

Adsorción de Cobre mediante esponjas de polidimetilsiloxano funcionalizadas

Copper adsorption by functionalized polydimethylsiloxane sponges

González-Suárez Édgar¹., Carrillo-Serna Ariana¹., Sanchez-Saldaña Fernanda¹., Correa-Guerra Michelle¹., Ramírez-Cruz Karla¹., Camacho-Ramírez Abygail²., Guerra-Contreras Antonio².

¹Licenciatura en Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato

²Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato

je.gonzalezsuarez@ugto.mx¹., ay.carrilloserna@ugto.mx¹., mf.sanchezsaldana@ugto.mx¹., dm.correaguerra@ugto.mx¹., ke.ramirezacruz@ugto.mx¹., acamachoramirez@ugto.mx²., ja.guerra@ugto.mx².

1. Resumen

La acumulación de metales pesados en los organismos vivos representa un enorme peligro para la salud socio-ecosistémica a nivel global. Por ello se explora un método de remoción de Cobre (II), mediante esponjas sintetizadas con elastómeros de silicio, modificadas con un grupo funcional amino. Se caracterizaron sus propiedades físicas como la dureza, porosidad, ángulo de contacto y su capacidad de adsorción de Cobre (II). Se encontró que el tamaño y distribución de los poros es uno de los principales factores que determinan las propiedades físicas y de absorción de las esponjas. Por ejemplo, las sintetizadas por condensación 5:1 que presentaron la dureza (HB) de 63.66 al emplear template de azúcar, 86 al usar sal y 92.16 de dureza al usar el template de azúcar/sal. Para las esponjas sintetizadas por condensación (Cond.) se obtuvieron mayores valores de adsorción en template de sal, mientras que comparando las sintetizadas por hidrosililación (Hy) con template de azúcar/sal y AzaMichael + hidrosililación (AMHy) por emulsión. Las esponjas que mostraron tener una mayor eficiencia de adsorción fueron la 2:1:4 por condensación y 1:2:4 por hidrosililación con una adsorción máxima de 0.9065 y 0.4149 mmol g⁻¹ de Cu⁺², respectivamente.

Palabras clave: Adsorción, esponjas de PDMS, Cobre, dureza, porosidad, ángulo de contacto.

2. Introducción

La presencia de metales pesados (MP) en el agua se ha convertido en una problemática global dado a que estos son absorbidos por plantas y animales, acumulándose en los organismos vivos y alterando el ecosistema.^{1,2} A medida que aumenta la demanda tecnológica, la concentración de MP en el agua potable ha superado los límites recomendados por las regulaciones de todo el mundo. Es sabido que la exposición a MP ocurre como resultado del uso de estos metales en una variedad de procesos industriales y/o una variedad de materiales, incluidos pigmentos de color y aleaciones. Una serie de efectos adversos sobre el metabolismo humano ha resultado de la exposición a agua potable contaminada con MP, demostrándose en diversos estudios su habilidad cancerígena, mutagénica, y su efecto negativo sobre la actividad enzimática y de algunos neurotransmisores e incluso se reportan casos donde inducen la muerte neurológica y endocrina.^{2,3} En México la regulación de la concentración de metales está dictada por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 para agua de uso y consumo humano y la NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales (Tabla 1).

Las técnicas tradicionales para la remoción de metales pesados incluyen las siguientes: precipitación química, intercambio de iones, filtración por membrana, coagulación-floculación, flotación, métodos electroquímicos y adsorción⁴. Sin embargo, la mayoría de estos métodos a excepción de la adsorción se ve limitado en la remoción de MP a concentraciones bajas. Estudios previos han mostrado que la síntesis de materiales adsorbentes con grupos funcionalizados resultan ser una gran alternativa dado a su buen rendimiento y viabilidad económica más promisorio^{1,5}. Algunos de los materiales mayormente estudiados para la adsorción son las zeolitas, criogeles, polímeros y celulosa, la eficiencia de estos depende de sus propiedades físicas y químicas como resistencia y capacidad de adsorción¹.

Tabla 1. Límites permisibles de algunos MP en agua para consumo Humano y aguas para descargas residuales¹.

Metal	Consumo Humano	Ríos, arroyos, canales, drenes*	Embalses, lagos y lagunas*	Zonas Marinas Mexicanas*
Arsénico	0.025	0.4	0.2	0.4
Cobre	2.00	6	6	6
Cadmio	0.005	0.4	0.2	0.4
Plomo	0.01	0.4	0.4	1
Níquel	0.07	4	4	4

*Mediciones de concentración en mg/L. **Límite para tomas instantáneas.

Uno de los materiales más prometedores para la adsorción de metales pesados a bajas concentraciones son las esponjas de PDMS, un polímero a base de una cadena de Si-O-Si, el cual cuenta con propiedades favorables como su flexibilidad, robustez, alta estabilidad térmica y biocompatibilidad. Además, es químicamente inerte, siendo utilizados especialmente en entornos hostiles y variables.⁶ Se puede incrementar su capacidad de adsorción mediante la modificación con grupos funcionales orgánicos especialmente el grupo amino, estos se incorporan en el polímero para producir materiales híbridos con propiedades distintas^{7,8}.

