

Síntesis directa de un nuevo tensoactivo tipo Gemini basado en polidimetilsiloxano

One-step synthesis of a novel polydimethylsiloxane-based Gemini surfactant

Vanessa Martínez-Cornejo ^a, Salvador López Morales ^b, Gerardo Cedillo Valverde ^b

^aDepartamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.
^bInstituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México

Resumen

La recuperación mejorada de petróleo (EOR) en yacimientos no convencionales requiere el desarrollo de tensoactivos con alta estabilidad térmica y química en condiciones extremas. En este trabajo se reporta la síntesis de un novedoso tensoactivo tipo Gemini a base de polidimetilsiloxano (PDMS) con un rendimiento del 60%. La síntesis se realizó en un solo paso sin catalizador metálico, ofreciendo una ruta simplificada frente a métodos convencionales, a partir de PDMS con grupos terminales diglicidil éter (PDMS-DGE) y 1-octanol. La estructura fue confirmada mediante Resonancia Magnética Nuclear de protón (¹H-RMN) y espectroscopía infrarroja (FT-IR). Las propiedades superficiales, evaluadas por el método de ángulo de contacto sésil, determinaron una Concentración Micelar Crítica (CMC) de 0.88 mM. Este valor indica una alta eficiencia o rendimiento en la formación de micelas y en la reducción de la tensión interfacial utilizando bajas concentraciones del tensoactivo.

PALABRAS CLAVE: Tensoactivos Gemini, polidimetilsiloxano, CMC, EOR

Abstract

Enhanced Oil Recovery (EOR) in unconventional reservoirs requires the development of surfactants with high thermal and chemical stability under extreme conditions. This work reports the synthesis of a novel polydimethylsiloxane (PDMS)-based Gemini surfactant with a 60% yield. The synthesis was carried out in a single step without a metallic catalyst, offering a simplified route compared to conventional methods, using PDMS with diglycidyl ether terminal groups (PDMS-DGE) and 1-octanol as precursors. The structure was confirmed by proton Nuclear Magnetic Resonance (¹H-NMR) and Infrared Spectroscopy (FT-IR). Surface properties, evaluated by the sessile drop contact angle method, determined a Critical Micelle Concentration (CMC) of 0.88 mM. This value indicates high efficiency in micelle formation and interfacial tension reduction using low surfactant concentrations.

Keywords: Gemini surfactant, polydimethylsiloxane, CMC, EOR

1. Introducción

El petróleo se mantiene como la fuente primaria para la producción energética global. En la industria de hidrocarburos, su recuperación se gestiona a través de tres etapas críticas: primaria, secundaria y terciaria. La recuperación primaria utiliza la presión natural del yacimiento y bombeo mecánico, logrando extraer apenas el 30% del crudo. Al declinar la presión, se emplea la recuperación secundaria mediante la inyección de agua o gas, elevando el factor de recobro hasta el 62.5%. Finalmente, se recurre a la recuperación terciaria o mejorada (EOR), una fase técnica diseñada para movilizar el crudo residual que los métodos

convencionales no pueden extraer (Kamal, 2015; Raupov I. et al., 2025).

Las técnicas de EOR (térmicas, de inyección de gas y químicas) enfrentan limitaciones significativas, como altos costos operativos y baja eficiencia en la movilización de glóbulos de crudo atrapados en los poros de la roca. El objetivo del EOR químico es reducir la tensión interfacial del sistema agua-petróleo mediante tensoactivos. No obstante, las formulaciones convencionales suelen degradarse bajo las altas temperaturas del yacimiento o precipitar ante la presencia de cationes divalentes (Hassan et al., 2021). Por ello, un tensoactivo ideal para EOR debe poseer una baja tensión interfacial, alta estabilidad térmica y resistencia química.

