

COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS DE LA CMC DE TENSOACTIVOS MEDIANTE DOS METODOLOGÍAS

STATISTICAL COMPARISON OF SURFACTANT CMC RESULTS BY TWO METHODOLOGIES

Magdelis Terrero- Toirac¹, Silio López -Guerra¹, Onix López-Galarza¹

(1) Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), Churrucá # 481 e/ Vía Blanca y Washington, Cerro, La Habana CP62000 - Cuba
(e-mail: magdelis@ceinpet.cupet.cu)

Recibido: 18/06/2020 - Evaluado: 29/07/2020 - Aceptado: 03/10/2020

RESUMEN

La concentración a la cual se forman las micelas se le llama concentración micelar crítica (CMC) y es donde ocurren los cambios fisicoquímicos significativos, como son: un cambio brusco de tensión superficial y de conductividad. El objetivo de la investigación es comparar estadísticamente los resultados obtenidos por ambos métodos, por medición de la conductividad y de la tensión superficial. Ambas metodologías se aplicaron a dos tensoactivos mediante la medida de dichas propiedades en disoluciones acuosas a diferentes concentraciones. La tensión superficial se calculó mediante el método del anillo utilizando el tensiómetro y la conductividad se realizó en un conductímetro. El punto de intersección de las dos rectas de tendencias se calculó para cada metodología. Se utilizó el método de comparación de dos medias experimentales a partir del estadístico t. Para los tensoactivos evaluados se comprobó estadísticamente que ambos métodos no presentaron diferencias significativas para un nivel de confianza de 95%.

ABSTRACT

The concentration at which micelles are formed is called the critical micellar concentration (CMC) and it is where significant physicochemical changes occur, such as an abrupt change in surface tension and conductivity. The objective of the research is to statistically compare the results obtained by both methods, by measuring conductivity and surface tension. Both methodologies were applied to two surfactants by measuring these properties in aqueous solutions at different concentrations. The surface tension was calculated by the ring method using the tensiometer and the conductivity was carried out in a conductimeter. The intercept point of the two trend lines was calculated for each methodology. The method of comparison of two experimental means was used from the t statistic. For the surfactants evaluated, it was statistically proven that both methods did not present significant differences for a confidence level of 95%.

Palabras claves: tensoactivos, concentración micelar crítica, solquisa, chemard

Key words: surfactants, critical micellar concentration, solquisa, chemard

INTRODUCCIÓN

Los surfactantes, también denominados tensoactivos, son sustancias caracterizadas porque sus moléculas tienen una parte polar o hidrófila que se denomina cabeza y una parte apolar o hidrófoba conocida como cola. La figura 1 muestra la representación de una molécula de surfactante típico.

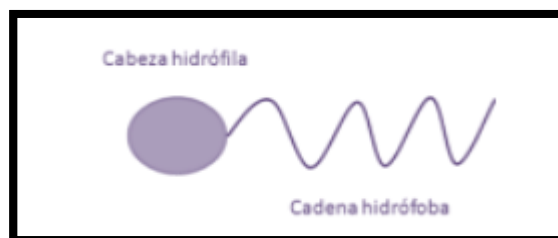


Fig. 1: Estructura típica de una molécula de surfactante.

El término surfactante proviene del inglés "surfactant" que significa "superficialmente activo" y se usa para describir a aquellas sustancias que se localizan preferentemente en la superficie. Cuando se añade un surfactante en pequeña concentración al agua, las moléculas del surfactante migran hacia la superficie y se orientan en la interfase de forma que la cabeza polar se dirige hacia el agua y la cola, altamente hidrofóbica, se orienta hacia el exterior. Como consecuencia de esta concentración de exceso en la superficie se produce una disminución de la tensión superficial. Por esta razón a los surfactantes también se les denomina tensoactivos y ambos términos se pueden emplear indistintamente (López, 2017).

La clasificación de los tensoactivos más aceptada se basa en su capacidad de disociación en agua. Así, según la naturaleza de su grupo polar se pueden encontrar tensoactivos iónicos (catiónicos o aniónicos), zwitteriónicos (anfóteros), y no iónicos (Salager, 2002).

Los tensoactivos se distinguen como moléculas anfífilas que reducen la tensión en la interfase (Gautam & Tyagi, 2006). Sobre la base de dicha propiedad, las moléculas de los tensoactivos se ubican en las interfases de fluidos propias de los sistemas aceite-agua y aire-agua (Stoyanov *et al.*, 2003). Además, la presencia de tensoactivos en medio acuoso incrementa la solubilidad en el agua y disponibilidad de compuestos orgánicos (Jiménez-Islas *et al.*, 2010).

El término micela se utilizó por primera vez en la descripción de agregados de jabones y detergentes en disoluciones acuosas (McBain, 1913). La formación de micelas es una característica importante de los tensoactivos, de manera que, al igual que sólo los tensoactivos en forma de monómeros contribuyen a los fenómenos dinámicos como la actividad espumógena o la de humectabilidad, otros procesos que se dan en las interfases, como la interacción de los tensoactivos con membranas biológicas, detergencia o solubilización, dependen de las micelas o agregados presentes en la disolución (Holmberg *et al.*, 2003).