Se ha demostrado que los grupos amino al añadirse a la estructura del siloxano hacen que los polímeros sean anfífilicos⁸, los cuales son de gran eficiencia para remover MP ya que la presencia de los ligantes quelantes de -N: permiten la coordinación con iones.⁹ Por mencionar Luana A. R. Giusto y col⁷, realizaron la modificación de esponjas a partir del uso de Sylgard 184 las cuales se funcionalizaron con grupos amino para remover Cobre(II) utilizando el bicarbonato de amonio como template. Sin embargo, la adición de estos grupos, así como las distintas relaciones estequiométricas, varían las propiedades físicas, por ejemplo, si se añade una mayor proporción del reticulante se obtiene una composición líquida viscoelástica, lo que implica que no se ha superado el umbral de gelificación. En casos contrarios, se pueden obtener esponjas muy rígidas.⁶ En este artículo se propone el uso de esponjas de PDMS modificándolas con grupos amino. Asimismo, se prueba la capacidad de adsorción de Cobre (II) mediante la cuantificación por espectroscopia UV-vis.

3. Materiales

Se emplearon esponjas de PDMS funcionalizadas con ligantes aminos, las cuales fueron sintetizadas en nuestro artículo previamente reportado. Como resumen, se decidió usar las esponjas; 2:1:4 y 5:1:4 de Cond. en template de azúcar y sal, 2:1:0.5 de Cond. por emulsión, 1:2:4 de Hy en template de azúcar y sal (50:50) y 1:1:1:1 de AMHy. para el estudio de adsorción de cobre(II).

4. Metodología

La caracterización de las esponjas se llevó a cabo mediante diferentes técnicas con el fin de estudiar el cambio de las propiedades en relación con las diferentes relaciones volumétricas de cada formulación.

1.1 Caracterización de las esponjas

I. Porosidad.

La superficie de las esponjas fue analizadas mediante el microscopio óptico de luz transmitida "VELAB" ISO 9001:200. Se empleó un aumento de 0.8X y 0.7X. El análisis morfológico se realiza colocando la esponja a analizar bajo la lente del microscopio y ajustando la intensidad de la luz de estos, lo cual permitió que se

¹ Elaborada con datos extraídos del DOF.

apreciara la porosidad de la muestra. El software con la que se tomaron las imágenes de la esponja fue “MiCam” el cual se calibró antes de iniciar el análisis.

II. Dureza.

Se realizó la prueba de dureza de Brinell mediante un durómetro “PHT-2500”, la cual se basa en el impacto de una esfera de acero endurecido (balín) en la superficie del material. Las mediciones se realizaron por triplicado y se obtuvo un promedio de los datos obtenidos.

III. Ángulo de Contacto.

Se empleó la prueba de la gota sésil para obtener el valor de ángulo de contacto de las esponjas. Aplicando técnicas fotográficas y mediante “ImageJ”, se evaluaron los ángulos de contacto de cada imagen. Las mediciones se realizaron por triplicado y se obtuvo un promedio de los datos obtenidos.

1.2 Pruebas de adsorción de Cobre.

Los análisis de adsorción de cobre se realizaron en un espectrofotómetro de UV-Vis “Lamda 40” el cual fue calibrado previo a su utilización con una lámpara de óxido de Homio y celdas de densidad neutra de 10%, 20% y 30%. La metodología para las pruebas de adsorción fue la siguiente: se preparó una solución madre de CuCl_2 20mM, se ajustó a un pH de 5 formándose $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Se colocaron vasos con diferentes tiempos (1h, 8h, 16h, 24h, 36h y 72h) en los cuales en cada uno se adicionó 50 mL de la solución madre. Posteriormente, se adicionaron las esponjas, las cuales presentaron un peso en un intervalo de 0.18-0.23 g, dejando el experimento bajo agitación constante. Después se tomaron alícuotas de 1 mL de la solución para los diferentes tiempos seleccionados, enseguida la esponja se retiró, se exprimió y se metió a secar por 24 h a una temperatura de 70°C. Para posteriormente pesar y obtener la cantidad de Cobre(II) retenido. Por otro lado, para el análisis de absorbancia se diluyeron las muestras y por medio de la curva calibración se obtuvo la concentración de cobre presente. Finalmente por factor de dilución se determinó la concentración real de las alícuotas para reportar la cantidad de moles adsorbidos por gramos de esponja .