*Autor para la correspondencia: vanessa_ma@tese.edu.mx

Correo electrónico: slm@iim.unam.mx (Salvador López Morales), gcedillo@materiales.unam.mx (Gerardo Cedillo Valverde)

Por lo tanto, un tensoactivo ideal para EOR debe generar una baja tensión interfacial entre las mezclas de agua-aceite y alta estabilidad térmica-química. Los tensoactivos Gemini han llamado la atención para su aplicación en EOR por sus propiedades únicas, por ejemplo, su baja concentración micelar crítica (CMC), también, reducen con mayor eficiencia la tensión interfacial entre aceite y agua que los tensoactivos convencionales (Guerrero-Hernández et al, 2022).

Los tensoactivos Gemini han surgido como una alternativa superior en los procesos EOR, debido a su estructura única: dos cadenas hidrofílicas y dos hidrofóbicas enlazadas por un espaciador (Alcalde, 2008). Comparados con los tensoactivos convencionales, presentan una CMC mucho más baja y una mayor eficiencia en la reducción de la tensión interfacial (Guerrero-Hernández et al., 2022). Los espaciadores comunes incluyen oligómeros de estireno o glicoles; sin embargo, el uso de polidimetilsiloxano (PDMS) como espaciador destaca por su flexibilidad estructural (enlaces Si-O-Si), alta estabilidad térmica y excelente capacidad de humectación (Hill, 2002; Chung et al., 2009).

A pesar de sus ventajas, la aplicación industrial de los tensoactivos Gemini basados en silicio enfrenta obstáculos. El PDMS puro es solo parcialmente soluble y puede inhibir catalizadores en el tratamiento posterior del crudo (Alzahid, 2018). Intentos previos para modificar su estructura han dependido de la hidroxilación con catalizadores de platino (Ni et al., 2009; Liang Z. et al., 2024) o procesos de síntesis multietapa que requieren purificaciones intermedias, lo que incrementa drásticamente los costos y tiempos de producción, limitando su escalabilidad (Lin et al., 2011). De esta manera, se hace necesario mejorar los métodos de síntesis de tensoactivos tipo Gemini.

Para superar estas limitaciones, este trabajo propone el uso de PDMS con grupos terminales diglicidil éter (PDMS-DGE). La ventaja crítica de este precursor es que permite la funcionalización directa mediante la reacción de apertura de anillo de los grupos epóxidos al reaccionar con alcoholes (u otros nucleófilos). Este mecanismo permite la formación del tensoactivo en una sola etapa, eliminando la necesidad de catalizadores metálicos y simplificando el proceso de síntesis.

Este trabajo reporta la síntesis en un solo paso, sin catalizador metálico, de un tensoactivo Gemini basado en PDMS-DGE y 1-octanol. La estructura fue caracterizada mediante Espectroscopía Infrarroja (FTIR) y Resonancia Magnética Nuclear (^1H -RMN), confirmando la exitosa apertura del anillo y la formación de la estructura Gemini. Finalmente, se evaluó su humectabilidad (método de gota sésil) y su CMC con la finalidad de validar su potencial para su probable uso en EOR.

2. Materiales y Método

2.1 Materiales

El poli(dimetilsiloxano) diglicidil éter (PDMS-DGE), el hexano y el 1-octanol fueron adquiridos en Sigma-Aldrich. Los dos primeros se utilizaron tal como se recibieron,

mientras que el 1-octanol fue destilado a presión reducida previo a su uso.