Los surfactantes solubilizados en un disolvente polar como el agua forman unos agregados que suelen tener geometría esférica denominados micelas, minimizando con ello la energía libre del sistema. En las micelas la parte hidrofóbica de las moléculas de surfactante se orienta hacia el interior, restringiendo así su contacto con las moléculas de agua circundantes, mientras que la parte hidrofílica se orienta hacia el exterior de la micela entrando en contacto con las moléculas de agua. En el caso de disolventes no polares, las estructuras micelares son inversas, ya que las cabezas hidrofílicas se localizan en el interior de la micela, mientras que la región exterior contiene los grupos hidrofóbicos orientados hacia las moléculas del solvente apolar (López, 2017).

En el seno de un líquido cada molécula está sometida a fuerzas de atracción iguales en todas direcciones de manera que quedan anuladas, sin embargo, en la superficie del líquido hay una fuerza neta hacia el interior. Esto

supone que habría que realizar un trabajo para llevar las moléculas hacia la superficie en contra de esa fuerza. Dicho trabajo es proporcional a la tensión superficial. Todos los tensoactivos tienen la propiedad de disminuir la tensión superficial cuando se añaden al agua en pequeñas cantidades. En un sistema acuoso, las moléculas de tensoactivos se distribuyen de manera que tienden a minimizar la superficie de contacto agua-hidrocarburo.

La adsorción de las moléculas de tensoactivo en las interfases o en las superficies que las contienen se debe a la débil interacción de la porción hidrófoba del tensoactivo con las moléculas de agua, y a la fuerte interacción (fuerzas de dispersión y puentes de hidrógeno) que existe entre las moléculas de agua. Así la parte hidrofóbica del tensoactivo queda fuera del seno de la disolución acuosa, mientras que la porción hidrófila interacciona fuertemente con el agua a través de interacciones dipolo-dipolo o ión-dipolo, quedando solvatada y localizándose así el tensoactivo en la interfase aire/agua (Zaragoza, 2012).

La adsorción progresiva de las moléculas de tensoactivo en la superficie de la solución provoca un cambio en las fuerzas de interacción de las moléculas de agua de la superficie. Como consecuencia, el tensoactivo es capaz de disminuir la energía de los enlaces entre las moléculas de agua, es decir, reduce la tensión superficial del agua. A medida que aumenta la concentración de tensoactivo, aumenta el número de moléculas de tensoactivo en la superficie, hasta que la superficie queda totalmente saturada por éstas. A partir de este punto, si la concentración de tensoactivo sigue aumentando, este se disuelve en la fase acuosa en una forma molecularmente dispersa. La tensión superficial sigue disminuyendo hasta alcanzar un valor crítico, llamado concentración micelar crítica (CMC), a partir de la cual, la tensión superficial se mantiene constante y se empiezan a formar estructuras en las que las cabezas polares se orientan hacia la disolución y las cadenas apolares hacia el interior. Dicha formación es cooperativa, espontánea y reversible. Los agregados que se forman, denominados micelas, están en equilibrio con los monómeros de tensoactivo, son termodinámicamente estables y pueden adoptar varias formas y tamaños en función de la concentración y naturaleza del tensoactivo. A partir de la CMC cualquier cantidad de tensoactivo que se añada a la solución se incorpora en forma de agregado y no de monómero (figura 2) (Chevalier & Zemb, 1990; Novelo-Torres & Gracia-Fadrique, 2005).

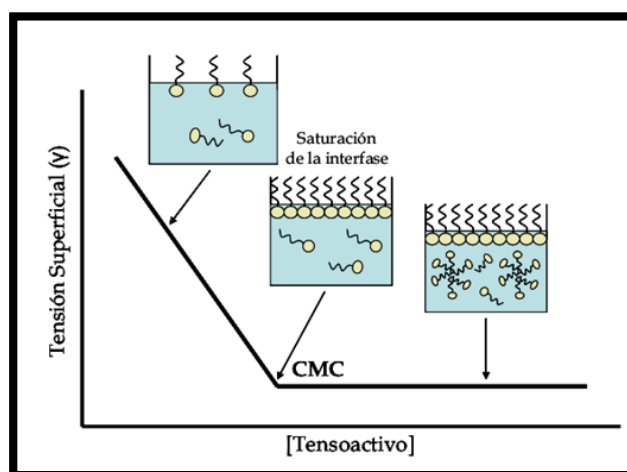


Fig. 2: Representación esquemática del comportamiento de un tensoactivo en disolución acuosa.

Los dos parámetros fundamentales que definen a un tensoactivo son: eficacia, que corresponde a la máxima disminución de la tensión superficial o tensión de interfase que produce, y eficiencia, que equivale a la CMC y es la cantidad de tensoactivo que produce ese descenso máximo. El valor de la CMC viene determinado por la naturaleza del tensoactivo y por la longitud de sus cadenas hidrocarbonadas (Zaragoza, 2012).