5. Resultados y Discusión

I. Porosidad

La Figura 1 muestra el análisis morfológico de las esponjas sintetizadas por Cond., se observa un mejor acomodo de los poros en forma y tamaño en las esponjas con template de azúcar modificadas en comparación con su similar no modificada. Mientras que la porosidad en las esponjas de template de sal no existe una diferencia apreciable en el acomodo de poros en sus similares de proporción volumétrica, sino que, la forma de incluir los granos de sal al elastómero pudo influir al que exista una mayor cantidad de poros conectados en la esponja (Figura1- e). Por otro lado, al crear la porosidad con una técnica de emulsión en la imagen *i y j* (Figura 1) ésta es prácticamente nula, en su lugar, se observan conglomerados. Por el contrario, en la esponja sintetizada por el método de AMHy en la imagen *a y b* (Figura 2) muestra la mejor uniformidad en el tamaño y en el acomodo de los poros. En el caso de la síntesis por hidrosililación la porosidad se aprecia amorfa en la esponja modificada, mientras que la esponja sin modificación no muestra porosidad. Podemos inferir que las esponjas sometidas a la modificación presentan una porosidad más definida, lo que indicaría que la funcionalización es el responsable de esta uniformidad de poros.

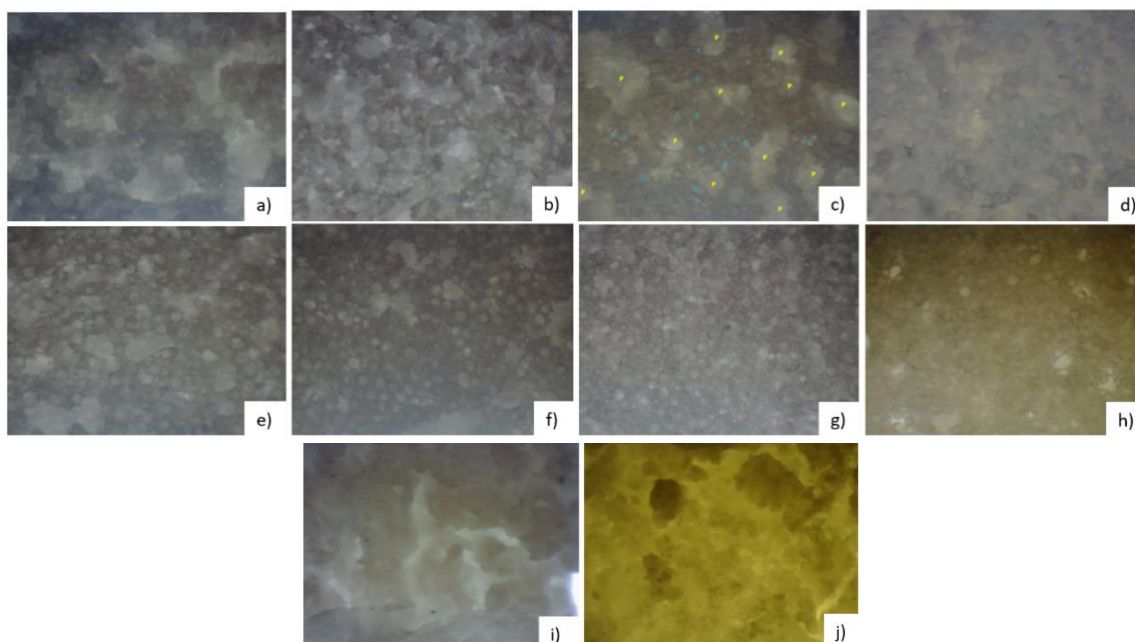


Figura 1. Microscopia óptica de esponjas sintetizadas por Cond. en relación volumétrica y template: (a) 2:1 azúcar, (b) 2:1:4 azúcar, (c) 5:1 azúcar, (d) 5:1:4 azúcar, (e) 2:1 sal, (f) 2:1:4 sal, (g) 5:1 sal, (h) 5:1:4 sal, (i) 2:1 emulsión, (j) 2:1:0.5 emulsión.

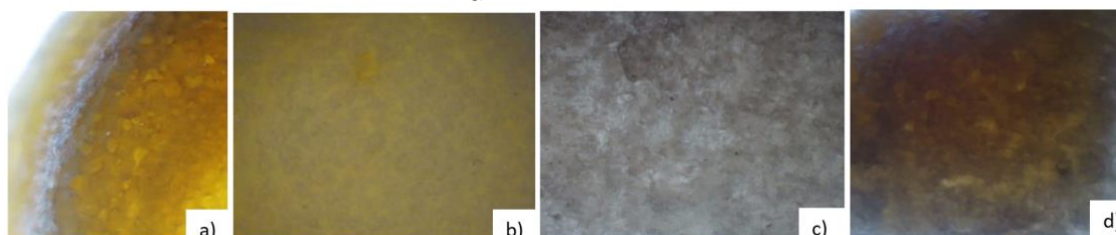


Figura 2. Microscopia óptica de esponjas sintetizadas por (a) AMHy en emulsión (b) AMHy en emulsión con aumento 0.7X (c) Hy 1:2 en template de azúcar y sal (50:50), (d) Hy 1:2:4 en template de azúcar y sal (50:50)

