

PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y TÉRMICAS DE MEMBRANA HÍBRIDAS PREPARADAS POR EL MÉTODO SOL-GEL

Yamile Pérez-Padilla^{1*}, David Muñoz Rodríguez¹, Manuel de Jesús Aguilar-Vega², Rita del Rosario Sulub-Sulub², Ana Maribel Dzul Cocom¹

¹Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Periférico Norte Kilómetro 33.5. Tablaje Catastral 13615. Chuburná de Hidalgo Inn. Mérida, Yucatán, C.P. 97302.

²Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 No. 130 por 32 y 34, Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México.

Fecha de recepción: 29 de octubre de 2021 - Fecha de aceptación: 26 de enero de 2022

Resumen

El método sol-gel es ampliamente utilizado para la obtención de materiales híbridos, ya que permite un mejor control de los parámetros y fenómenos presentes en el proceso de síntesis, haciendo posible la obtención de materiales con diferentes propiedades. Las técnicas de caracterización son empleadas para conocer propiedades de los materiales sintetizados. En este trabajo se utilizó la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la cual brinda información relacionada con la conformación molecular, características estructurales, particularmente los grupos funcionales presentes en el material; y el análisis termogravimétrico (TGA) basado en medir a través de un perfil de temperatura predeterminado la estabilidad térmica de la muestra. Las técnicas mencionadas se han aplicado a materiales híbridos (PDMS-CN y PDMS-APTÉS) sintetizados por sol-gel a partir de polidimetilsiloxano (PDMS-OH) y agentes alcoxisilados: cianopropiltrietoxisilano (CN) y aminopropiltrietoxisilano (APTÉS). El análisis estructural demostró que la síntesis sol-gel se llevó a cabo de manera adecuada, mostró para los 2 materiales la banda atribuida al enlace Si-OH a 850 cm^{-1} , para la membrana PDMS-APTÉS las bandas correspondientes a las aminos se detectaron a 1562 y 1677 cm^{-1} y para la membrana PDMS-CN la banda correspondiente al grupo CN se detectó a 2250 cm^{-1} . La estabilidad térmica para la membrana PDMS-APTÉS, presentó una pérdida continua a partir de 220 °C a 800 °C y en el termograma de la membrana PDMS-CN se observó estabilidad hasta 384 °C con un remanente de 10% de masa a 800 °C .

Palabras clave: Síntesis; Sol-gel; Membranas; Caracterización; Agentes alcoxisilados; Polímeros Híbridos.

PHYSICOCHEMICAL AND THERMAL PROPERTIES OF HYBRID MEMBRANES PREPARED BY SOL-GEL TECHNIQUE

Abstract

The sol-gel method is widely used to obtain hybrid materials, since it allows a better control of the parameters and phenomena present in the synthesis process, making it possible to obtain materials

*yamile.perez@correo.uady.mx

with different properties. Some characterization techniques are used to know the properties of the synthesized materials. In this project, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) was used, which provides information related to molecular conformation, structural characteristics, particularly the functional groups present in the material; and the thermogravimetric analysis (TGA) based on measuring the thermal stability of the sample through a predetermined temperature profile. These techniques have been applied to hybrid materials (PDMS-CN and PDMS-APTES) synthesized by sol-gel from polydimethylsiloxane (PDMS-OH) and alcoxysilane agents: cyanopropyltriethoxysilane (CN) and aminopropyltriethoxysilane (APTES). The structural analysis demonstrated that the sol-gel synthesis was carried out showed for both materials the band attributed to the Si-OH bond at 850 cm^{-1} , for the (3-APTES)-PDMS membrane the bands corresponding to the amine group were detected at 1562 and 1677 cm^{-1} and for the PDMS-CN membrane the band corresponding to the CN group was detected at 2250 cm^{-1} . The thermal stability for the PDMS-APTES membrane, presented a continuous loss from 220 °C to 800 °C and in the thermogram of the PDMS-CN membrane stability was observed up to 384 °C with a 10 residual mass % at 800 °C .

Keywords: Synthesis; Sol-gel; Membrane; Characterization; alcoxysilane agents; hybrid polymers.