2.2 Síntesis

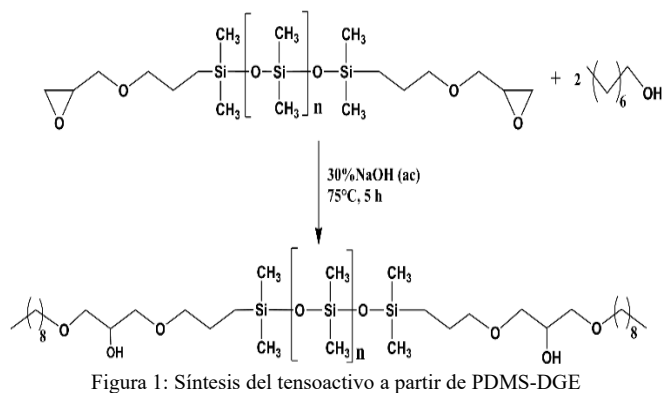
La síntesis del tensoactivo tipo Gemini a partir de PDMS-DGE (Figura 1) y 1-octanol se llevó a cabo en un matraz de fondo redondo equipado con agitación magnética, refrigerante y termómetro. Se añadieron 10 g de PDMS-DGE y 8 mL de 1-octanol; posteriormente, el sistema se purgó con nitrógeno durante 5 minutos. La reacción se realizó en un baño de aceite a 75 °C durante 5 horas, manteniendo una agitación constante de 400 rpm. Una vez finalizado el tiempo de reacción, la mezcla se extrajo con hexano (2 x 50 mL) para eliminar el alcohol residual. El producto obtenido se secó a presión reducida y, finalmente, se mantuvo en estufa a 80 °C durante 6 horas para asegurar la eliminación de disolventes.

2.3 Caracterización

La estructura química de los tensoactivos Gemini sintetizados se confirmó mediante FT-IR y ^1H -RMN. Los espectros FT-IR se registraron en un intervalo de 4000 a 400 cm^{-1} utilizando un espectrómetro Nicolet iS50, equipado con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) con cristal de diamante y un promedio de 100 escaneos por muestra. El espectro de ^1H -RMN se obtuvieron en un espectrómetro Bruker Avance III HD de 400 MHz a temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$). La muestra se disolvió en CDCl_3 y los desplazamientos químicos (δ) se reportan en partes por millón (ppm) utilizando tetrametilsilano (TMS) como estándar interno.

2.4 Medición del ángulo de contacto

Las propiedades superficiales del tensoactivo se determinaron mediante la técnica de la gota sésil en un goniómetro Krüss modelo DSA100L. Se preparó una serie de soluciones de diversas concentraciones utilizando agua destilada (resistividad $\sim 1.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$). Antes de cada medición, los sustratos (portaobjetos de vidrio y teflón) se limpiaron con etanol y se secaron con aire comprimido libre de partículas. Se depositó una gota de 2 μL sobre cada superficie, permitiendo un tiempo de estabilización de 30 segundos antes de la captura de la imagen. El cálculo del ángulo se realizó mediante el método de ajuste de Young-Laplace. Todas las mediciones se realizaron por quintuplicado para garantizar la reproducibilidad.



3. Resultados

La síntesis del tensoactivo Gemini se llevó a cabo a través de una reacción de apertura de anillo del PDMS-DGE. En este proceso, el NaOH facilitó la formación del nucleófilo a partir de 1-octanol, el cual atacó los grupos epóxido para dar lugar a la estructura final. El rendimiento obtenido del 60% se considera moderado pero aceptable para esta ruta, ya que la naturaleza hidrofóbica del siloxano y la viscosidad del polímero limitan la transferencia de masa y favorecen impedimentos estéricos que dificultan una conversión total. Asimismo, este valor refleja una purificación rigurosa mediante extracción con hexano, técnica esencial para eliminar precursores remanentes y garantizar que las propiedades anfífilas del producto final no se vean alteradas por impurezas, obteniendo así una estructura equilibrada con grupos hidroxilo y cadenas alquílicas sobre el esqueleto de silicona.

3.1 Espectroscopía infrarroja

El análisis por FT-IR (Figura 2) confirmó la transformación química mediante la atenuación de la banda en 915 cm^{-1} , propia del anillo oxirano, y la persistencia de las señales del siloxano (Si-CH_3 en 1253 cm^{-1} y Si-O-Si en $1080\text{--}1014\text{ cm}^{-1}$). La incorporación de las cadenas del alcohol se ratifica por la presencia de tensiones C-H diferenciadas: una señal en 2961 cm^{-1} correspondiente a los grupos CH_3 y bandas intensas entre $2920\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ asignadas a los grupos $-\text{CH}_2-$ de la cadena alquílica. Finalmente, la banda ancha en $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ (O-H) valida la formación del producto.