II. Dureza.

En las Figuras 3 y 4 se presentan los valores de dureza para cada esponja elaborada. De acuerdo con los datos obtenidos se corroboró que la proporción de reactivos influye en sus propiedades mecánicas, ya que al añadir una mayor cantidad de reactivo reticulante la dureza disminuye tal como se muestra en estudios previos, se observa este fenómeno en superficies de PDMS con una relación 10:1 a 10:3¹⁰. Por ejemplo, para la esponja de condensación por emulsión con una relación 2:1 la dureza que presenta es 160.25 contra la 2:1:0.5 que presentó 107.625. Esta tendencia, tiene excepciones como por ejemplo 5:1 contra 5:1:4 o 1:1 contra 1:1:4, donde se obtienen 63.66, 87.20, 53.4 y 89 de dureza respectivamente, las cuales pueden ser debidas a errores por la falta de un durómetro específico para elastómeros.

Por otro lado, la generación de poros influye en la dureza del elastómero, partiendo de los diferentes templates. Lo anterior se puede observar con las esponjas sintetizadas por condensación en una relación 5:1 que presentaron la dureza de 63.66 al emplear template de azúcar, 86 al usar sal y 92.16 de dureza al usar el template de azúcar/sal. También es observado entre la relación 2:1 con template de azúcar con una dureza de 83.85 comparado con la que usa emulsión y que posee 160.25, cuando hay un tamaño de poro menor, la dureza aumenta en comparación con una distribución de poro más grande. También podemos inferir que la introducción de los grupos amino, produce un descenso en el valor promedio medido de dureza, observado en las esponjas de hidrosililación en la relación 1:2 con 89.83, se disminuye hasta 80 en la relación 1:2:4, fenómeno que también se repite en las esponjas de condensación, pero hay excepciones como ya se aclaró. Aza-Michael (AMHy) es un caso particular e interesante, ya que presenta emulsión (que aumenta la dureza

al disminuir el tamaño de poro) y una mayor cantidad de grupos amino (debido a los reactivos utilizados), se midió un valor de 73.6, por lo que es comparable con otras esponjas por emulsión como por ejemplo 2:1:0.5 por condensación, donde el valor fue de 107.625.

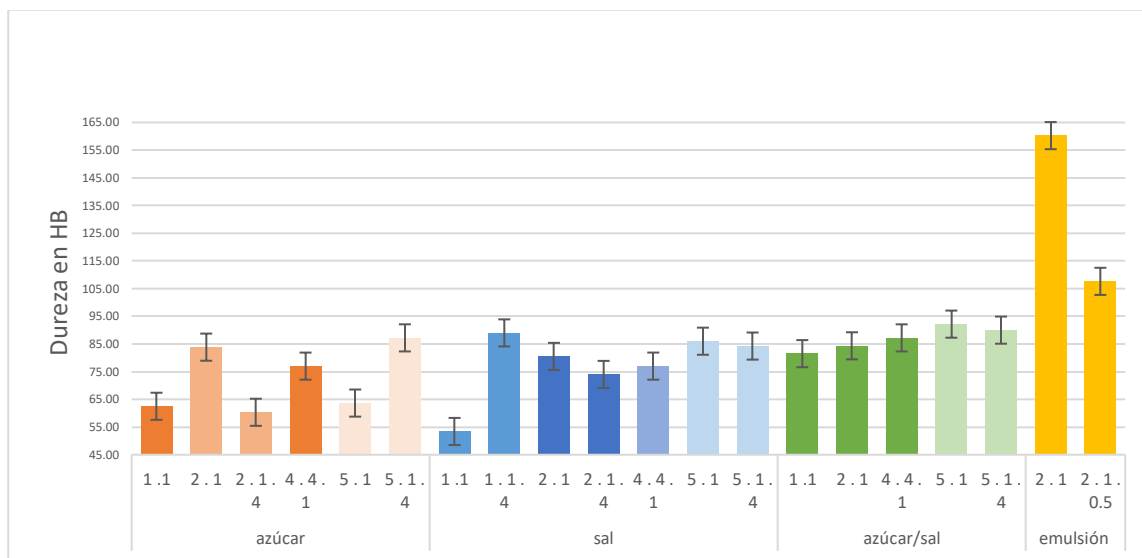


Figura 3. Dureza promedio medida en HB para las esponjas de Condensación, la relación volumétrica es por (PDMS-OH: TEOS: APTES)