Introducción

La tecnología de membranas se ha convertido en una parte importante de la tecnología de la separación en los últimos años. Entre las ventajas de esta tecnología se encuentran la rentabilidad, que es amigable con el medio ambiente y su alta eficiencia energética. Particularmente el uso de membranas resulta ser bastante efectiva en procesos de separación, en distintas áreas (Gutiérrez-Gutiérrez et al., 2015). Por otro lado, el concepto “híbrido”, ha sido utilizado ampliamente para el desarrollo de materiales orgánicos-inorgánicos, ya que ofrecen grandes ventajas al combinar las características de los materiales orgánicos e inorgánicos (Gutiérrez Beltrán et al., 2012). El método sol-gel es una forma simple y económica de obtener materiales poliméricos híbridos. La utilización de este método presenta ventajas como la obtención de los polímeros a bajas temperaturas con alta pureza, un proceso de síntesis corto y baja generación de residuos (Telle, 2013). Asimismo, el proceso de síntesis por el método sol-gel permite controlar el esqueleto inorgánico, es decir, una manipulación de variación del tamaño y forma de los poros, esto mediante cambios con el

precursor inorgánico utilizado, el tipo de surfactante, el solvente o el uso de catalizadores (Sergio, 2018). Entre los materiales obtenidos por esta metodología se encuentran los xerogeles síliceos híbridos, sintetizados a partir de alcóxidos de silicio (fase inorgánica), muy estables a nivel molecular, mientras que la función orgánica es constituida por grupos orgánicos que puedan ser anclados sobre la superficie de sílice (Álvarez Merino & Carrasco Marín, 2016), otro de los productos finales en esta técnica son las membranas densas, estas se han preparado a partir de diferentes compuestos o materiales como son el quitosano, alcohol polivinílico y sílice (Martín, 2018).

El polidimetilsiloxano es un compuesto que pertenece a la clase de siliconas, empleados en diversas técnicas en química analítica, por sus propiedades fisicoquímicas favorables para esta área, puede presentarse en diferentes formas, incluidas membranas delgadas, tubos y varillas, en recubrimientos en una fibra, dentro de una columna capilar, en una barra de agitación magnética, espumas o partículas empaquetadas en tubos sorbentes, etc.

(Seethapathy, 2012). Los polímeros orgánicos, al cual este polímero pertenece, se utilizan en técnicas analíticas como extracción y micro-extracción de analitos en fase sólida, líquida, acuosa, utilizándose como una vía para absorción de compuestos específicos y posteriormente desorción utilizando otra matriz para recuperar todo o la mayor cantidad de analito extraído previamente (Cetina, 2016).

Sin embargo, cuando se desarrollan materiales poliméricos, es de gran interés conocer las diversas características fisicoquímicas que presentan los materiales con el fin de conocer las propiedades que ofrece acorde al área de aplicación. Entre estas características están las fisicoquímicas, térmicas, morfológicas, estructurales, el espesor de las membranas formadas, así como el grado de polimerización (Gutiérrez-Gutiérrez et al., 2015), su estabilidad ante diferentes solventes y pH's. En particular el análisis por infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR-ATR), brinda información relacionada con la conformación molecular, características estructurales y grupos funcionales presentes en un material (Contreras & Trujillo, H.; Arias, G. & Pérez, 2010; Orrego, J. & Cabanzo, 2011). Además, la técnica de espectroscopía de FTIR-ATR es simple, flexible, directa y adecuada para caracterizar este tipo de materiales, ya que tiene mayor velocidad de señal/ruido y por lo tanto, mayor precisión de longitud de onda con respecto a otros equipos (Chittur, 1998). Otra técnica muy utilizada en la caracterización de materiales es el análisis termogravimétrico (TGA) que permite medir a través de un perfil de temperatura predeterminado la estabilidad térmica de la muestra. En este caso, la pérdida de masa en relación con el aumento de temperatura de la muestra es registrada. Estas pérdidas se deben a la volatilización de los líquidos como agua y solventes y/o por desprendimiento de gases provenientes de los sólidos, así como por la descomposición de la materia orgánica e inorgánica (Burgos, 2016).

