R	Radio del capilar (cm)	S_s	Entropía superficial (mNm-1K-1)
H	Altura del capilar (cm)	H_s	Entalpía superficial (mNm-1)
G	Constante gravitacional = 980 cm s ⁻²	a, b	Parámetros del modelo de Connors
T	Temperatura absoluta (K)	Γ	Concentración superficial (mol.cm-2 . 1010)

REFERENCIAS

- Adamson, W.A.; *Physical Chemistry of Surfaces*, 5th ed.; Wiley: New York (1990).
- Azizian, S., N. Bashavard y B. Yahyaei; *Surface Properties of Dilute Solutions of Alkanes in Benzyl Alcohol*, J. Chem. Eng. Data: 51, 56-59 (2006).
- Cheng, H., G.M. Kontogeorgis y E.H. Stenby; *Prediction of Micelle Formation for Aqueous Polyoxyethylene Alcohol Solutions with UNIFAC Model*, Ind. Eng. Chem. Res: 41, 892-898 (2002).
- Connors, K.A. y J.L. Wright; *Dependence of surface tension on composition of binary aqueous-organic solutions*, Anal. Chem.: 61, 194-198 (1989).
- Glinski, J., G. Chavepeyer y J.K. Platten; *Surface properties of diluted solutions of solutes of normal propyl alcohol*, J. Chem. Phys: 104, 8816-8820 (1996).
- Glinski, J., G. Chavepeyer, J.K. Platten y P. Smet; *Surface properties of diluted aqueous solutions of normal short-chained alcohols*, J. Chem. Phys: 109, 5050-5053 (1998).
- Glinski, J., G. Chavepeyer y J.K. Platten; *Untypical surface properties of aqueous solutions of 1,5-pentandiol*, Colloids Surf. A: 162, 233-238 (1999a).
- Glinski, J., G. Chavepeyer y J.K. Platten; *Surface properties of 1,2-pentandiol*, J. Chem. Phys: 111, 3233-3236 (1999b).
- Glinski, J., G. Chavepeyer y J.K. Platten; *Surface properties of diluted aqueous solutions of 3-picoline*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects: 178, 207-212 (2001).
- Hansen, R.S; *Thermodynamic of interfaces between condensed phases*, J. Phys. Chem: 66, 410-415 (1962).
- Hawrylak, B. y otros cuatro autores; *Viscosity, surface tension, and refractive index measurements of mixtures of isomeric butanediols with water*, J. Solution Chem: 27, 827-841 (1998).
- Hoke, B.C. y E.F. Patton; *Surface tensions of propylene glycol + water*, J. Chem. Eng. Data: 37, 331-333 (1992).
- Hoke, B.C. y J.C. Chen; *Binary aqueous-organic surface tension temperature dependence*, J. Chem. Eng. Data: 36, 322-326 (2001).
- Hoke, B.C. y J.C. Chen; *Binary aqueous-organic surface tension temperature dependence*, J. Chem. Eng. Data: 36(3), 322-326 (1991).
- Motomura, K; *Thermodynamic studies on adsorption at interfaces*, J. Colloid Interface Sci: 64, 348-355 (1978).
- Piñeiro, A., P. Brocos, R. Bravo y A. Amigo; *A comprehensive approach to the surface tension of binary liquid mixtures*, Fluid Phase Equilib.: 182, 337-352 (2001).
- Riddick, J.A. y W.B. Bunger; *Techniques of Chemistry* Vol II. Wiley-Interscience. New York (1974).
- Romero, C.M. y L.H. Blanco; *Tópicos en Química Básica*, Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales, Ed. Guadalupe, Bogotá, Vol 1, pp. 191 (1996).
- Romero, C.M. y M.S. Páez; *Surface tensions of aqueous solutions of alcohol and polyols at 298.15 K*, Phys. Chem. Liq: 44, 61-65 (2006).
- Romero, C.M. y otros cuatro autores; *Effect of temperature on the surface tension of diluted aqueous solutions of 1,2-hexanediol, 1,5-hexanediol, 1,6-hexanediol and 2,5-hexanediol*, Fluid Phase Equil.: 258, 62-72 (2007).
- Rosen, M.J; *Surfactants and interfacial phenomena*, Third Edition. Wiley-Interscience. New Jersey, Vol 1, pp. 64 (2004).
- van Voorst Vader, F; *Adsorption of detergents at the liquid-liquid interface, Part 1*. Trans. Faraday Soc.: 56, 1067-1077 (1960).
- Weissberger, A. (Ed.); *Physical Methods of Chemistry*, Vol. 1 Part 4, 4th ed. Wiley New York (1972).
- Yano, Y.F.; *Correlation between surface and bulk structures of alcohol-water mixtures*, J. Colloid Interface Sci: 284, 255-259 (2005).