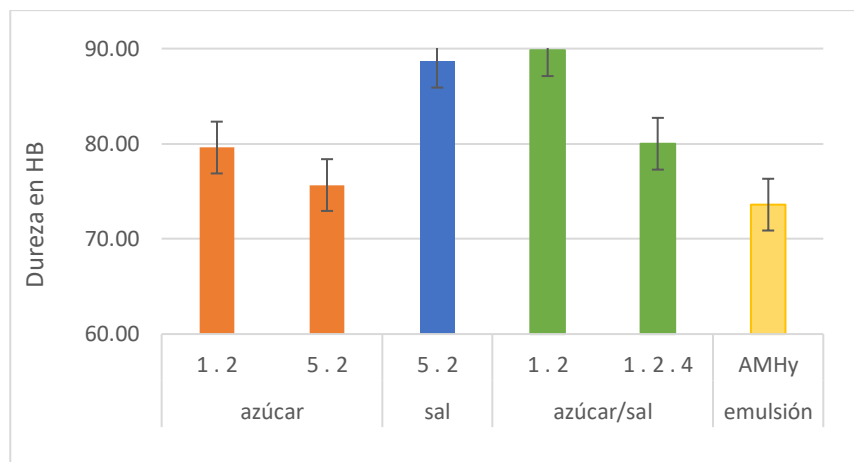


Figura 4. Dureza promedio medida en HB para las esponjas de Hidrosililación, la relación volumétrica es por (PDMSV: PDMSH: Alilamina).

III. Ángulo de Contacto.

Las mediciones del ángulo de contacto permitieron obtener datos del carácter hidrofóbico/hidrofílico de la superficie de las esponjas. En la figura 5 y 6 se puede observar que las esponjas, conforme aumenta el volumen de PDMS-OH en la formulación, el ángulo de contacto aumenta. Por ejemplo, la relación 5:1 azúcar versus la relación 2:1 exhibieron un ángulo de 97.75° y 95.33° respectivamente. Los resultados obtenidos están en concordancia con trabajos ya realizados, donde se reporta que el PDMS tienen por sí solo 105° de ángulo de contacto, es decir es hidrófobo.¹¹ Esta característica se puede modificar al añadir grupos funcionales hidrofílicos, como las aminas. Por ejemplo, se tiene registrado que el entrecruzamiento de PDMS-APTES presenta un ángulo de contacto de 79°.¹² Lo anterior es evidente para la esponja sintetizada por (Hy)

usando Azúcar y Sal como template, al disminuir su ángulo de 106.20° a 90.30° cuando es funcionalizada (1:2:4). De igual forma para la esponja de (AMHy) se muestra el menor valor medido en el ángulo de contacto, correspondiente a 50.95° . Sin embargo, las esponjas sintetizadas por condensación presentaron una tendencia inversa, lo cual puede deberse a la distribución del poro como efecto de los diferentes procesos de entrecruzamiento tal y como se ve en las micrografías (Figura 1 y 2), y no precisamente porque no estén funcionalizadas, ya que en el análisis de TGA mostrado en nuestro artículo anterior es evidente que estos materiales han sido modificados con los grupos amino.

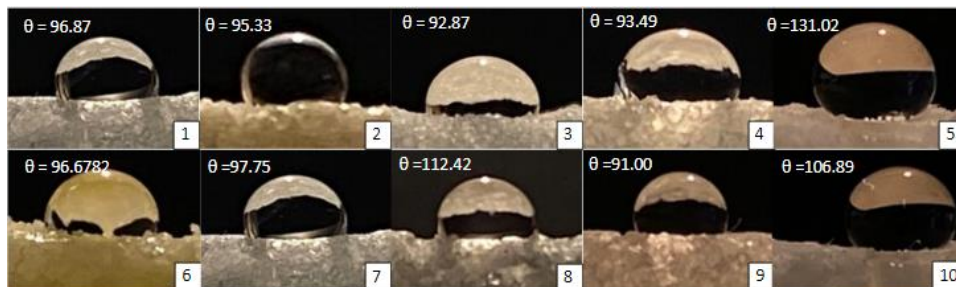


Figura 5. Gota de agua sobre esponjas sintetizadas por Condensación, y con relación volumétrica (PDMSOH: TEOS: APTES), (1) 2:1 Azúcar, (2) 2:1:4 Azúcar, (3) 2:1 Sal, (4) 2:1:4 Sal, (5) 2:1 Emulsión Adición, (6) 2-1-0.5 Emulsión, (7) 5:1 Azúcar, (8) 5:1:4 Azúcar, (9) 5:1 Sal, (10) 5:1:4 Sal.

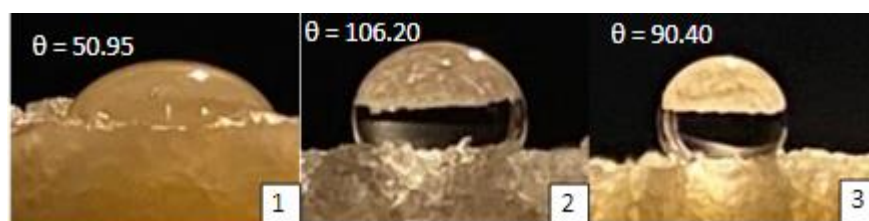


Figura 6. Ángulo de contacto sobre esponjas sintetizadas por (1) Hidrosililación -Aza Michael usando emulsión, y por Hidrosililación con relación volumétrica (PDMSV: PDMSH: Alilamina), (2) 1:2, (3) 1:2:4 usando Azúcar y Sal como template.