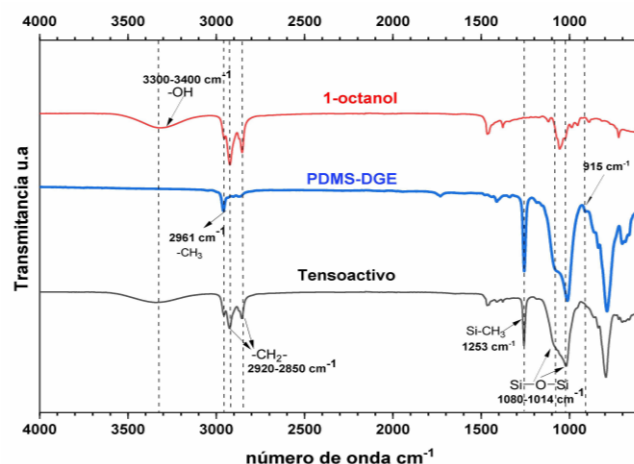


Figura 2: Espectro de IR-FT de, 1-octanol, PDMS-DGE, (reactivos) arriba y en medio, tensoactivo (producto) abajo

3.2 Espectroscopía de ^1H -RMN

El espectro de ^1H -RMN del tensoactivo (Figura 4), registrado en CDCl_3 , confirmó la estructura propuesta y el éxito de la funcionalización. El desplazamiento más intenso, ubicado en el rango de $0.00\text{--}0.16\text{ ppm}$, se asignó a los protones de los grupos metilo del enlace Si-CH_3 (a), mientras que la señal en 0.516 ppm correspondió a los grupos $-\text{CH}_2-$ (b) adyacentes al silicio en el PDMS. La incorporación de las cadenas de 1-octanol se evidenció mediante los desplazamientos en 0.889 ppm (k) y 1.264 ppm (j), asignados a los protones de los grupos metilo terminales ($-\text{CH}_3$) y a los metilenos ($-\text{CH}_2-$) de la cadena alquílica, respectivamente.

Asimismo, la formación del nuevo enlace se confirmó por la aparición de señales entre 3.674 ppm (h, i), atribuidas a los protones de los metilenos ($\text{CH}_2\text{-O}$), y una señal en 3.869 ppm correspondiente al protón metino y al grupo hidroxilo ($-\text{OH}$) del nuevo centro hidroxilado (f, g). Finalmente, la ausencia de señales en 2.55 y 3.15 ppm (figura 3), descritas en la literatura para los protones del grupo oxirano ($-\text{CH}_2-$ y $-\text{CH}-$ del epóxido), demuestra la apertura total del anillo del precursor PDMS-DGE (Arcos-Casarrubias et al., 2022; Yang et al., 2025).

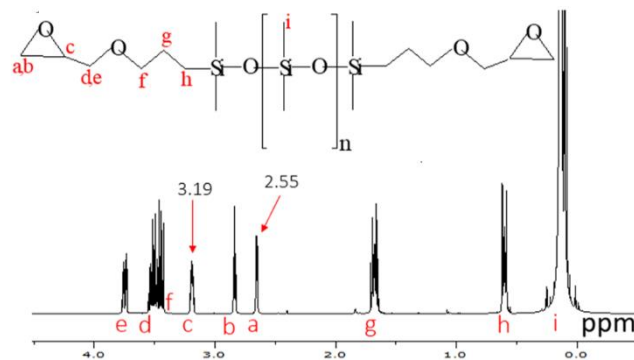


Figura 3: Espectro de ^1H -RMN de PDMS-DGE tomado de Viscoelastic behavior and toughness of the DGEBA epoxy resin with 1,2-diaminocyclohexane: effect of functionalized poly(dimethylsiloxane), diglycidyl ether, PDMS-DGE, pre-reacted with 1,2-diaminocyclohexane, por Arcos-Casarrubias et al., (2022) Polymer Bulletin 79, 2871–2901. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03607-y>

