

Obtención de esponjas de polidimetilsiloxano y su evaluación en remediación de agua

Hernández-López, Pedro¹, Pérez-Rosales, Paola¹, Ramírez-Cruz, Karla¹, Rangel-Rivera, Jacqueline¹, Salazar-Barrientos, Iván¹, Guerra-Contreras, Antonio².

¹Licenciatura en Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, C.P. 36050

²Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, C.P. 36050
ph.hernandezlopez@ugto.mx¹, pdc.perezrosales@ugto.mx¹, ke.ramirezacruz@ugto.mx¹, pj.rangelrivera@ugto.mx¹,
ji.salazarbarrientos@ugto.mx¹, ja.guerra@ugto.mx².

Resumen

La contaminación del agua por aceites, hidrocarburos o disolventes orgánicos es un problema conocido a nivel mundial, sin embargo, las medidas para la remediación del agua contaminada son poco eficientes. Por esto, en el presente trabajo de investigación se propone un método sencillo, económico y amigable con el medio ambiente para la remoción de contaminantes en agua utilizando esponjas de polidimetilsiloxano (PDMS) sintetizadas a partir de cubos de azúcar y sal como template poroso. Los resultados de las pruebas de absorción demostraron que la esponja que presenta mayor eficiencia de absorción fue utilizando el template de azúcar-sal 50:50 al presentar una absorción de 1771 mg de diclorometano, 1449 mg de tolueno, 1221 mg de cloroformo, 854 mg de diésel, 1496 mg de aceite vegetal y 1397 mg de aceite mineral por gramo de esponja. Esta investigación muestra resultados prometedores para la remediación del medio ambiente enfocado en la remoción de contaminantes en agua.

Palabras clave: Polidimetilsiloxano, Templates, Esponjas, Absorción, Remediación de agua

Introducción

Más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas se vierten en ríos y mares sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación (Moran, 2020). Entre las principales actividades humanas que causan la contaminación del agua se encuentran los derrames de petróleo en los mares, la pésima disposición de aceites, así como la amplia gama de compuestos químicos como los disolventes orgánicos que terminan en ríos, mares, océanos y/o lagos. En 2010, un accidente en el Golfo de México liberó 4.9 millones de barriles de petróleo crudo, lo que provocó daños catastróficos en los ecosistemas marinos y acuáticos (Mirshahghassemi, 2015). Es por eso que el tratamiento de aguas contaminadas es un problema que se intenta solucionar con urgencia.

Los métodos tradicionales químicos, físicos o biológicos para la remoción de contaminantes en agua, tales como, sistemas de desnatado, métodos de absorción con carbón activado o reactores de fangos activos han sido los más empleados, sin embargo, presentan diversas limitantes como costos altos, transporte a plantas de tratamiento poco prácticos y la generación de contaminantes secundarios, haciéndolos ineficientes y con uso limitado (Peng, 2018). Estos métodos aplicables en casos muy específicos, limitando su uso.

Para combatir esta problemática, la síntesis de materiales porosos como sílices, resinas, nanotubos de carbono, entre otros, han demostrado ser una buena opción para la remoción de contaminantes como disolventes orgánicos, aceites vegetales, así como petróleo y sus derivados (Choi, 2011). La síntesis de estos materiales puede resultar compleja y extensa, lo cual conduce a algunas desventajas, siendo la más importante su alto costo de producción, que imposibilita su obtención a gran escala. El polidimetilsiloxano (PDMS) es un polímero inorgánico de silicio con propiedades interesantes como inflamabilidad, flexibilidad, inercia química y baja toxicidad. Además, su naturaleza hidrofóbica lo vuelve una opción prometedora para la remoción de contaminantes de agua. La literatura muestra diversas técnicas para la aplicación de películas

y de esponjas de PDMS, no solo en el tratamiento de aguas residuales, sino en absorción, fotocatalisis, entre otros (Zhu, 2017).