1.3 Pruebas de adsorción de Cobre

De acuerdo con el análisis realizado por espectroscopía UV-Vis se determinó la concentración de adsorción de cobre por las esponjas sintetizadas a diferentes proporciones volumétricas. En las Figuras 8 y 10 se muestra que las esponjas después de ser sometidas al proceso de adsorción de cobre adquieren una mayor coloración azul al aumentar el tiempo de exposición, lo cual indica que los materiales tienen capacidad de adsorber Cu(II). Sin embargo, al observar los datos obtenidos la adsorción no tiene un incremento lineal.

Por ejemplo, en la Figura 7 se presentan los datos de la cinética de adsorción de las esponjas a distintos intervalos de tiempo, se observa que aquellas que fueron sintetizadas Cond. en relación 2:1:4 con template de azúcar el valor de la adsorción no presenta una variación significativa de 1 hora a 8 horas, pero a partir de las 24 horas la adsorción incrementa lentamente. En cambio, la esponja con template de sal mostró un incremento significativo en cada variación de tiempo, siendo el valor de adsorción obtenido a una hora a 0.2456 mmol mientras que a 36 horas se obtuvo a 0.9065 mmol.

De manera general, se presenta una mayor adsorción en las esponjas que tienen template de sal, mientras que en las que tienen una porosidad por emulsión y template de mezcla azúcar/sal los valores son parecidos. Esto se explica con el tamaño y la distribución de poro influyen directamente en la adsorción.

Por otro lado, en la figura 9 se muestra que para la esponja de Hy 1:2:4 los valores de adsorción no tienen variaciones significativas para un intervalo de 8 a 36 h y que a su vez son mayores a los obtenidos en la

esponja de AMHy, por ejemplo, a 36h se tiene en Hy y AMHy una adsorción de 0.3837 y 0.1832 mmol g⁻¹ de Cu²⁺ respectivamente.

Finalmente, en las figuras 7 y 9 los valores obtenidos a 72h se ven disminuidos lo cual se debe a que no se tomó en cuenta el cambio de concentración de la solución derivado de la disminución del volumen por evaporación.

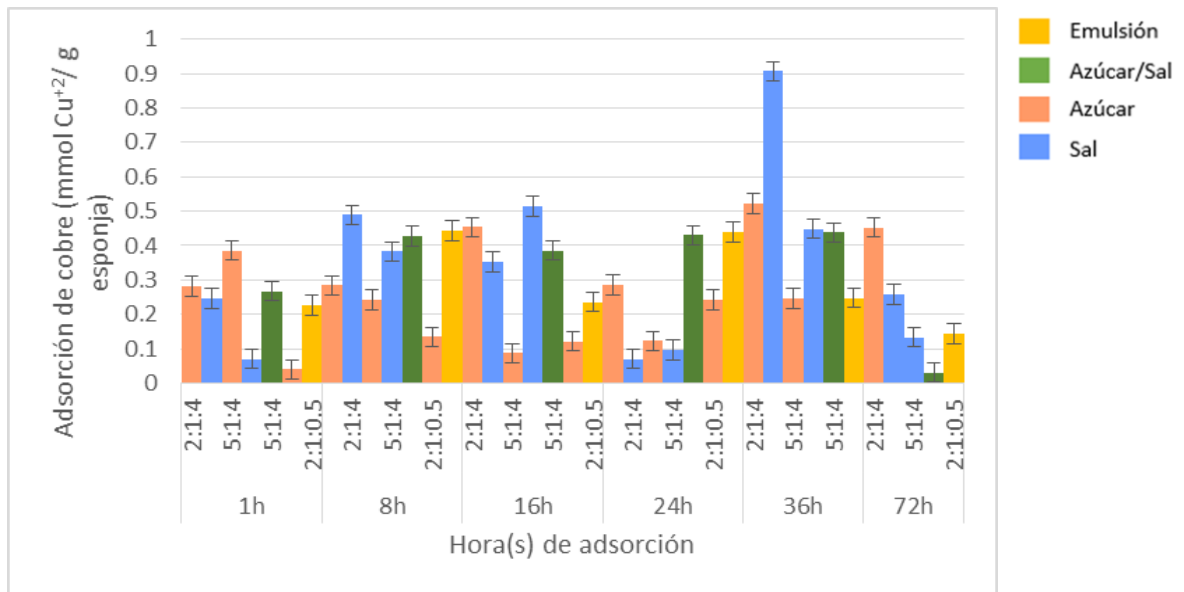


Figura 7. Adsorción de cobre por cada gramo de esponja promedio para cada una de las esponjas sintetizadas por Cond.