Para llevar a cabo esta medición, se utiliza un equipo que consta de una balanza de alta precisión y un horno que se pueda programar para un aumento lineal de temperatura con respecto al tiempo (Coats, A.; Redfern, 2018).

En el presente trabajo, se plantea la síntesis de membranas híbridas y el empleo de la técnica de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier para determinar la correcta polimerización de materiales híbridos sintetizados por la técnica sol-gel, y el empleo de un analizador termogravimétrico con el fin de determinar un adecuado proceso de curado de las membranas híbridas sintetizadas, así como conocer su estabilidad térmica, esto con el fin de demostrar la correcta síntesis de membranas híbridas poliméricas por la técnica sol-gel.

Metodología

Los monómeros y reactivos empleados para la síntesis sol-gel fueron: ácido trifluoroacético (TFA) de Jalmek, 3-Aminopropiltriétoxissilano (APTES), 3-Cianopropiltriétoxissilano (CN), Polidimetilsiloxano con hidróxidos terminales PM 550 g/mol (PDMS-OH), diclorometano (DCM), tetrahidrofurano (THF). Todos con una pureza mayor o igual a 98%.

Preparación de las soluciones sol-gel

Para la obtención del material a partir de PDMS-OH y dos precursores, cianopropiltriétoxissilano (CN) ó aminopropiltriétoxissilano (APTES), por medio de síntesis sol-gel, se utilizó como disolvente DCM y THF respectivamente, dichas reacciones se llevaron a cabo en un tubo Falcon de 50 mL y se utilizó una solución acuosa de TFA (95% V/V) como catalizador, la relación molar fue 1:3 para ambos casos PDMS-CN y PDMS-APTES (Can, 2019; Cetina, 2016; Xix, 2019). La tabla 1 presenta las formulaciones utilizadas, donde el material A contiene al precursor CN y material B contiene al precursor APTES.

Tabla 1. Formulaciones para la preparación de los materiales

Reactivo	Material A	Material B
DCM (μL)	1800	-
THF (μL)	-	1800
PDMS-OH (μL)	1263	1263
CN (μL)	1476	-
APTES (μL)	-	1526.82
TFA (μL)	300	300

La síntesis de los materiales se llevó a cabo siguiendo metodologías reportadas en la literatura para la obtención de barras de agitación por dipcoating, las cuales se reprodujeron sin modificaciones en las cantidades empleadas de los reactivos para la obtención en este trabajo de membranas híbridas (Can, 2019; Cetina, 2016; Xix, 2019), en los dos casos se utilizó un tubo Falcon: para la membrana A se mezcló DCM con PDMS-OH, se agitó en vórtex Termo scientific M37615 durante 30 segundos, para el caso de la membrana B se mezcló de THF con PDMS-OH agitando en vórtex durante un minuto; se adicionó el precursor CN y APTES, respectivamente; se agitó nuevamente en vórtex durante un minuto la mezcla de material A y dos minutos para material B, finalmente se

adicionó TFA (95% V/V) a la mezcla de cada material y fue agitado nuevamente en vórtex durante dos minutos, se aplicó ultrasonido (Baño ultrasónico Branson 1510) a las mezclas por 5 minutos.

Las soluciones sol-gel obtenidas se vaciaron en un molde circular (figura 1) de politetrafluoroetileno (teflón) de 6 cm de diámetro, el cual se cubrió con un embudo de vidrio colocando una torunda de algodón para permitir la liberación lenta del solvente durante el proceso de curado. Los moldes conteniendo la solución, se dejaron reposar durante 7 días a temperatura ambiente sobre una superficie nivelada con el fin de controlar el espesor final de la membrana.



Figura 1. Moldes de teflón utilizados para la síntesis de las membranas.

Las membranas fueron sometidas a un proceso de curado térmico de manera escalonada en una estufa con vacío (Vacuum Oven DZF6050) a 60 °C y 120 °C por 24 horas para cada cambio de temperatura y una de 180 °C por 4 horas. Antes del retiro de las membranas de la estufa, estas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se colocaron en un desecador previo a ser analizadas por FTIR y TGA.