En esta investigación se propone una metodología sencilla para la síntesis de esponjas de PDMS a través de un proceso de curado que permitirá desarrollar un material poroso tridimensional eficiente en la absorción de aceites y otros disolventes en agua. La porosidad de las esponjas de PDMS se obtuvo mediante moldes cúbicos de azúcar y sal comercial, llamados "templates", los cuales se remueven de manera rápida en agua, siendo esto una de las razones más importantes de la obtención de las esponjas, ya que es una metodología amigable con el medio ambiente. Los materiales se caracterizaron mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para la caracterización estructural de las esponjas, ángulo de contacto para comprobar su carácter hidrofóbico, termogravimetría (TGA) para estudiar su estabilidad térmica, y finalmente se llevó a cabo el estudio de absorción en aceites, hidrocarburos y disolventes orgánicos para demostrar no solo su capacidad de absorción, sino también su selectividad. Después del proceso de absorción de contaminantes la esponja puede ser reutilizada por varios ciclos con solo exprimirla y lavarla. Además es selectiva a disolventes orgánicos polares, aceites e hidrocarburos, conservando todas las propiedades del PDMS después de varios ciclos de uso.

Materiales y métodos

Materiales

Moldes de silicón de forma cúbica, azúcar morena, azúcar refinada, sal yodada refinada, Sylgard 184 de Sigma-Aldrich, etanol, agua desionizada y destilada, aceite vegetal quemado adquirido de un negocio local, aceite mineral, gasóleo (diésel) comprado en la refinería de Salamanca, Gto, MX., diclorometano, tolueno y cloroformo. Para poder visualizar de mejor manera los disolventes orgánicos en el agua fue necesario añadir curcumina a manera de colorante amarillo.

Preparación de Templates

Su elaboración parte de la sal y/o azúcar como material granulado y la presencia de agua. Se realiza una mezcla del material granulado con agua, se coloca en el molde de silicon de forma cubica, para después calentar la mezcla a diferentes intervalos de tiempo hasta obtener un sólido compacto que se dejó enfriar por 30 minutos. Después de este tiempo se retiró del molde para su posterior aplicación.

Preparación de esponjas porosas tridimensionales de PDMS

En una caja Petri se añadió Sylgard 184 previamente mezclado, después se colocó el template y el sistema se colocó en una cámara de vacío por 6 horas para desgasificar y remover todas las burbujas de la premezcla, además de promover la penetración del Sylgard 184 a través de las partículas del material granulado por capilaridad. En seguida, se lleva al horno a 100 °C durante 18 horas, con el fin de terminar la polimerización por medio del curado térmico. Al término del proceso de curado, la muestra se sumerge en agua desionizada a una temperatura de 60 °C, para remover el template. Finalmente, la esponja se lleva al horno a 80 °C durante 18 horas para eliminar residuos de agua.

Caracterización de las esponjas de PDMS

Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopia FTIR se utilizó para la caracterización estructural de los productos obtenidos. Las muestras se analizaron en un espectrómetro de la marca Perkin-Elmer Precisely Spectrum 100 perteneciente al laboratorio de análisis instrumental "Q. Fernando de Jesús Amézquita López" de la División de Ciencias Naturales y Exactas (DCNE) de la Universidad de Guanajuato. Todos los espectros se obtuvieron utilizando una resolución de 4 cm⁻¹, un número de scans = 12, y en una región de 4000–400 cm⁻¹, utilizando el modo de Reflectancia Total Atenuada (ATR).

Análisis morfológico.

La estructura superficial de las esponjas de PDMS fue caracterizada en un microscopio óptico modelo STEREO VE-S5 utilizando el modo de luz transmitida. La reconstrucción y toma de imagen se realizó mediante el software "Micam", situando la esponja a observar bajo la lente del microscopio y ajustando la fuente de luz al máximo de potencia, de esta forma se examinó tanto la forma como el tamaño de los poros para cada esponja.

Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis de TGA es una técnica que mide la masa (pérdida o ganancia) de una sustancia cuando se somete a rampas de temperatura bajo un ambiente controlado a lo largo del tiempo (PerkinElmer, 2015). Esta prueba permitió conocer la estabilidad térmica de las esponjas de igual forma se usó para corroborar o descartar otras sustancias dentro de la misma esponja, como restos de template. Los análisis se realizaron en el laboratorio de termoanálisis perteneciente a la Unidad de Servicios de Análisis Instrumentales y Químicos (USAIQ) del Departamento de Química de la DCNE de la Universidad de Guanajuato. Todos los termogramas fueron obtenidos con una rampa de temperatura de 10 °C/min y con un rango de análisis de 25 a 900 °C, utilizando atmosfera de nitrógeno.