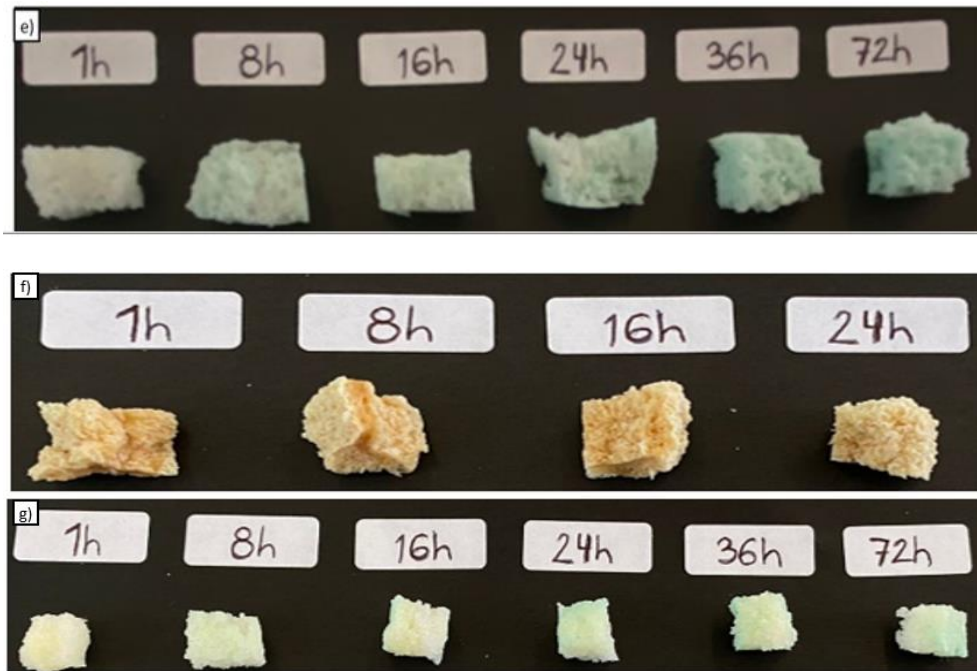


Figura 8. Esponjas sintetizadas por condensación después del proceso de adsorción de cobre a) 2:1:4 azúcar b) 2:1:4 sal c) 5:1:4 azúcar d) 5:1:4 sal e) 5:1:4 azúcar/sal f) 2:1:0.5 azúcar g) 2:1:0.5 emulsión con punta ultrasónica

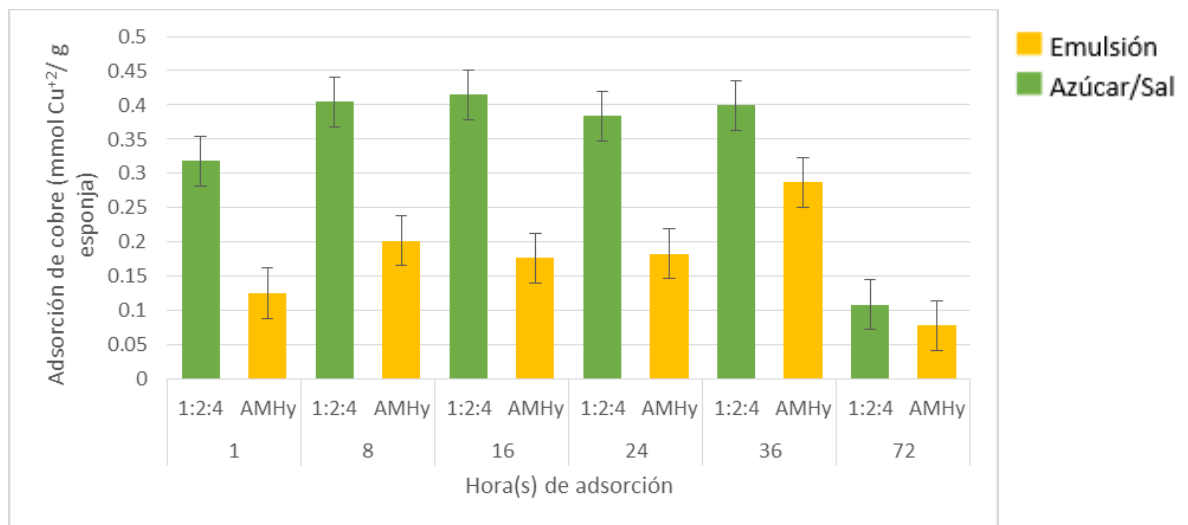


Figura 9. Adsorción de cobre por cada gramo de esponja promedio para las esponjas sintetizadas por Hy y AMHy



Figura 10. Esponjas sintetizadas después del proceso de adsorción de cobre h) 1:2:4 hidrosililación azúcar/sal i) AMHy emulsión