Conforme aumenta la CMC, aumenta la capacidad de formar micelas y cuanto menor es el valor de ésta, mejor detergente será el tensoactivo (Zana, 2005; Myers, 2006). La concentración micelar crítica, puede detectarse mediante diversas técnicas, como muestra en la figura 3, ya que muchas propiedades fisicoquímicas presentan en esta zona una discontinuidad en su variación. Por ejemplo, se puede detectar mediante medidas de tensión superficial, conductividad electrolítica (solo en el caso de surfactantes iónicos), osmometría, RMN de difusión, fluorescencia, turbidez o transmitancia de luz visible (López, 2017; Tadros, 2005).

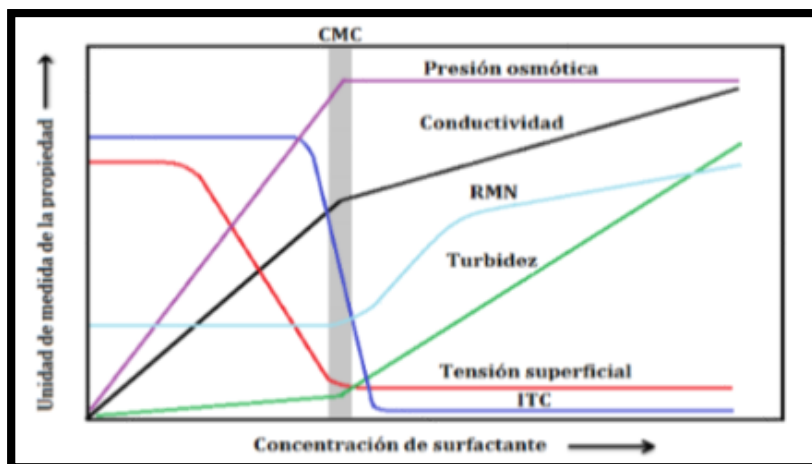


Fig. 3: Esquema de la variación de algunas propiedades fisicoquímicas de una disolución de surfactante en función de la concentración.

El campo de aplicación de los surfactantes muestra probablemente el más interdisciplinario de la ciencia y de la tecnología moderna. Aunque solo un número se encuentre reducido de fenómenos fundamentales, el número de aplicaciones resulta extremadamente elevado y su variedad considerable. En el caso de la industria petrolera los surfactantes constituyen un pilar fundamental de tales procesos en exploración-producción especialmente.

Entre los principales procesos se encuentran:

- ✓ Perforación y terminación de pozos (lodos de perforación, cementos, fluidos de terminación y estimulación de pozos).
- ✓ Operaciones de producción (emulsión de la mezcla crudo-agua, prevención, deshidratación, desalación y procesos relacionados).
- ✓ Transportación mediante sistemas de tuberías con la utilización de emulsiones y tensoactivos (Sandoval-Ibarra *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2015).

Otra tecnología para la mejora de la fluidez del petróleo crudo se requiere de la elaboración de una mezcla con fluidos de menor viscosidad y costo, como el agua. El empleo de agua en lugar de derivados del petróleo constituye una alternativa viable, teniendo en consideración de que el crudo viene del pozo acompañado de esta, por lo cual puede ser reutilizada con ese fin. La dificultad de la tecnología radica en que dichas sustancias resultan químicamente inmiscibles, por lo que el resultado de la mezcla de ambas se convierta una emulsión cuya estabilidad depende de otras sustancias como los tensoactivos, por su influencia sobre la tensión superficial (Rodríguez *et al.*, 2013).

Dentro de la industria petrolera, una de las aplicaciones potenciales de los microorganismos productores de biotensoactivos consiste en el mejoramiento de la recuperación de petróleo, la cual, por sus siglas en inglés se denomina MEOR (Microbial Enhanced Oil Recovery) (Raiger-Lustman & López, 2009; Bryant, 1987). Este proceso se emplea en una tecnología in situ de recuperación terciaria que utiliza microorganismos productores de

biotensoactivos con el objetivo de reducir las tensiones de las interfases presentes entre el petróleo, la superficie sólida del material rocoso y la fase acuosa al interior de los poros (Zaragoza, 2012). Cuando estas fuerzas se disminuyen, se mejora la fluidez de los hidrocarburos a través de los poros de la roca, promoviendo así la recuperación de crudo residual (Jiménez-Islas *et al.*, 2010).

La industria de extracción y transformación del petróleo emplea tensoactivos en la limpieza de los tanques de almacenamiento para incrementar la solubilidad de hidrocarburos no miscibles en fases acuosas, tales como pentano, hexano, ciclohexano, octano, dodecano, hexadecano, tolueno y naftaleno (Jiménez-Islas *et al.*, 2010; Perfumo *et al.*, 2006).

En la presente investigación se planteó como objetivo comparar estadísticamente dos metodologías para la determinación de la concentración micelar crítica (CMC). Para ello se planteó como objetivos específicos: determinar la conductividad y la tensión superficial a diferentes concentraciones. Determinar cuál de los dos métodos es más efectivo.

METODOLOGÍA

En la realización de la investigación se utilizaron como materiales: surfactantes (Solquisa D-37 y Chemard) y agua destilada.