Análisis del ángulo de contacto

Este análisis permitió calcular la energía libre superficial o energía libre de hidrofobicidad de todas las esponjas. La medición del ángulo de contacto estático se llevó a cabo colocando una gota de agua destilada sobre diferentes zonas de la esponja. Para cada una de las esponjas se depositaron 10 gotas, tomando fotos para cada una de ellas mediante una cámara de celular (modelo Huawei Y92019). Con el uso del programa "ImageJ" se analizaron las fotografías, midiendo los ángulos, tanto del lado izquierdo como del derecho, entre la curvatura de la gota y la superficie de las esponjas.

Pruebas de absorción y análisis de vida útil

Las pruebas para medir la capacidad de absorción se desarrollaron de forma manual, colocando 10 mL de agua de la llave en una caja Petri y agregando 5 mL de contaminante, para después removerlo con la esponja. Esta prueba se realizó para cada contaminante con cada esponja. Se pesa la esponja antes y después de la prueba, para obtener el dato de absorción del contaminante por diferencia de pesos.

Para el análisis de vida útil de la esponja se realizaron 8 ciclos de absorción de contaminante utilizando la misma esponja. De manera similar a las pruebas de absorción, cada esponja se pesa inicialmente, en seguida se sumerge en 60 mL de agua de la llave con 2 mL de contaminante. La esponja se pesa al final de la remoción, y se calcula por diferencia de pesos la cantidad de contaminante absorbido. Como paso adicional, las esponjas fueron lavadas con etanol varias veces para retirar el residuo absorbido y después se colocaron en un horno a 130°C para retirar el etanol. Todo este proceso fue repetido 8 veces, utilizando siempre la misma esponja. La prueba de vida útil se realizó para 3 esponjas, la esponja elaborada con template de azúcar refinada-sal 50:50 para remover diclorometano, la esponja de azúcar morena-azúcar refinada 50:50 para remover gasóleo (diésel), y la esponja elaborada con template de azúcar morena para remover aceite vegetal.

Resultados y Discusión

Síntesis de las esponjas

Las esponjas se sintetizaron mediante la reacción de hidrosilación la cual se lleva a cabo entre un siloxano vinil terminal ($-\text{Si}-\text{CH}=\text{CH}_2$) y un hidrosilano ($-\text{Si}-\text{H}$) en relación 10:1, respectivamente y en presencia de un catalizador de platino (González-Rivera, 2018). Esta reacción permite la adición de grupos Si-H a enlaces dobles o triples unidos a diferentes grupos funcionales y ha sido ampliamente investigada (Marciniac, 1992). Además, es uno de los métodos más importantes para preparar compuestos organosilícicos, tanto en el laboratorio como en la industria (Guerra-Contreras, 2017). La Figura 1 muestra el esquema general de reacción para el Sylgard 184 que da como resultado poldimetilsiloxano (PDMS) de alto peso molecular. Como se puede observar, cuando esta reacción se lleva a cabo sin la adición de un template poroso se obtiene un polímero elástico transparente con características de elastómero. Por otro lado, si se coloca un template,

como lo son cubos de azúcar o sal, el polímero adquiere la forma tridimensional de éste. Después del proceso de remoción del template la consistencia final de la esponja depende fuertemente del material de partida (azúcares, sal o mezcla de éstos), siendo más suave cuando se utiliza azúcar y más rígida cuando se usa la sal como template. Otro aspecto importante de mencionar es que el proceso de remoción del template de sal llevó más tiempo comparado con los de azúcar o incluso la mezcla azúcar-sal 50:50. Esto puede deberse a que los granos de sal son más uniformes y adquieren un ordenamiento mayor durante el proceso de formación del cubo por lo que las fuerzas de cohesión se incrementan, haciendo que la remoción del template lleve más tiempo.