Los resultados recopilados en la Tabla 1 muestran que el ángulo de contacto del H₂O pura, tanto en vidrio como en teflón, es superior al de las disoluciones de tensoactivo. Se observa una relación inversamente proporcional entre la concentración del tensoactivo y el ángulo de contacto: a medida que aumenta la concentración, el ángulo disminuye progresivamente. Este fenómeno se atribuye a la adsorción de las moléculas del tensoactivo Gemini en la interfase líquido-sólido y líquido-aire, reduciendo la tensión superficial de la solución y facilitando el mojado de las superficies, incluso en aquellas de carácter hidrofóbico como el teflón.

Tabla 1: Ángulos de contacto a diferentes concentraciones del tensoactivo

Concentración mM	Vidrio (°)	Teflón (°)
10	28.5	132.7
9	27.8	132.5
7	28.1	132.8
5	29.1	132.6
3	30.3	132.5
2	30.4	132.7
1	31.9	133.0
0.5	34.4	134.0
0.25	36.6	135.7
0.1	41.4	136.9
0.05	53.5	141.9
H ₂ O	56.5	142.5

4. Discusión

4.1 Síntesis

Aunque ambas técnicas son complementarias, la ¹H-RMN resulta más concluyente que el FT-IR para garantizar la ausencia de reactivos residuales y la pureza del tensoactivo. Mientras que el FT-IR es una herramienta cualitativa excepcional para identificar la aparición de grupos funcionales (como la banda O-H de la apertura del anillo), presenta limitaciones debido al solapamiento de bandas; por ejemplo, las señales de los grupos CH₂ y CH₃ del reactivo PDMS-DGE y del producto son prácticamente indistinguibles en el espectro infrarrojo. Además, la banda de 915 cm⁻¹ del anillo oxirano tiene un coeficiente de absorción molar que puede dificultar la detección de trazas mínimas de epóxido remanente, dando una falsa sensación de conversión total. Por el contrario, la ¹H-RMN ofrece una resolución superior al permitir el seguimiento de protones específicos en entornos químicos únicos.

La desaparición de los desplazamientos en 2.55 y 3.15 ppm es una prueba inequívoca de la apertura del epóxido, ya que estos protones se encuentran en una región del espectro libre de interferencias por parte del esqueleto de siloxano. Además, no se encontró en el espectro de ¹H-RMN, la señal en 2.4 ppm correspondiente al -OH del 1-octanol sin reaccionar, por lo cual se puede considerar que la purificación con hexano fue exitosa.

4.2 Ángulo de contacto

En términos de desempeño, los resultados confirman la teoría de que cadenas hidrofóbicas más largas favorecen una disminución del ángulo de contacto, aumentando así la humectabilidad del sistema (Li et al., 2013). Como se observa en la Tabla 1 y las Figuras 6 y 7, el ángulo de contacto es significativamente menor al del agua pura y decrece progresivamente con el aumento de la concentración, demostrando una excelente capacidad de humectabilidad.

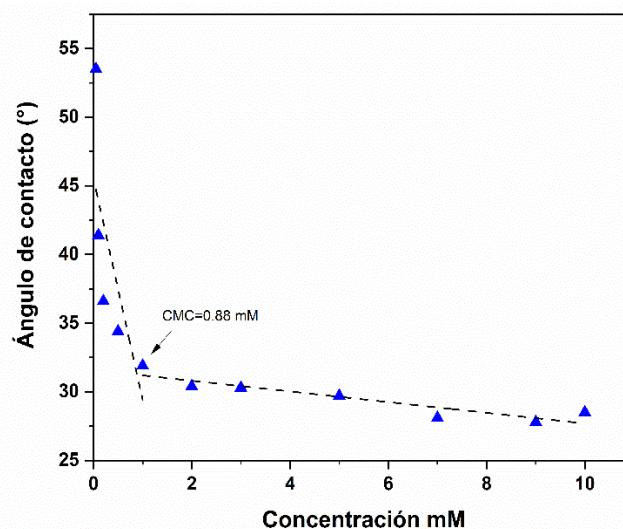


Figura 6: Ángulo de contacto a diferentes concentraciones del tensoactivo en vidrio.