Los equipos utilizados fueron el tensiómetro del anillo marca KRUSS y el conductímetro marca HANNA para las mediciones de las muestras.

El desarrollo del procedimiento experimental fue llevado a cabo de la siguiente manera: Se preparó 200 ml de la disolución madre de 3 % del Solquisa D-37 y Chemard. A partir de esta se prepararon 9 disoluciones hijas de 100 ml con concentraciones de 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 %.

La tensión superficial se expresa en unidades de fuerza por unidad de longitud (mN/m) y depende de las fuerzas cohesivas intermoleculares, las cuales son diferentes en el seno y en la superficie de un líquido. Existen diferentes métodos de medida de la tensión superficial. En este trabajo, para la medición de la tensión superficial, se utilizó el método del anillo de Du Noüy (Du Noüy, 1919), basado en el ángulo de contacto que el líquido establece con una superficie sólida.

El método de Du Noüy es una medida dinámica que consiste en suspender verticalmente sobre la muestra un anillo de platino, sumergirlo por debajo de la superficie y posteriormente se le hace ascender (figura 4).

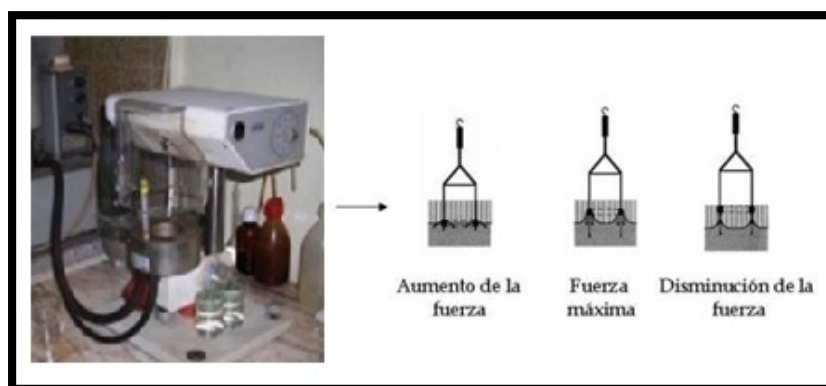


Fig. 4: Diagramas de fuerzas al ir elevando el anillo de la muestra en medidas de tensión superficial mediante el método de Du Noüy.

La tensión superficial de todas las disoluciones hijas del Solquisa D-37 y Chemard se midieron por triplicado y se obtuvieron valores σ' , pero para que se obtengan los mismos absolutos a dicho valor hay que multiplicarlo por el factor de corrección F. Entonces:

$$\sigma' * F = \sigma \text{ corregido siendo } F = \sigma (\text{H}_2\text{O}) \text{ tabulado} / \sigma (\text{H}_2\text{O}) \text{ experimental}$$

$$F = 71,75 \text{ mN/m} / 53 \text{ mN/m} = 1,35 \quad (1)$$

El factor de corrección se utiliza debido a que además de la fuerza que resulta de la tensión superficial hay otra fuerza debida al peso de la película que rodea directamente al anillo. Para su cálculo influyen sobre todo la fracción de líquido hidrostáticamente efectivo y la diferencia de densidad entre las dos fases (Harkins & Jordan, 1930).

Los valores de tensión superficial que se obtuvieron inicialmente disminuyeron bruscamente con la concentración de tensoactivo. Cuando la superficie del agua está saturada de moléculas tensoactivas, por encima de la CMC, el resto de tensoactivo formaron parte de las micelas y la tensión superficial ya no varió con la concentración (Novelo-Torres & García-Fadrique, 2002).

La CMC correspondió al punto de corte de las dos rectas que se obtuvieron al representarse σ frente al Ln C.

Mediante medidas de conductividad eléctrica en función de la concentración de surfactante, se pueden llevar a cabo estudios de caracterización de sistemas coloidales. A partir de los datos obtenidos, se puede determinar la concentración micelar crítica (CMC).

Se mide la conductividad específica de las disoluciones hijas del Solquisa D-37 y Chemard por triplicado. Adicionalmente, las medidas de conductividad en función de la concentración de surfactante permiten determinar la CMC. Para bajas concentraciones de surfactante, la conductividad observada se debe a la presencia de iones libres (monómeros de surfactante y sus respectivos contraiones), por esta razón la conductividad aumenta mucho con la concentración de surfactante, ya que aumenta la concentración de iones en el medio. Por encima de la CMC, además de los iones de surfactante libres, encontramos agregados micelares, formados por asociación de varios iones de surfactante, cuya carga global está parcialmente cancelada por la de los respectivos contraiones que se apostan en sus cercanías. Cuando comienza la asociación micelar, disminuye la velocidad a la que aumenta la conductividad con la concentración de surfactante, debido principalmente a que en las micelas no se encuentran libres el 100% de los contraiones, sino que solo lo están un porcentaje. Además de esto, hay que tener en cuenta que el menor tamaño de los iones libres, respecto a las micelas, hace que estos tengan una mayor movilidad favoreciendo la conductividad (Domínguez *et al.*, 1997).