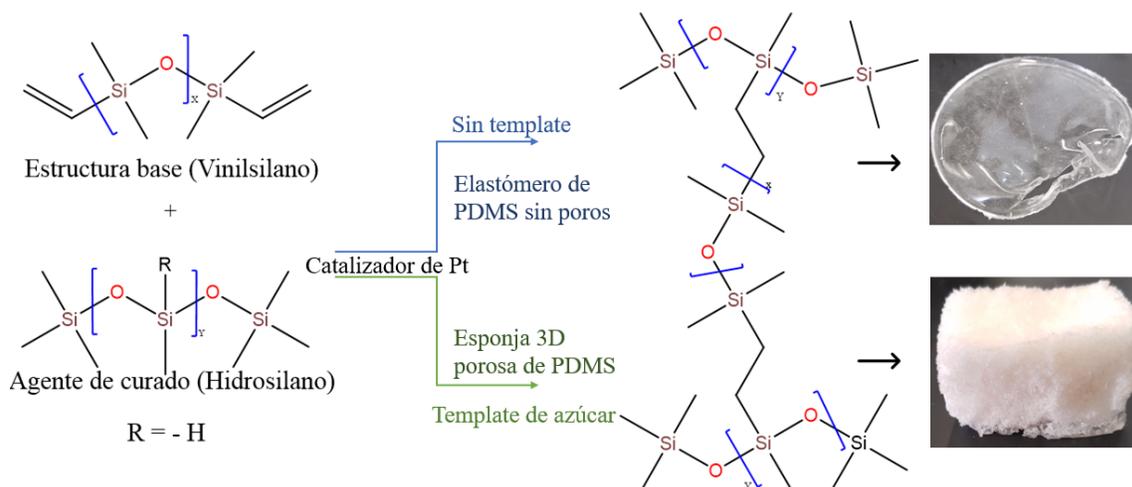


Figura 1. Reacción general de hidrosilación del Sylgard 184. Imagen modificada de [8].

Análisis FTIR

La Figura 2, presenta el espectro para la esponja obtenida utilizando el template de azúcar morena después del proceso de remoción. Se pueden observar las bandas de vibración características del PDMS, la banda a 2962 cm^{-1} corresponde al enlace C-H de los metilos, el enlace silicio-metilo (Si-CH₃) con distintas vibraciones aparecen a 1260 y 792 cm^{-1} . Por último, la banda a 1012 cm^{-1} corresponde al enlace siloxano (Si-O-Si) de la cadena principal del polímero. Es importante mencionar que en todos los espectros obtenidos para las distintas esponjas se muestran las mismas cuatro señales, indicando que la composición es únicamente de PDMS. Además, en los espectros no se mostraron bandas vibracionales correspondientes a los templates utilizados por lo que se puede concluir que el proceso de remoción de éstos fue exitoso.

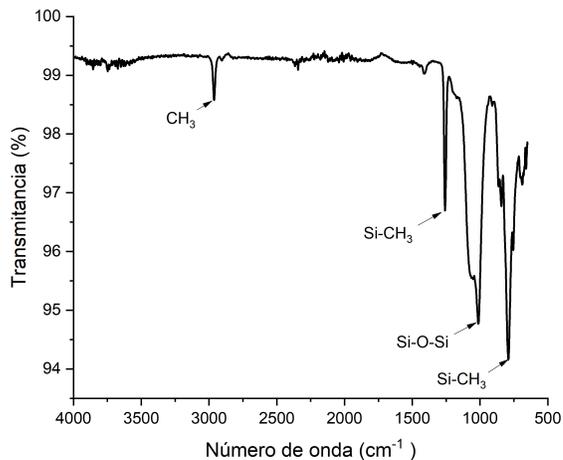


Figura 2. Espectro de FTIR-ART de esponja de PDMS elaborada con template de azúcar morena.

Análisis morfológico de esponjas porosas 3D

A través del microscopio óptico y mediante el apoyo del software “Micam” se obtuvieron los tamaños y la forma de los poros para cada esponja, en donde aquella obtenida con template de azúcar-sal 50:50 presentó poros interconectados y amorfos con un rango de tamaño de poros a partir entre 97 hasta 991 micrómetros aproximadamente, como se muestra en la Figura 3(a). La esponja de PDMS obtenida con template de azúcar refinada-morena 50:50 presentó poros ligeramente menos amorfos e igualmente interconectados que la esponja anterior, oscilando un tamaño de 131 a 888 micrómetros aproximadamente (Figura 3(b)). La esponja de PDMS realizada con template de azúcar morena (Figura 3(c)) mostró los poros con mayor tamaño y mejor definidos en comparación con las dos anteriores, el tamaño de poro osciló entre las 103 hasta los 1833 micrómetros aproximadamente. La esponja de PDMS realizada con template de azúcar refinada obtuvo los poros más pequeños de todas las esponjas, su tamaño de poro osciló entre 56 y 710 micrómetros aproximadamente (Figura 3(d)). La esponja de PDMS obtenida con template de sal presentó los poros más uniformes y circulares, su tamaño de poro se encuentra entre los 95 y 592 micrómetros aproximadamente (Figura 3(e)).