6. Conclusiones

Por medio de esta investigación se pudo comprobar la eficiencia de las esponjas de PDMS funcionalizadas con aminas para la adsorción de Cobre (II), determinando que la proporción de los reactivos, así como el tamaño y la distribución de los poros influyen directamente en su capacidad de adsorción. Las esponjas que mostraron tener una mayor eficiencia de adsorción fueron la 2:1:4 por condensación y 1:2:4 por hidrosililación con una adsorción máxima de 0.9065 y 0.4149 mmol g⁻¹ de Cobre (II) respectivamente. Estos datos indican que se obtuvo una mayor adsorción en comparación a los 0.6mmol g⁻¹ reportados por Luana A. R. Giusto, y col., en donde también se emplearon esponjas de PDMS. Lo anterior se puede relacionar debido a la presencia de una mayor proporción de grupos amino en las esponjas del presente trabajo.

Si bien se comprobó que las esponjas logran adsorber Cobre (II) y pueden ser una alternativa efectiva para el tratamiento de las aguas residuales en metales pesados. Es necesario tomar en cuenta los parámetros que podemos cambiar para llevar un mejor control de los resultados como por ejemplo reducir la pérdida de volumen de agua, mediante un sistema de agitación cerrado, también se podría agregar un sistema de flujo continuo, dentro de un tanque, para simular los procesos llevados a cabo en la industria pero a pequeña escala, se puede además explorar otras técnicas y su conjunción con la adsorción con esponjas de PDMS, es decir, integración de procesos, etc.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Gustavo Cruz Jiménez del Departamento de Farmacia, DCNE-UG, por su apoyo con el equipo FTIR-ATR, al Laboratorio de Análisis Instrumental "Q. Fernando de Jesús Amézquita López" por permitirnos el uso del equipo de espectroscopia de UV visible, 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 el uso del microscopio óptico, a la Q. Isela Castro Becerra del Laboratorio de Termoanálisis por los estudios de TGA, a la Dra. Rosalba Fuentes Ramírez por permitirnos el uso del durómetro, 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. Por último, agradecemos el tiempo, el apoyo y la disposición por enseñar de la M.C. Abygail Camacho Ramírez, que nos acompañó durante la realización de todo el proyecto y coordinó los espacios para realizar los análisis en los laboratorios mencionados.

8. Bibliografía/Referencias

- [1] Pissetti FL, Araújo PL, de, Silva FAB, Poirier GY (2014) Synthesis of poly(dimethylsiloxane) networks functionalized with imidazole or benzimidazole for copper(ii) removal from water. *J Braz Chem Soc* 26:1–7. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140264>
- [2] Kim, J. J., Kim, Y. S., & Kumar, V. (2019). Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies. In *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* (Vol. 54, pp. 226–231). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.05.003>
- [3] Fu, Z., & Xi, S. (2020). The effects of heavy metals on human metabolism. In *Toxicology Mechanisms and Methods* (Vol. 30, Issue 3, pp. 167–176). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>
- [4] Fenglian Fu, Qi Wang. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, Volume 92, Issue 3, 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- [5] Caviades Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- [6] Mazurek, P., Vudayagiri, S., & Skov, A. L. (2019). How to tailor flexible silicone elastomers with mechanical integrity: a tutorial review. *Chemical Society Reviews*, 48(6), 1448–1464. <https://doi.org/10.1039/c8cs00963e>
- [7] Giusto, L. A. R., & Pissetti, F. L. (2021). Polydimethylsiloxane amino functionalized sponge for adsorption of copper in water. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 99(1), 243–251. <https://doi.org/10.1007/s10971-021-05538-6>
- [8] Chechelska-Noworyta, A., Owińska, M., & Hasik, M. (2019). Hydrosilylation of nitrogen-containing organic compounds: Model studies. *Journal of Organometallic Chemistry*, 898. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2019.07.017>
- [9] Chen JH, Huang YH (2016) Efficient adsorption of copper ion from aqueous solution by amino-functionalized porous eggshell membrane. *Desalin Water Treat* 57:12178–12191. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1049555>
- [10] Carrillo Serna, A., GonzálezSuárez, É., Correa-Guerra Michelle, Sanchez Saldaña, F., Ramírez Cruz, K., Camacho Ramírez, A., & Guerra Contreras, A. (2023). Functionalization of PDMS sponges with organic ligands by different synthesis methodologies. *Jóvenes En La Ciencia UGTO*.
- [11] Mark, J.E., Sun, C.C. Polymer-modified silica glasses. *Polymer Bulletin* 18, 259–264 (1987). <https://doi.org/10.1007/BF00255119>
- [12] Kim, H. T., Jeong, O. C (2011). PDMS Surface Modification Using Atmospheric Pressure Plasma. *Microelectronic Engineering* 88 (8), 2281–2285. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.02.084>
- [13] Cetina Medina A. M. (2016). “Síntesis y caracterización de polímeros híbridos para su aplicación potencial en la extracción con barras de agitación”. Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.