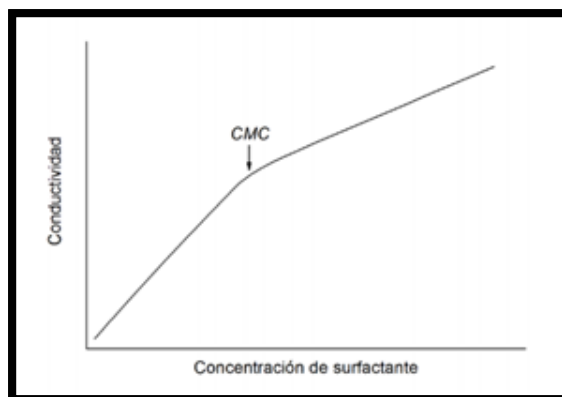


Fig. 5: Perfil típico de la representación de los valores de conductividad en función de la concentración de surfactante.

Como consecuencia, la representación de los datos de conductividad en función de la concentración de surfactante consiste en dos rectas de diferente pendiente para las regiones anterior y posterior a la CMC. El cambio de pendiente ocurre a la concentración a la cual se inicia la formación de micelas, por lo que la concentración micelar crítica se determina como la intersección de las dos rectas (López, 2017), (figura 5).

El manejo del conductímetro resultó sencillo, una vez calibrado, el electrodo se puso en contacto con la disolución y se tomaron los valores cuando se alcanzó el equilibrio (figura 6).



Fig. 6: Sistema de medición conductimétrica de la disolución (conductímetro marca HANNA).

Parámetros de calibración:

Conductividad (H₂O) = 1,17 μS

Conductividad (Conductividad Corregida) = (Conductividad Experimental) - Conductividad (H₂O)

El método se aplicó para dos surfactantes, Solquisa D-37 y Chemard. El punto de intercepción se calculó de las dos rectas de tendencias en cada aplicación mediante el programa Microsoft Excel 2010.

Para comparar estadísticamente se utilizó el método de comparación de dos medias experimentales (Miller & Miller, 2010) donde para decidir si la diferencia entre ambas medias muestrales, \bar{x}_1 y \bar{x}_2 es significativa, es decir, para contrastar la hipótesis nula, $H_0: \mu_1 = \mu_2$, se calcula el estadístico t:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{S \sqrt{\frac{1}{n_1 + n_2}}} \quad (2)$$

A partir de la desviación estándar, S se calcula:

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)} \quad (3)$$

y t tiene $(n_1 + n_2 - 2)$ grados de libertad. Con dicho método se supone que las muestras se extraen de poblaciones con desviaciones estándar iguales.

Si $|t_{exp}| < t_{teor}$ se acepta la H_0 por lo tanto no hay diferencia significativa entre las dos medias para un nivel de confianza de 95 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de las mediciones de conductividad y tensión superficial de cada surfactante realizadas se tabularon y se graficaron los resultados obtenidos de la conductividad vs concentración (figuras 7 y 8) y tensión superficial vs Ln de la concentración (figuras 9 y 10).

A continuación, se representaron la variación de la conductividad y la tensión superficial frente a la concentración de cada surfactante, para lo cual se representa en la tabla 1.

Tabla 1: Valores obtenidos de la conductividad y tensión superficial para cada concentración del surfactante.

C (%)	Solquisa D-37 Conductividad (μS), (25°C)	Chemard Conductividad (μS), (25°C)	Ln C	Solquisa D-37 σ (mN/m), (25°C)	Chemard σ (mN/m), (25°C)
0,01	6,37	5,88	-4,605	50,76	54,405
0,05	7,25	6,9	-2,996	49,95	51,57
0,1	11,39	8,43	-2,303	47,115	50,895
0,5	23,98	32,03	-0,693	41,85	47,25
1	44,13	105,43	0,000	41,04	45,9
1,5	-	124,33	0,405	-	45,765
2	51,23	137,63	0,693	40,5	45,63
2,5	54,03	148,03	0,916	39,42	45,495
3	58,73	150,33	1,099	39,555	45,495

En las figuras 7 y 8 se representan la tensión superficial en función del logaritmo neperiano de la concentración de los surfactantes, Solquisa D-37 y Chemard a 25°C respectivamente.