Todos los valores de medición de los poros marcados con colores en la Figura 3 y mencionados anteriormente fueron obtenidos mediante el software “Micam”. Los poros analizados fueron seleccionados manualmente, se toma en cuenta que pudieran existir poros de menor tamaño que no fueron percibidos al ojo humano por lo que se requiere un análisis más completo mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Todas las esponjas presentaron poros que podían verse a simple vista sin equipo.

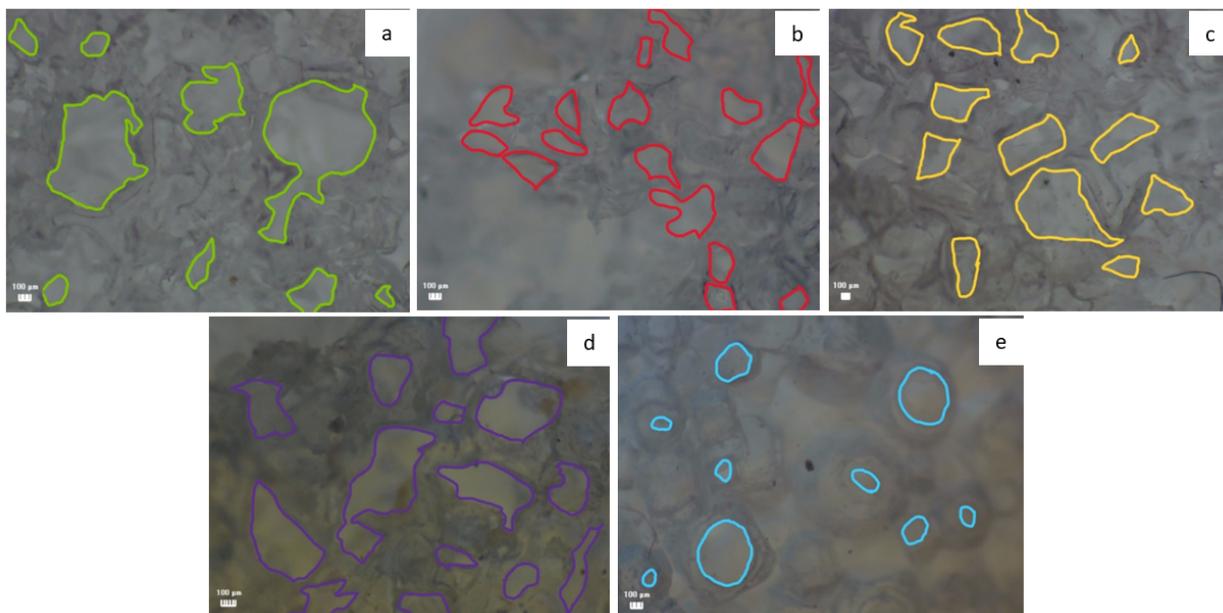


Figura 3. Microscopía óptica por luz transmitida de la superficie de esponjas de PDMS realizadas mediante diversos templates: (a) azúcar refinada-sal 50:50, (b) azúcar morena-azúcar refinada 50:50, (c) azúcar morena, (d) azúcar refinada, (e) sal.

Análisis termogravimétrico (TGA)

Los resultados del análisis termogravimétrico se muestran en la Figura 4, donde cada línea corresponde a una muestra de esponja realizada con diferente template. Los resultados mostraron que la descomposición térmica de todas las esponjas de PDMS comenzaron en el rango de los 350 °C – 400 °C, lo cual corresponde con los resultados de descomposición reportados en la literatura (Brounstein, 2021). Esto indica que se obtuvieron materiales térmicamente estables hasta los 400 °C, donde no ocurre una alteración física del material, siendo la más estable la esponja elaborada con template de azúcar refinada (M1). De igual forma se observaron pequeñas pérdidas de peso en el rango de los 500 °C en dos muestras (M2 y M5) esto se puede justificar con la eficiencia de la reacción donde posiblemente se forman cadenas más cortas, haciendo evidente el proceso de depolimerización en la cadena principal del PDMS. Sin embargo, esto se debe corroborar con otra prueba de TGA en el material de residuo de la esponja. Por último, la gráfica corrobora que no hay indicios de agua o de remanente del template empleado, lo que concuerda con los resultados de FTIR obtenidos.