Medición de espesor

Se utilizó un medidor de espesor (Mitutoyo H-2781) para medir el grosor de las membranas preparadas. Se tomaron medidas en 10 puntos diferentes, incluyendo partes diferentes de la de la membrana desde la orilla (circunferencia) y centro de ésta, como se muestra en la figura 2, se reporta el promedio y la desviación estándar.

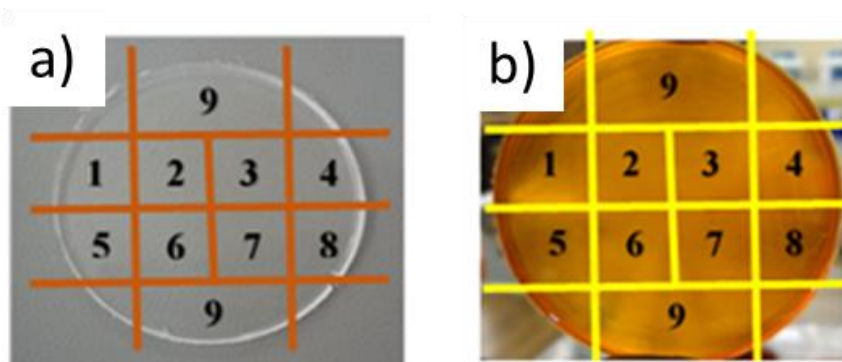


Figura 1. Puntos medidos en membrana curada, a. PDMS-CN y b. PDMS-APTES.

Análisis termogravimétrico (TGA)

Para el análisis termogravimétrico, se utilizó un analizador termogravimétrico TGA-8000 (Perkin Elmer). Las pruebas fueron realizadas en atmósfera de nitrógeno de alta pureza con flujo de 20 mL/min y un intervalo de

temperatura de 50 a 800 °C con un calentamiento de 10 °C/min.

Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Se utilizó un equipo marca Thermo Scientific Nicolet 380. Se utilizó el método de Reflexión

Total Atenuada (ATR) para analizar las muestras. Se realizó un corte de forma rectangular en una membrana y se introdujo al equipo para su caracterización. Los análisis se llevaron a cabo con un SCAN de 60 segundos en un rango espectral de $4000-500\text{ cm}^{-1}$.

Resultados

Las membranas obtenidas al llevarse a cabo la síntesis sol-gel, se muestran en la figura 3. Estas membranas híbridas presentaron las siguientes características: hulosas, traslúcidas, libres de poros y fracturas, las cuales son características correspondientes a las reportadas para una adecuada síntesis sol-gel. La metodología empleada para la obtención de las membranas fue repetible.

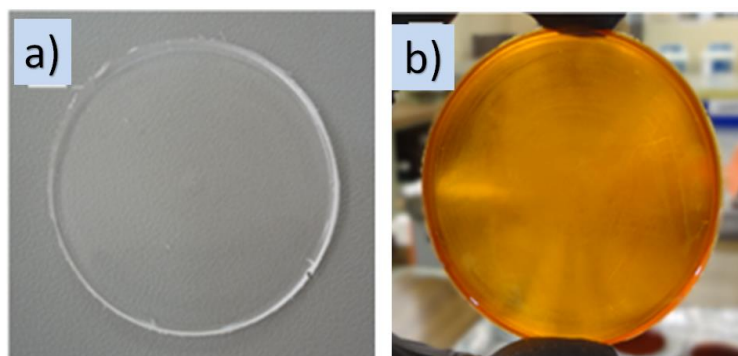


Figura 3. Membranas híbridas poliméricas obtenidas por el método sol-gel. a) PDMS-CN y b) PDMS-APTES

Se realizó la medición de espesor por triplicado de las membranas obtenidas con cada precursor utilizado, sintetizadas en las mismas condiciones y utilizando los mismos equipos, para comparar la repetibilidad de la

metodología de síntesis. A continuación, se presentan los valores promedio de los espesores de los materiales poliméricos obtenidos en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de espesor obtenidos para membranas híbridas.