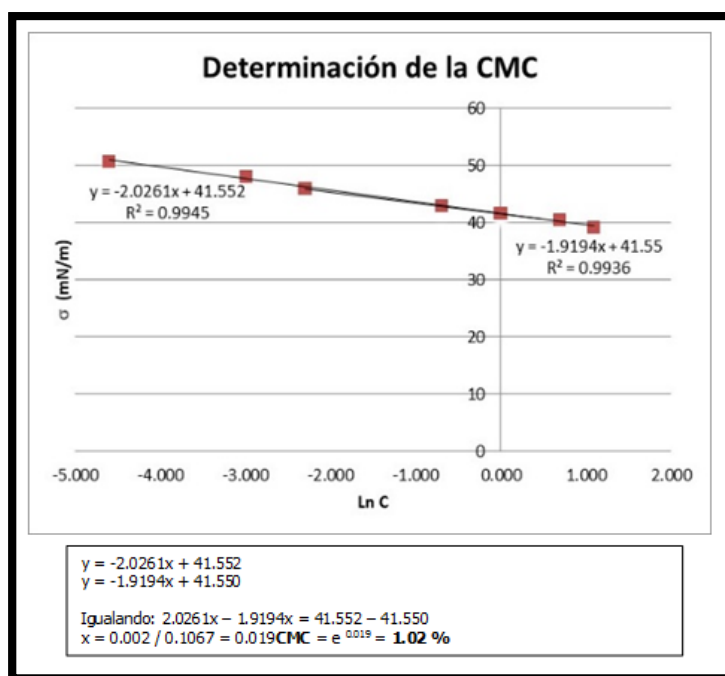


Fig. 7: Representación gráfica de la tensión superficial de las disoluciones de Solquisa D-37 vs Ln C.

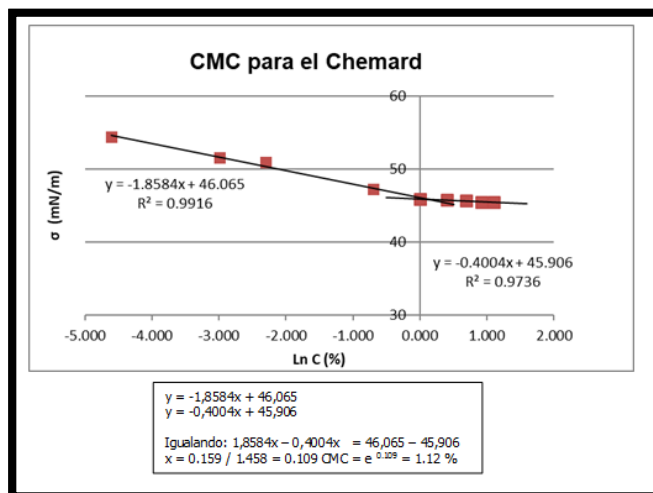


Fig. 8: Representación gráfica de la tensión superficial de las disoluciones del Chemard vs Ln C.

Se puede observar que las curvas presentan un mínimo que, en el caso de los surfactantes tradicionales, suele ser atribuido a la presencia de impurezas que son adsorbidas fuertemente en la interfase líquido-aire. Para un gran número de líquidos iónicos, se ha detectado la existencia de dicho mínimo, no siendo posible eliminarlo mediante procesos de purificación como la recristalización (García *et al.*, 2013). Goodchild *et al.* (2007), han sugerido que su presencia, en el caso de los líquidos iónicos, puede deberse a que se forman micelas en la superficie del líquido con anterioridad a que se formen dichos agregados en el seno de la disolución y al posterior restablecimiento de la monocapa de surfactante en la interfase para concentraciones superiores a la CMC. Para los sistemas en los que se presenta un mínimo en el valor de la tensión superficial, se toma como CMC la concentración de surfactante a la cual se presenta este (García *et al.*, 2013; Goodchild *et al.*, 2007). Siguiendo este procedimiento se determinó el punto de corte de las dos pendientes para cada gráfico y se obtuvieron los valores de CMC de 1.02% para el Solquisa D-37 y 1.12% para el Chemard a 25°C.

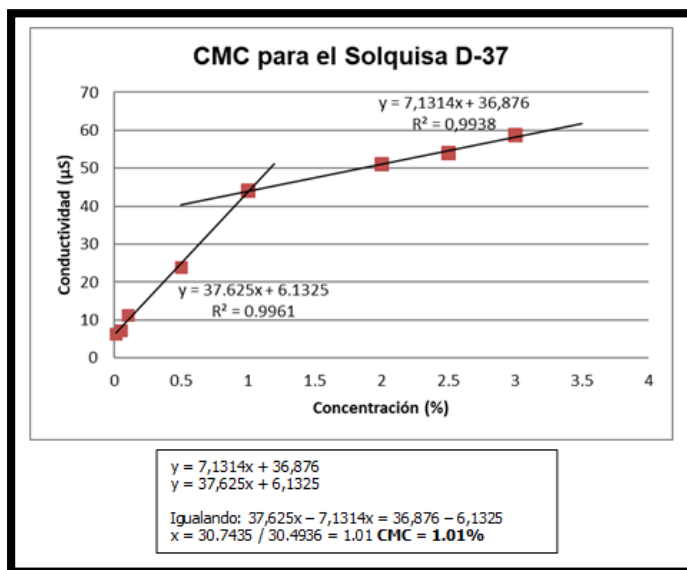


Fig. 9: Representación gráfica de la conductividad de las disoluciones de Solquisa D-37 vs C.

Las curvas correspondientes a las medidas de conductividad se presentan en la figura 9 y 10. Habitualmente se determinan las pendientes de las rectas correspondientes a la zona pre y post micelar mediante un ajuste de mínimos cuadrados de los puntos obtenidos; obteniéndose la concentración micelar crítica, CMC, a partir del punto de corte de dichas rectas (Williams *et al.*, 1955). La determinación de la CMC por este método depende en gran medida de la amplitud del intervalo de concentraciones en el que se lleva a cabo el cambio de comportamiento de la conductividad con la concentración de surfactante.