Gráfica de descomposición térmica (TGA)

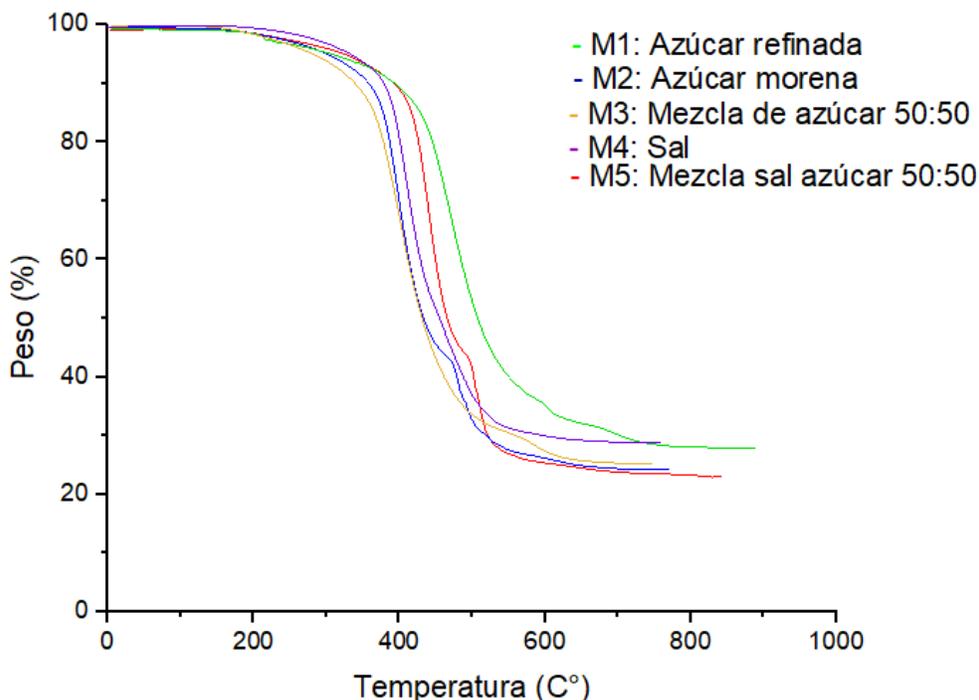


Figura 4. Gráfica de descomposición térmica de esponjas de PDMS con diferentes templates.

Pruebas de absorción y vida útil en esponjas de PDMS

En el análisis de absorción de contaminantes con las esponjas (Figura 5) se evidencia la capacidad de absorción de las esponjas de PDMS según el template utilizado. Todas las esponjas de PDMS removieron de forma exitosa el contaminante, incluso cuando este se encontraba en el fondo del recipiente. Después de aproximadamente 2 minutos en el proceso de remoción, todas las esponjas llegaron al punto donde no absorbían más contaminantes (punto de saturación), sin embargo, continúan flotando en el agua como se muestra en la Figura 6.

Los resultados arrojan que la esponja que presenta mayor índice de absorción fue la elaborada con template de azúcar-sal 50:50 absorbiendo 1771 mg de diclorometano, 1449 mg de tolueno, 1221 mg de cloroformo, 854 mg de diésel, 1496 mg de aceite vegetal, 1397 mg de aceite mineral por gramo de esponja, mientras que la esponja que tuvo menor eficacia fue la elaborada con template de sal, absorbiendo 296 mg de diclorometano, 359 mg de tolueno, 316 mg de cloroformo, 351 mg de diésel, 391 mg de aceite vegetal y 447 mg de aceite mineral por gramo de esponja. Esta diferencia significativa en las cantidades puede deberse a la interconectividad de los poros, las mezclas permiten obtener poros de diversos tamaños y formas lo cual promueve la absorción de todos los contaminantes. Por otra parte, la esponja con el template de sal presenta poros uniformes y de menor tamaño, lo cual limita la absorción al interior de la esponja.

Cabe resaltar que la esponja elaborada con template de azúcar morena tuvo una absorción considerable de disolventes orgánicos en comparación con las demás esponjas, esto se puede justificar a que esta esponja presenta el mayor tamaño de poro y que la densidad de los disolventes orgánicos es menor respecto a la del aceite y diésel, facilitando la entrada de disolventes hacía el interior de los poros de la esponja, sin embargo, se necesitan más pruebas para corroborarlo.