Membranas	Espesor en mm		
	1	2	3
PDMS-CN	0.818 ± 0.156	0.791 ± 0.096	0.672 ± 0.069
PDMS-APTES	0.806 ± 0.035	0.815 ± 0.041	0.829 ± 0.013

Se observa que los valores obtenidos de espesores para las diferentes membranas son menores a 1 mm, no se observó una diferencia mayor a 0.16 mm confirmando así la repetibilidad de la síntesis y obtención de membrana.

En la figura 4 se presenta la comparación de los promedios de espesor obtenidos. Se observa que la preparación de la membrana a partir de PDMS-APTES presenta menor variabilidad y mayor espesor promedio. Las membranas PDMS-CN presentaron en general espesores menores y con una mayor variabilidad.

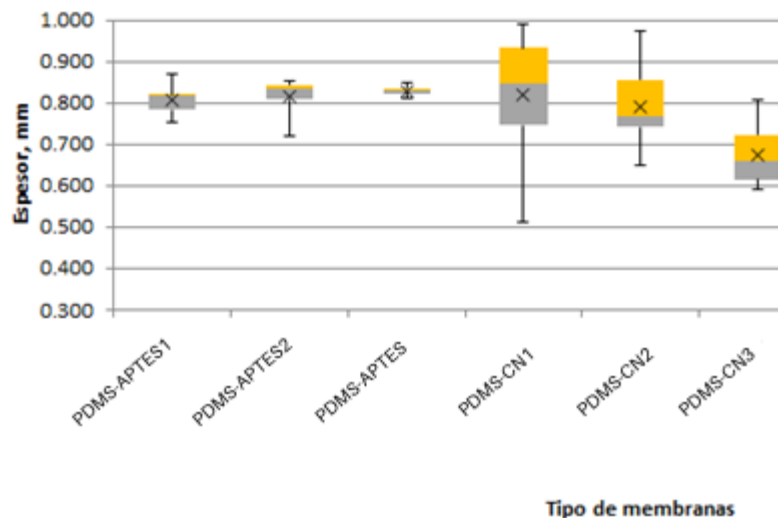


Figura 4. Comparación del espesor (mm) de los materiales obtenidos. (x) Espesor promedio; (—) dentro de la caja es la mediana del espesor.

Los resultados del análisis termogravimétrico permitieron determinar la estabilidad térmica de las membranas sintetizadas; éstos se muestran en la figura 5. La membrana híbrida que contiene como grupo funcional CN es estable hasta 384 °C, de acuerdo con la curva de la derivada. De acuerdo con el perfil de degradación, a 550 °C el material ha perdido aproximadamente el 90% de su masa total. Debido a que la membrana es un material híbrido, contiene fase orgánica/inorgánica, y se observa que al término de la prueba aún hay presencia del 10% de masa remanente, siendo que ésta requiere de temperaturas mayores a las permitidas por el equipo para degradarse (Lok, C. M. & Son, R., 2009)

La primera pérdida observada para este material es atribuida a la parte orgánica de la membrana híbrida, en particular a los grupos -CH₃ del PDMS-OH y donde comienzan las cadenas orgánicas a degradarse. También se puede observar en el perfil de temperatura de ambos materiales, que el proceso de curado al cual fueron sometidas las membranas, rampas de calentamiento, fue adecuado debido a que no se observan remanentes de solvente como es reportado en otros estudios cuando se obtienen barras de agitación con estos precursores.

De acuerdo con la literatura, recubrimientos basados en cianopropiltriatoxisilano ó PDMS puro, mejoran su estabilidad cuando son mezclados para la obtención un polímero

*yamile.perez@correo.uady.mx

híbrido, con valores de hasta 250 °C, reportándose estabilidades de 230 °C y 275 °C (Ibrahim Wan et al., 2011) siendo estos valores menores a las determinadas en nuestro estudio.