Este descenso del ángulo de contacto no es infinito; al superar un umbral específico, el valor se estabiliza, señalando la saturación de la interfase y el inicio de la formación de micelas. Siguiendo el método reportado de Alkawareek et al. (2018), se determinó mediante la intersección de regresiones lineales que la Concentración Micelar Crítica (CMC) del PDMS-DGE-C8 es de 0.88 mM.

La determinación de la CMC se realizó mediante el método de intersección de regresiones lineales debido a su capacidad para delimitar con precisión la transición entre el régimen de adsorción interfacial y el inicio de la agregación molecular. Este enfoque matemático compensa las fluctuaciones experimentales y define el umbral de saturación de la superficie de manera estadística, permitiendo una comparación objetiva con los valores reportados en la literatura para sistemas basados en siloxanos.

Al contrastar este valor con la literatura (Tabla 2), se observa que se posiciona de manera lógica entre los homólogos de 6 y 12 carbonos, validando que la hidrofobicidad del sistema es predecible: a mayor longitud de cadena alquílica, menor es la energía libre necesaria para la micelización.

Notablemente, el PDMS-DGE-C8 muestra una CMC menor que tensoactivos convencionales como el CTACB (0.92 mM) y el Gemini dicatiónico de Kamal (1.01 mM). Esta capacidad de formar micelas a concentraciones bajas es fundamental para la EOR. Una CMC baja y alta humectabilidad, no solo optimiza los costos operativos con

menor dosificación, sino que garantiza una mayor eficiencia para movilizar crudo atrapa en los poros de yacimientos (Belhaj A. F. et al, 2019).

Tabla 2: Comparación de valores de CMC

Tensoactivo	CMC (mM)	Referencia
PDMS-C6-Gemini	1.57	Li et al., 2013
PDMS-C12-Gemini	0.061	Li et al 2013
PDMS-DGE-C8	0.88	Este trabajo
CTACB	0.92	Alkawareek et al., 2018
$C_6H_{12}(C_{12}H_{25}N^+Me_2Br)_2$	1.01	Kamal, 2015

Si bien la CMC obtenida es prometedora para EOR, la aplicabilidad real en yacimientos requiere considerar factores de estrés químico y físico. Por lo cual, aunque la estructura de siloxano sugiere una buena resistencia, es necesario realizar estudios de estabilidad térmica a temperaturas superiores a 80°C y evaluar la tolerancia a la salinidad, específicamente ante iones divalentes como Ca^{2+} y Mg^{2+} . Estos análisis constituyen el trabajo futuro necesario para validar el uso de este tensoactivo en entornos de alta salinidad y temperatura, donde la precipitación o degradación térmica suelen limitar el uso de tensoactivo convencionales.

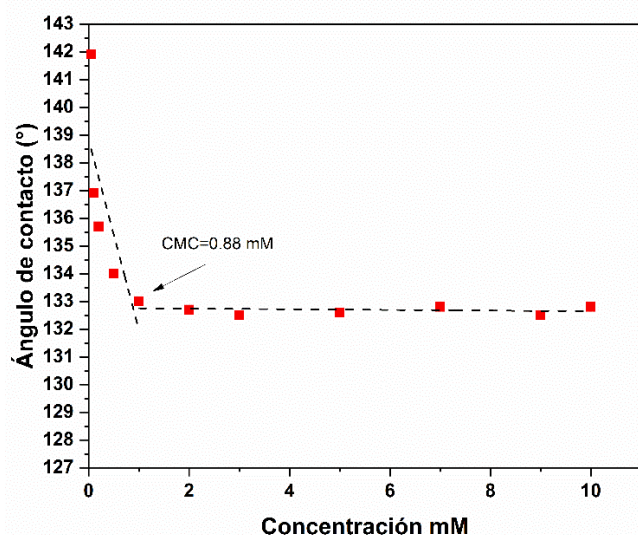


Figura 7: Ángulo de contacto a diferentes concentraciones del tensoactivo en teflón.

