

Síntesis de nanocompositos basados en celulosa y plata nanoestructuradas Synthesis of nanocomposites based on nanostructured cellulose and silver

B. Portillo-Rodríguez ^{a,*}, E. M. Barrera-Rendón ^a, D. A. Solís-Casados ^a, M. Reyes-Reyes ^b, L. Escobar-Alarcón ^c

^a Universidad Autónoma del Estado de México, Laboratorio de Nanotecnología, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM, Carretera Toluca-Atlacomulco Km 14.5, San Cayetano, 50200, Toluca, Estado de México, México.

^b Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Álvaro Obregón 64, San Luis Potosí 78000, Mexico.

^c Departamento de Física, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carr. México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, Edo. de México, C.P. 52750, México.

Resumen

Este trabajo reporta la extracción y purificación de fibras de celulosa (FC) a partir de desechos de sargazo y nopal, empleadas en la síntesis de nanofibras de celulosa (NFC) que fueron impregnadas con nanopartículas de plata (NPs-Ag), para formar nanocompositos (NPs-Ag/NFC). Las FC se obtuvieron utilizando hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio y ácido acético, disminuyendo la generación de residuos tóxicos. Las NFC se sintetizaron mediante el método TEMPO y las NPs-Ag por ablación láser en agua. Los resultados confirmaron la viabilidad de obtener NFC a partir de dos desechos, con algunas variaciones en sus propiedades físicas y químicas dependiendo de la fuente utilizada. Los nanocompositos obtenidos a partir de sargazo con 5.0% en peso de plata mostraron una energía de transición en la banda prohibida de 2.9 eV, así como estabilidad en medio acuoso, lo que sugiere su potencial aplicación como fotocatalizadores para el tratamiento de aguas contaminadas.

Palabras Clave: celulosa, nanocelulosa, NPs-Ag.

Abstract

This work reports the extraction and purification of cellulose fibers (FC) from sargassum and nopal waste, used in the synthesis of cellulose nanofibers (NFC) that were impregnated with silver nanoparticles (NPs-Ag) forming nanocomposites (NPs-Ag/NFC). The FC were obtained using sodium hydroxide, sodium hypochlorite and acetic acid, diminish the generation of toxic wastes. The NFCs were synthesized by the TEMPO method and the NPs-Ag by laser ablation in water. The results confirmed the viability of obtaining NFC from two wastes, with some variations in their physical and chemical properties depending on the source used. The nanocomposites obtained from sargassum with 5.0 wt% of silver showed an energy transition in the bandgap of 2.9 eV, as well stability in aqueous medium, which suggests their potential application as photocatalysts for the treatment of polluted waters.

Keywords: cellulose, nanocellulose, Ag-NPs.

1. Introducción

La eliminación de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales representa un desafío ambiental que demanda soluciones. Para atender esta problemática, se han empleado varias técnicas de tratamiento, como las biológicas, la filtración, la coagulación, la adsorción y la fotocatalisis.

Se ha reportado que las fibras de celulosa (FC) poseen una excelente capacidad para adsorber diversos contaminantes del agua, como metales pesados y compuestos orgánicos (Zhou et al., 2020); se ha mostrado que las nanofibras de celulosa (NFC), además de incrementar la eficiencia en la remoción de

contaminantes presentan una mejor resistencia mecánica como flexibilidad y maleabilidad (Huang et al., 2015), permitiendo un mejor manejo del nanomaterial, sobretodo en la etapa de su recuperación, lo cual también permite su reutilización, resultando un nanomaterial prometedor para esta aplicación (Fahma et al., 2021). Adicionalmente, se ha reportado que la incorporación de nanopartículas metálicas (oro, cobre, y níquel) a las NFC confiere al material propiedades desinfectantes (Aziz et al., 2015; Hoang et al., 2020). Es importante mencionar que las nanopartículas de plata (NPs-Ag) presentan propiedades catalíticas, lo que sugiere que un nanocomposito formado por nanopartículas de plata

*Autor para la correspondencia: benportiyor@gmail.com

Correo electrónico: benportiyor@gmail.com (Benjamín Portillo-Rodríguez), nefertiti_06@hotmail.com (Eva Montserrat Barrera-Rendón), luis.escobar@inin.gob.mx (Luis Escobar-Alarcón), reyesm@iico.uaslp.mx (Marisol Reyes-Reyes), solis_casados@yahoo.com.mx (Dora Alicia Solís-Casados)

Historial del manuscrito: recibido el 26/09/2024, última versión-revisada recibida el 05/11/2024, aceptado el 11/11/2024, publicado el 12/12/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13702>



soportadas en las nanofibras de celulosa (NPs-Ag/NFC) tendría el potencial para eliminar contaminantes del agua tanto por adsorción como por fotocatalisis.