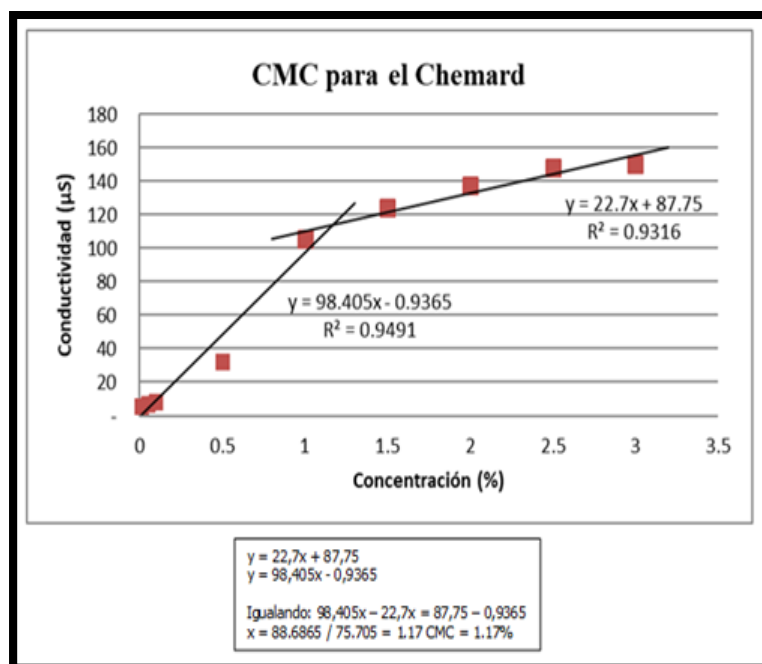


Fig. 10: Representación gráfica de la conductividad de las disoluciones del Chemard vs C.

Como se aprecia en las figuras 9 y 10 según bibliografía para estos tipos de tensoactivos (Domínguez *et al.*, 1997), se espera que aumente la conductividad eléctrica de la solución a medida que vaya aumentando la concentración. En dichas figuras se observaron cambios en la tendencia de la curva aproximadamente a 1.01% para el Solquisa D-37 y 1.17 % para el Chemard que corresponden a la CMC de estos surfactantes.

Mediante la comparación estadística de ambos métodos se obtuvieron los resultados que a continuación se presentan en la tabla 2.

En la tabla 2 se observó que en los dos tensoactivos evaluados, los valores obtenidos de concentración por ambos métodos fueron muy similares, tanto para la medida de tensión superficial como para la medida de conductividad, para el caso del Solquisa $|t_{exp}| = 1.23 < t_{teo} = 4.30$ y en el caso de Chemard $|t_{exp}| = 0.35 < t_{teo} = 4.30$, entonces se acepta la H_0 por lo tanto no hay diferencias significativas entre las dos medias para un nivel de confianza de 95 % (Miller & Miller, 2010).

Al no haber diferencias significativas entre ambos métodos podemos concluir que el método de la conductividad para los tensoactivos evaluados fue más efectivo ya que para el cálculo de la CMC en los gráficos presentados (figura 9 y 10), se aprecia mejor el cambio de las pendientes y el equipo de medición es más sencillo de manipular que un tensiómetro.

Tabla 2: Resultados estadísticos obtenidos para ambos métodos con diferentes tensoactivos.

Tensoactivo	Solquisa		Chemard	
	1-Tensión	2- Conductividad	1-Tensión	2-Conductividad
Método				
CMC1 (%)	1.02	1.00	1.15	1.15
CMC2 (%)	1.01	1.01	1.1	1.17
CMC3 (%)	1.04	1.03	1.12	1.18
Promedio \bar{x}	1.02	1.01	1.12	1.17
Tamaño muestral	3	3	3	3
Desviación estándar (S)	0.0153	0.0153	0.0252	0.0153
Desviación estándar cuadrado (S ²)	0.00023	0.00023	0.00063	0.00023
Grados de libertad, n	2	2	2	2
Grados de libertad total, n	2		2	
Desviación estándar cuadrado (S ²)	0.0006		0.0014	
Desviación estándar (S)	0.0242		0.0372	
t _{teor}	4.30		4.30	
t _{exp}	1.23		-0.35	

CONCLUSIONES

A partir de los datos obtenidos para los dos surfactantes utilizados en los dos métodos empleados en la investigación se concluye que:

1. Los resultados obtenidos de concentración micelar crítica (CMC) para el Solquisa D-37 fueron 1.02 % y 1.01 % y para el Chemard los resultados se obtuvieron de 1.12 % y 1.17 % por el método de tensión superficial y de conductividad respectivamente.
2. Se comprobó estadísticamente para los tensoactivos evaluados que no presentaron diferencias significativas entre las dos medias para un nivel de confianza de 95 %.
3. El método de la conductividad para los tensoactivos evaluados fue más efectivo ya que se aprecia mejor el cambio de las pendientes en las gráficas al calcular la CMC y el equipo de medición es más sencillo de manipular que un tensiómetro.