Conclusiones

La presente investigación logró la síntesis exitosa de un tensoactivo Gemini no iónico basado en polidimetilsiloxano (PDMS) mediante la apertura nucleofílica de grupos diglicidil éter con 1-octanol en un solo paso y libre de catalizadores metálicos. Sin embargo, un punto a mejorar es el rendimiento moderado de 60% de la reacción, se sugiere optimizar el tiempo de reacción, teniendo especial cuidado en el control de temperatura, para evitar reacciones secundarias. Las reacciones secundarias en este estudio fueron prevenidas exitosamente obteniendo un producto de alta pureza, mediante

un monitoreo constante de la temperatura durante 5 horas y una purificación adecuada.

El tensoactivo sintetizado tiene una alta humectabilidad y una CMC de 0.88 mM, valor comparable a análogos reportados.

No obstante, para consolidar su implementación en condiciones reales de un yacimiento, es imperativo que los trabajos futuros se enfoquen en evaluar su estabilidad térmica y química, sus propiedades reológicas y su eficiencia en desplazamientos de crudo en medios porosos.

En conjunto, este trabajo establece una base sólida para el diseño de tensoactivos Gemini a base de PDMS, de alto desempeño y bajo requerimiento de dosificación para la industria energética

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México el apoyo financiero otorgado para la realización de este proyecto, a través de la convocatoria “Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2025”.

Los autores agradecen a la Dra. Perla Yolanda Castillo Villalón por facilitar el uso del espectrómetro de FT-IR.

Al Dr. Alfredo Cruz Rosado por su valioso apoyo en la revisión de este artículo.

Referencias

- Alzahid, Y. A. I., Mostaghimi, P., Gerami, A., Singh, A., Privat, K., Amirian T., Armstrong, R. T. (2018) Physio-Chemical Analysis of Amide and Amine. Scientific Reports, 8, 15518 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33495-8>.
- Alcalde, M. A., Jover, A., Meijide, F., Galantini, L., Pavel, N. V., Antelo, A., Tato, J. V. (2008) Synthesis and characterization of a new gemini surfactant derived from 3 α ,12 α -dihydroxy-5- β -cholan-24-amine (steroid residue) and ethylenedi-amintetraacetic acid (spacer), Langmuir 24 6060–6066.
- Alkawareek, M. Y., Akkelah, B. M., Mansour, S. M., Amro, H. M., Abulatefeh, S. R., Alkilany, A. M. (2018) Simple Experiment to Determine Surfactant Critical Micelle Concentrations Using Contact-Angle Measurements, J. Chem. Educ., 95(12) 2227–2232. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00276>
- Ang, A. W., Jiang, L., Mao, G., Liu, Y. (2002) Direct force measurement of silicone- and hydrocarbon-based ABA triblock surfactants in alcoholic media by atomic force microscopy, J. Colloid Interface Sci. 256, 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.09.032>
- Arcos-Casarrubias, J. A., Vázquez-Torres, H., Granados-Olvera, J. A., Cedeño, J. A., Cervantes-Uc, J. M. (2022) Viscoelastic behavior and toughness of the DGEBA epoxy resin with 1,2-diaminocyclohexane: effect of functionalized poly(dimethylsiloxane), diglycidyl ether, PDMS-DGE, pre-reacted with 1,2-diaminocyclohexane, Polymer Bulletin 79, 2871–2901. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03607-y>
- Belhaj, A. F., Elraies, K. A., Alnarabiji, M. S., Shuhli, J. A. B. M., Mahmood, S. M., Ern, L. W. (2019). Experimental Investigation of Surfactant Partitioning in Pre-CMC and Post-CMC Regimes for Enhanced Oil Recovery Application. Energies, 12(12), 2319. <https://doi.org/10.3390/en12122319>
- Chung, D. W., Lim, J. C., (2009) Study on the effect of structure of polydimethylsiloxane grafted with polyethyleneoxide on surface activities, Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects 336, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.11.020>
- Guerrero-Hernández, L., Meléndez-Ortiz, H. I., Cortez-Mazatan, G. Y., Vaillant-Sánchez, S., Peralta-Rodríguez, R. D. (2022) Gemini and Bicephalous Surfactants: A Review on Their Synthesis, Micelle