Para el caso de la membrana PDMS-APTES se puede observar de acuerdo con el perfil de la derivada, una primera pérdida a 220 °C y la principal y segunda pérdida a 475 °C. La primera pérdida es atribuida a los grupos -CH₃ del polidimetilsiloxano con la continuación de las fases orgánicas del polímero híbrido y de los grupos laterales del agente alcoxisilado.

También se observa que a 800 °C aún conserva un gran parte de su masa, esta es atribuida a la fase inorgánica que no logra descomponerse a las temperaturas máxima de evaluación. De acuerdo con la literatura, corresponde a la cantidad total de SiO₂ formada y el concepto es llamado rendimiento cerámico. Estos comportamientos son similares a los reportados en la literatura para la preparación por dipcoating de barras de agitación basadas en PDMS-CN y PDMS-APTES (Gutiérrez-Gutiérrez et al., 2015; Muñoz-Rodríguez et al., 2021; Pérez-Padilla et al., 2018).

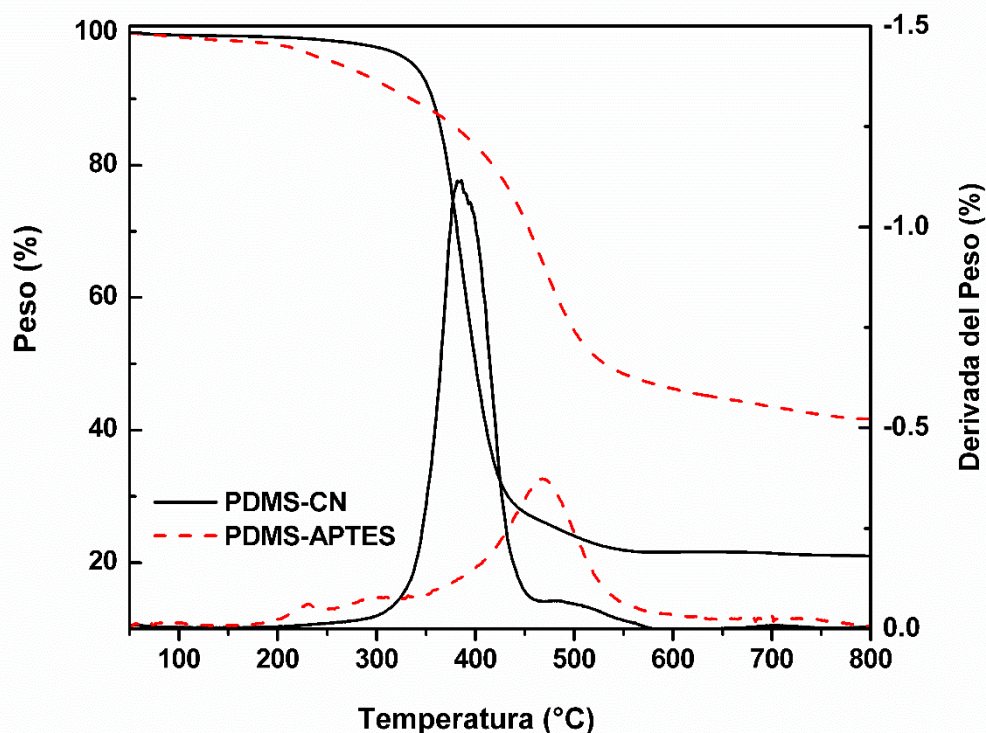


Figura 5. Termograma de membranas (PDMS-CN y PDMS-APTES)

Las membranas sintetizadas fueron analizadas por FTIR mediante el método de reflectancia total atenuada (ATR) con el fin de determinar la correcta polimerización del material. En la figura 6 se muestra el espectro para las membranas sintetizadas, PDMS-APTES y PDMS-CN. Para ambas membranas, a 800 cm⁻¹ se observa una banda atribuida al enlace Si-