REFERENCIAS

- Bryant, R.S. (1987). Potential uses of microorganisms in petroleum recovery technology. *Proc. Okla. Acad. Sci.*, 67, 97-104.
- Chevalier, Y. & Zemb, T. (1990). The structure of micelles and microemulsions. *Rep. Prog. Phys.*, 53, 279-371.
- Du Noüy, P.L. (1919). A new apparatus for measuring surface tension. *J. Gen. Physiol.*, 1, 521-524.
- Domínguez, A., Fernández, A., González, N., Iglesias, E. & Montenegro, L.J. (1997). Determination of Critical Micelle Concentration of Some Surfactants by Three Techniques. *J. Chem. Educ.*, 74(10), 1227.
- García, M.T., Ribosa, I., Perez, L., Manresa, A. & Comelles, F. (2013). Aggregation Behavior and Antimicrobial Activity of Ester-Functionalized Imidazolium- and Pyridinium-Based Ionic Liquids in Aqueous Solution. *Langmuir*, 29(8), 2536-2545.
- Gautam, K.K. & Tyagi, V.K. (2006). Microbial surfactants: A review. *J. Oleo Sci.*, 55(4), 155-166.

- Goodchild, I., Collier, L., Millar, S.L., Prokes, I., Lord, J.C.D., Butts, C.P.B. *et al.* (2007). Structural studies of the phase, aggregation and surface behaviour of 1-alkyl-3-methylimidazolium halide + water mixtures. *J. Colloid Interface Sci.*, 307, 455-468.
- Harkins, W.D. Jordan H.F. (1930). A method for determination of surface and interfacial tension from the maximum pull on a ring. *J. Am. Soc.*, 52, 1751-1772.
- Holmberg, K., Jönsson, B., Kronberg, B. & Lindman, B. (2003). *Surfactants and polymers in aqueous solution*. Wiley. Inglaterra.
- Jiménez-Islas, D., Medina-Moreno, S. & Gracida-Rodríguez, J. (2010). Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 26 (1), 65-84.
- López, C.A. (2017). *Líquidos iónicos surfactantes. Comportamiento liotrópico e Interacción con polímeros*. Tesis de doctorado. Departamento de ciencias y técnicas fisicoquímicas. Facultad de ciencias. UNED. http://espacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:Ciencias-Calopez/LOPEZ_USMA_CesarAugusto_Tesis.pdf
- Martínez Martín, E., Piedra Díaz, M.V. & Olmo Velázquez (2015). Empleo de emulsiones con soluciones de tensoactivo para el transporte de sustancias de elevada viscosidad. *Revista Cubana de Ingeniería*, VI (1), 51-56.
- McBain, J.W. (1913). General discussion on colloids and their viscosity. *Trans. Far. Soc.*, 9, 99-101.
- Miller, J.N. & Miller, J.C. (2010). *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*. Sixth Edition-Prentice Hall (UK).
- Myers D. (2006). *Surfactant science and technology*. ISBN 9780471680246, John Wiley & Sons, Inc.
- Novelo-Torres, A. M. & Gracia-Fadrique, J. (2005). Concentración micelar crítica mediante la ecuación de adsorción de Gibbs. *Educación Química*, 16 (1), 63-67.
- Perfumo, A., Banat, I.M., Canganella, F. & Marchant, R. (2006). Rhamnolipid production by a novel thermophilic hydrocarbon-degrading *Pseudomonas aeruginosa* AP02-1. *Appl. Microbiol. Biot.* 72, 132-138.
- Raiger-Lustman, L. & López, N. (2009). Los biosurfactantes y la industria petrolera. *Revista Química Viva*, 8(3), 146-161.
- Rodríguez Tarragó, H.L., Falcón Hernández, J., Hernández Pedrera, C. & Campos-Sofía, M. (2013). Estabilidad de emulsiones acuosas de petróleo crudo pesado con agente emulsionante de productos de pirólisis. *Revista Tecnología Química*, 33 (3), 253-263.
- Salager, J.L. (2002). Surfactantes tipos y usos. Cuaderno FIRP 300. <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/06/S300A.pdf>
- Sandoval-Ibarra, F., López-Cervantes, J. & Garcia-Fadrique, J. (2005). Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. *Educación Química*, 26 (4), 307-313.
- Stoyanov, S.D., Rehage, H., Paunov, V.N. (2003). Novel surface tension isotherm for surfactants based on local density functional theory. *Phys. Rev. Lett.* 91 (8), 086102.
- Tadros, Th.F. (2005). *Applied Surfactant: Principles and Applications*. Wiley VCH.

Williams R.J., Phillips, J.N. & Mysels, K.J. (1955). The critical micelle concentration of sodium lauryl sulphate at 25° C. *Trans. Faraday Soc.*, 51, 728-737.

Zana, R. (2005). Dynamics of Surfactant Self-Assemblies. Micelles, Microemulsions, Vesicles and Lyotropic Phases. ISBN 9780367393120, CRC Press. Boca Raton.

Zaragoza, A. (2012). *Propiedades bioquímicas de tensioactivos biológicos de origen bacteriano*. Tesis de doctorado. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular (A), Universidad de Murcia. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/29557>