- Formation, and Uses. *Int. J. Mol. Sci.* 23, 1798. <https://doi.org/10.3390/ijms23031798>
- Hassan, A., Jumbri, K., Ramli, A., Borhan, N. (2021) Poly(dimethylsiloxane)-Modified Defoamer for Efficient Oil–Water Separation, *ACS Omega*, 6, 14806-1418. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00350>
- Hernandez, J.D., Gama G. (2024), Synergy between surfactants' stiffness and concentration on their self-assembly into reverse micelles as water droplet carriers in nonpolar solvents, *PLoS ONE* 19(2): e0294913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294913>
- Hill, R.M., (2002), Silicone surfactants new development, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 7, 255–261. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(02\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(02)00068-7)
- Kamal, M. S. A (2015), Review of Gemini Surfactants: Potential Application in Enhanced Oil Recovery, *J Surfact Deterg.*, 19 (2), 223-236. <https://doi.org/10.1007/s11743-015-1776-5>
- Liang, Z., Peng, J., Xu, Y., Wang, H., (2024) Synthesis and properties of carboxyl-modified polyether block silicone surfactants. *Polym. Bull.* 81, 17253–17264. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05518-0>
- Lin, L., Chee-Chan, W., Keng-Ming, C., Po-Chang, L. (2011) Synthesis and physicochemical properties of nonionic Gemini surfactants with a sulfonate spacer. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 386, 65–70 <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.06.031>
- Lin, L., Chee-Chan, W., Keng-Ming, C., Po-Chang L. (2013) Synthesis and physicochemical properties of silicon-based gemini surfactants, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 436, 881-889. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.06.031>
- Ni, X., Yuan, G. M., Chen, S. L., Cheng, Y. (2009) Synthesis and compounding of polyether modified polysiloxane crude oil defoamer. *Oilfield Chem.*, 26, 153–157.
- Raupov, I., Rogachev, M., Shevaldin, E. (2025). Review of Formation Mechanisms, Localization Methods, and Enhanced Oil Recovery Technologies for Residual Oil in Terrigenous Reservoirs. *Energies*, 18(21), 5649. <https://doi.org/10.3390/en18215649>
- Stevens, C.V., Merigg, A., Eristeropoulou, M., Christov, P.P., Booten, K., Levecke, B., Vandamme, A., Pittevels, N., Tadros, T.F. (2001) Polymeric surfactants based on inulin, apolysaccharide extracted from chicory. 1. Synthesis and interfacial properties, *Biomacromolecules* 2, 1256–1259.
- Pérez, L., Pinazo, A., Pons, R., Infante, M-R. (2014) Gemini surfactants from natural amino acids, *Advances in Colloid and Interface Science*, 205, 134-155. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.10.020>
- Yang, Z., Xuan, W., Yixiao, S., Dan, L., Jiaen Q., Chuan, W., Hong, D., Qinghua, P., Zhirong, Q., and Yanjiang S. (2025) Epoxy-Functionalized Polysiloxane and DOPO Synergistically Enhance Flame Retardancy of Epoxy Resin Composites, *ACS Applied Polymer Materials* 7 (8) 5198-5211 <https://doi.org/10.1021/acsapm.5c00531>

↑