OH y a 1090 cm⁻¹ la banda correspondiente al alargamiento del enlace Si-O-Si, además se observa una banda a 1250 cm⁻¹ correspondiente al estiramiento simétrico de los enlaces Si-(CH₃)₂. De acuerdo con la literatura, estas bandas pronunciadas demuestran que las membranas están principalmente conformadas por una red de sílice. La banda observada a 850

cm^{-1} es atribuida a la reacción de polimerización entre los grupos Si-OH del PDMS y los agentes alcoxilados (APTES ó CN). Además, la banda de absorción característica de un enlace Si-OH a $3,368 \text{ cm}^{-1}$, reportada en la literatura, no aparece en los espectros de las membranas, lo cual indica que la mayor parte de los grupos terminales Si-OH se han eliminado durante el proceso de reacción. Estudios previos muestran que el espectro del precursor PDMS-OH presenta a 3400 cm^{-1} una banda amplia y pronunciada (Ibrahim Wan et al., 2011). Con esto se confirma que la reacción se ha llevado a cabo y se ha formado un polímero híbrido.

En el espectro correspondiente a la membrana PDMS-APTES se pueden observar las bandas características de las aminas, 1562 y 1677 cm^{-1} . Así también, se observa para la membrana PDMS-CN, la banda representativa del grupo CN a 2250 cm^{-1} . Estas bandas coinciden con las reportadas en la literatura (Burgos, 2016; Can, 2019). En general, los espectros de las membranas ayudan a demostrar que se ha llevado a cabo una adecuada polimerización entre los monómeros mediante la técnica sol-gel.

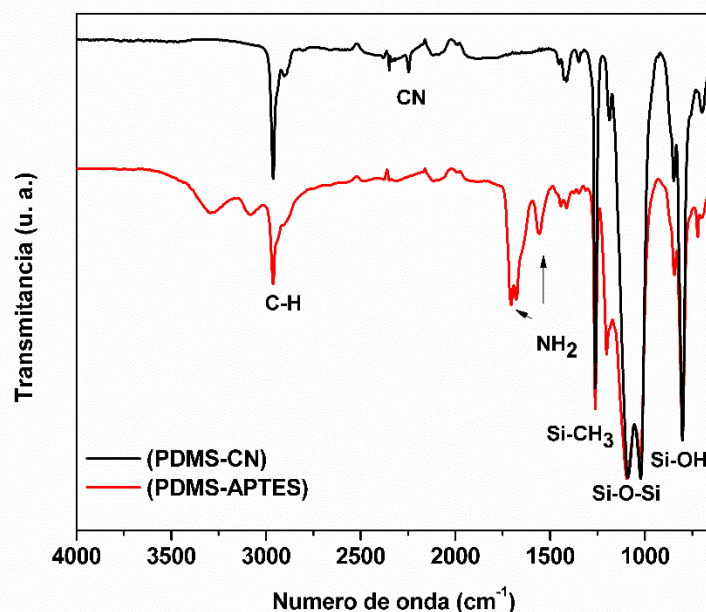


Figura 6. Espectro de FTIR-ATR de membrana (PDMS-CN y PDMS-APTES)

Conclusiones

Los materiales se obtuvieron como membranas híbridas traslúcidas, libres de poros, fracturas y con características que corresponden a las reportadas para una adecuada síntesis sol-gel. La metodología empleada para la obtención de

la membrana, fue repetible para ambos materiales.

La estabilidad térmica para la membrana PDMS-APTES determinada por TGA, muestra una pérdida continua a partir de 220 °C a 800 °C el material aun presenta el 40 % de residuo atribuido a la fase inorgánica, mientras que para la membrana conteniendo el grupo CN se

observa estabilidad hasta 384 °C con un remanente de 10 % de masa a 800 °C.

Los análisis por FTIR evidenciaron la presencia de los grupos representativos de los materiales y permitió determinar que la síntesis sol-gel se llevó a cabo de manera adecuada.

Al CONACYT por el financiamiento para la realización de este trabajo con el apoyo al proyecto CB 2017-2018-A1-S-38216, para la adquisición de materiales y reactivos utilizados en este trabajo. Ana Maribel Dzul Cocom agradece al proyecto CB 2017-2018-A1-S-38216 por la beca 30515 otorgada durante la realización de este proyecto.