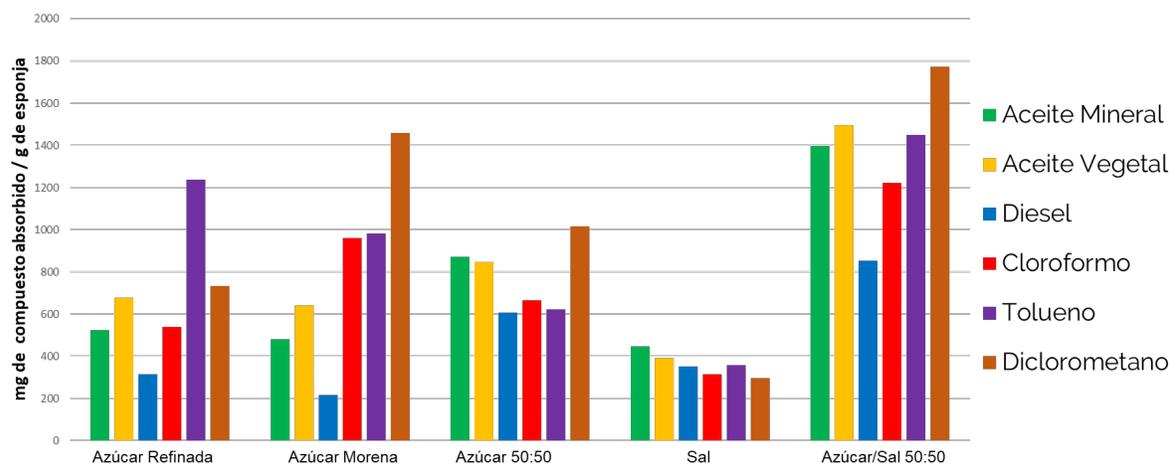


Figura 6. Gráfica de miligramos absorbidos de cada contaminante (simbología a la derecha) por cada gramo de esponja. Agrupado por template de elaboración.



Figura 7. Esponja, elaborada con template de azúcar refinada-sal 50:50, flotando al término de la prueba de remoción de diclorometano.

Con la finalidad de investigar el tiempo de vida útil de las esponjas, el cual es un aspecto importante en las propuestas de nuevos materiales para la remoción de contaminantes, se hicieron pruebas preliminares de absorción mediante varios ciclos. Para fines prácticos, se realizaron 3 pruebas con contaminantes de distinta naturaleza: aceites, hidrocarburos y disolventes orgánicos, cada una con las esponjas que presentaron mejor rendimiento. Después del séptimo ciclo, las esponjas comenzaron a presentar desgaste superficial, se cree que esto no es por la naturaleza del contaminante, sino por la técnica de manipulación empleada. Para corroborar esto será necesario realizar más experimentos.

Análisis de ángulo de contacto

Como se puede observar en la Tabla 1 se muestran los distintos valores de los ángulos de contacto con sus respectivas desviaciones estándar para cada una de las esponjas a partir de cada template. De forma general, todas las esponjas presentan un carácter hidrofóbico al tener un valor de ángulo de contacto mayor a 90° , siendo la esponja proveniente del template de sal la más hidrofóbica a pesar de presentar los valores más bajos en las pruebas de absorción. Esto demuestra que para el proceso de remoción es más importante la interconectividad de diversos tamaños de poro como en el caso de las esponjas obtenidas a partir de mezclas de azúcar/sal o azúcar morena/azúcar refinada que el tener esponjas con tamaños de poro uniforme. A pesar de esto, los valores de ángulo de contacto para las esponjas hechas a partir de mezclas de azúcar 50:50 y azúcar-sal presentan valores por encima de los 90° , confirmando su carácter hidrofóbico.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de ángulo de contacto con sus desviaciones estándar. Se realizaron 10 mediciones para cada esponja.

Esponja	Ángulo de contacto
Azúcar-Sal 50:50	108.79° ± 10.36°
Azúcar 50:50	106.95° ± 10.38°
Azúcar morena	112.99 ° ± 6.94°
Azúcar refinada	99.42° ± 9.46°
Sal	118.21° ± 9.98°

Conclusiones

Se llevó a cabo de manera exitosa la síntesis de esponjas de polidimetilsiloxano por el método de template poroso, el cual demostró ser una técnica económica, sencilla y amigable con el medio ambiente. Con base en los espectros de infrarrojo se demostró que la esponja está conformada únicamente de redes siloxano (Si-O-Si), del mismo modo se confirmó la remoción del template al no presentar las bandas vibracionales del material granulado (sal, azúcar). Mediante el análisis termogravimétrico (TGA) se observó que las esponjas poseen una buena estabilidad térmica llegando a soportar una temperatura de 400 °C e independientemente del template empleado, todas tienen el mismo comportamiento de descomposición lo cual es un punto para considerar en diversas aplicaciones, incluso fuera de la remoción de contaminantes en agua.

Por otra parte, los resultados de absorción validaron que las esponjas de polidimetilsiloxano tienen una buena selectividad para absorber aceites, derivados de petróleo (hidrocarburos) así como disolventes orgánicos, especialmente la elaborada con template de azúcar/sal 50:50, esto se debe a la interconectividad de los poros y a que el tamaño de estos varía entre si permitiendo una mayor absorción. El hecho de que todas las esponjas presentaron una superficie con carácter hidrofóbico sugiere que pueden ser utilizadas para remoción de otros contaminantes en agua tales como grasas, petróleo, colorantes liposolubles, disolventes orgánicos, entre otros.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Mtra. Abygail Camacho Ramírez por su participación en el proceso de síntesis de las esponjas de PDMS y por sus comentarios durante la estancia de verano, al Ing. Gilberto Álvarez Guzmán por su apoyo técnico en el laboratorio y sus comentarios, a la Dra. Esmeralda Lizet Martínez Piñeiro por su apoyo en las pruebas de ángulo de contacto y microscopía óptica, al Laboratorio de Análisis Instrumental “Q. Fernando de Jesús Amézquita López” por permitirnos el uso del equipo FTIR para la caracterización de las esponjas, a la Q. Isela Castro Becerra del Laboratorio de Termoanálisis por los estudios de TGA, a la Coordinación de Veranos UG-DAIP por el apoyo económico otorgado y a la División de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Guanajuato por el acceso a las instalaciones.

Referencia

- Brounstein, Z., Zhao, J., Geller, D., Gupta, N., & Labouriau, A. (2021). Long-term thermal aging of modified sylgard 184 formulations. *Polymers*, 13(18), 3125. <https://doi.org/10.3390/polym13183125>
- Choi, S. J., Kwon, T. H., Im, H., Moon, D. II, Baek, D. J., Seol, M. L., Duarte, J. P., & Choi, Y. K. (2011). A polydimethylsiloxane (PDMS) sponge for the selective absorption of oil from water. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 3(12), 4552–4556. <https://doi.org/10.1021/am201352w>
- González-Rivera, J., Iglio, R., Barillaro, G., Duce, C., & Tinè, M. R. (2018). Structural and thermoanalytical characterization of 3D porous PDMS foam materials: The effect of impurities derived from a sugar templating process. *Polymers*, 8(6), 1–13. <https://doi.org/10.3390/polym10060616>

- Guerra-Contreras, A., Villegas, A., Ramírez-Oliva, E. et al. (2017). Characterization and Study of Properties in a Polar Solvent of a Functionalized and Quaternized Poly(dimethylsiloxane-co-methyl hidridosiloxane). *Silicon* 9, 525–533. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9286-7>
- Marciniec B (1992) *Comprehensive Handbook on Hydrosilylation*, 1st edn. Pergamon Press, Oxford.
- Mirshahghassemi, S., & Lead, J. R. (2015). Oil Recovery from Water under Environmentally Relevant Conditions Using Magnetic Nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 49(19), 11729–11736. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02687>
- Morán, M. (2020). *Agua y saneamiento*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Peng, J., Deng, J., Quan, Y., Yu, C., Wang, H., Gong, Y., Liu, Y., & Deng, W. (2018). Superhydrophobic Melamine Sponge Coated with Striped Polydimethylsiloxane by Thiol-Ene Click Reaction for Efficient Oil/Water Separation. *ACS Omega*, 3(5), 5222–5228. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00373>
- PerkinElmer (2015) *Thermogravimetric Analysis (TGA). A Beginner's Guide*. PerkinElmer, inc. https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/faq_beginners-guide-to-thermogravimetric-analysis_009380c_01.pdf
- Zhu, D., Handschuh-Wang, S., & Zhou, X. (2017). Recent progress in fabrication and application of polydimethylsiloxane sponges. In *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 32, 16467-16497. <https://doi.org/10.1039/c7ta04577h>