Agradecimientos

Referencias

- Álvarez Merino, M. Á., & Carrasco Marín, F. (2016). *Aplicaciones de Adsorbentes y Catalizadores en Procesos Medioambientales y Energéticos*. Universidad Internacional de Andalucía.
- Burgos, M. (2016). “Desarrollo y evaluación de un recubrimiento polimérico para su aplicación potencial en la extracción por sorción en barra de agitación.” Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.
- Can, W. (2019). “Síntesis, caracterización y evaluación de membranas poliméricas híbridas a partir de polidimetilsiloxano y cianopropiltrietoxisilano con variación de espesor para su aplicación en extracción.” Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.
- Cetina, S. A. M. (2016). “Síntesis y caracterización de polímeros híbridos para su aplicación potencial en la extracción con barras de agitación.” Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.
- Chittur, K. (1998). FTIR-ATR for protein adsorption to biomaterial surfaces. *Biomaterials*, 19(4–5), 357–369.
- Coats, A.; Redfern, J. (2018). *Thermogravimetric Analysis*. 1(906).
- Contreras, H., & Trujillo, H.; Arias, G. & Pérez, J. (2010). Espectroscopía ATR-FTIR de celulosa, aspecto instrumental y tratamiento matemático de espectros. *E-Genesis*, 8(9), 383–394.
- Gutiérrez-Gutiérrez, M. I., Morales-Mendivelso, D. F., Muvdi-Nova, C. J., & Chaves-Guerrero, A. (2015). Synthesis and characterization of hybrid membranes composed of chitosan, polyvinyl alcohol and silica for its application in dehydration of gases. *Iteckne*, 12(1), 33–43. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v12i1.819>
- Gutiérrez Beltrán, C. K., Osuna Alarcón, J. G., & Martínez Montemayor, S. (2012). Desarrollo de membranas híbridas dieléctricas de tipo Nafión con óxidos de zirconio, hafnio y lantano. *Afinidad*, 69(558), 126–130.
- Ibrahim, W. A. W., Keyon, A. S. A., Prastomo, N., & Matsuda, A. (2011). Synthesis and

characterization of polydimethylsiloxane-cyanopropyltriethoxysilane-derived hybrid coating for stir bar sorptive extraction. *Journal of sol-gel science and technology*, 59(1), 128-134. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2470-3>

- Lok, C. M., Son, R. (2009). Application of molecularly imprinted polymers in food sample analysis – a perspective. *Int. Food Res. J.* 16, 127-140.
- Martín, P. (2018). “*Síntesis y caracterización de sílices mesoporosas híbridas para ser utilizadas como nuevos adsorbentes en la remoción de metales pesados de matrices acuosas.*” Tesis doctoral, Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
- Muñoz-Rodríguez, D., Pérez-Padilla, Y., Ávila-Ortega, A., Barrón-Zambrano, J. A., & Carrera-Figueiras, C. (2021). Coating evaluation of polydimethylsiloxane-aminopropylsiloxane for stir bar sorptive extraction. *Journal of Coatings Technology and Research*, 18(4), 1143–1151. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00471-3>
- Orrego, J. & Cabanzo, R. (2011). Structural study of five colombian by attenuated total reflectance in the mid infrared (ATR-MIR). *Revista Colombiana de Física*, 43(2), 631–634.
- Pérez-Padilla, Y., Cetina, S. A. M., Ávila-Ortega, A., Barrón-Zambrano, J. A., Vilchis-Néstor, A. R., Carrera-Figueiras, C., & Muñoz-Rodríguez, D. (2018). Evaluation of polydimethylsiloxane-phenylsiloxane as a coating for stir bar sorptive extraction. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 62(2 Special Issue), 348–357. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v62i2.431>
- Seethapathy, S. (2012). Applications of polydimethylsiloxane in analytical chemistry a review. *Analytica Chimica Acta*, 750, 48–62.
- Telle, R. (2013). Division of sol-gel coatings. *Institute of Mineral Engineering Department of Ceramics and Refractory Materials*.
- Xix, F. (2019). “*Caracterización de películas híbridas preparadas a partir de polidimetilsiloxano y trietoxifenilsilano.*” Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.