Las FC se pueden obtener a partir de desechos orgánicos, como el nopal y el sargazo, el primero se caracteriza por su alto porcentaje de desperdicio, superior al 50% (SAGARPA, 2015), y el segundo es un contaminante, que causa contaminación visual y ambiental (SEMARNAT, 2021). Vale la pena mencionar que el uso de desechos y/o residuos orgánicos para la síntesis de NFC, promueve un manejo sostenible de materiales considerados desechos, contribuyendo a la reducción de la contaminación y fomentando la economía circular. El presente trabajo propone la síntesis de un nanocomposito formado por nanopartículas de plata soportadas en nanofibras de celulosa que podrían tener aplicaciones potenciales para la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en el agua mediante fotocatalisis.

2. Experimental

2.1. Materiales

Se utilizaron los siguientes reactivos sin un proceso de purificación previo: Hidróxido de Sodio ($\text{NaOH} \geq 99.8\%$, CTR Scientific), 2-2-6-6-tetrametilpiperidina-1-oxilo (TEMPO, SIGMA ALDRICH), Bromuro de Sodio ACS ($\text{NaBr} \geq 99.0\%$, PQM Fermont), Hipoclorito de Sodio ($\text{NaClO} \sim 11.0\%$) PQM Fermont, Ácido Acético ($\text{CH}_3\text{COOH} \sim 5.0\%$).

2.2. Obtención de Celulosa.

Las muestras de sargazo se expusieron al sol durante una semana, posteriormente, se tamizó para eliminar los gránulos finos de arena para proceder a lavarlas repetidamente con agua y jabón, secándolas nuevamente por 48h a 80°C , para finalmente triturarlas y almacenarlas. Las muestras de nopal se secaron exponiéndolas al sol durante un mes, sometiéndolas a los mismos pasos de lavado, secado, triturado y almacenamiento que el sargazo. Previo a su utilización, ambos precursores de celulosa (sargazo o nopal) fueron sometidos a un proceso de lavado químico para eliminar contaminantes como lignina y hemicelulosa; para este propósito se tomaron 5g de cada precursor y se colocaron en un matraz Erlenmeyer con 250 mL de una solución de NaOH al 5.0% en peso, y se sometieron a agitación constante por 2h a 80°C ; en el caso de las muestras obtenidas a partir de sargazo, posterior al primer lavado con NaOH, la solución presentó una coloración marrón oscuro, la cual se asoció a la eliminación parcial de lignina, por lo que se realizó un segundo lavado químico con NaOH para eliminar en su totalidad la lignina presente en estas muestras (Melro et al., 2020; Renuart et al., 2000). En el caso de las muestras provenientes de nopal se observó una coloración marrón más clara en el proceso de purificación indicativo de una menor cantidad de lignina.

Después del lavado químico, los precursores de celulosa se sometieron a un proceso de blanqueado, depositándolos en un matraz Erlenmeyer con una solución de 250 mL de NaClO al 2.0% y ácido acético al 0.1%, manteniéndolos en agitación constante durante 2h a 80°C . Al terminar el proceso de

blanqueado, las muestras fueron filtradas y purificadas por diálisis en agua desionizada, utilizando una bolsa de diálisis de peso molecular de entre 14,000 a 8,000, durante 48h, cambiando repetidamente el agua desionizada hasta que su pH se mantuvo constante.

2.3. Síntesis de nanofibras de celulosa (NFC).

La síntesis de las NFC se realizó depositando 1g de celulosa purificada y blanqueada en un matraz Erlenmeyer, al cual se le agregaron 250mL de agua junto con 0.5g de NaBr, 0.25g de TEMPO y 100mL de NaClO al 11.0%. La reacción se llevó a cabo durante 2h con agitación magnética. Durante todo el proceso se revisó frecuentemente el pH para mantenerlo entre 9.9-10.0 para lo cual se añadió por goteo NaOH 0.1M; al término de las 2h de reacción el precipitado se filtró y se purificó mediante diálisis siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

2.4. Síntesis de nanopartículas de plata (NPs-Ag).

Las NPs-Ag se obtuvieron por ablación láser, a partir de un disco de plata de alta pureza (99.99%) sumergido en 20mL de agua destilada. La ablación se realizó haciendo incidir pulsos de un láser de Nd:YAG con una longitud de onda de 1064 nm y 5 ns de duración del pulso trabajando a una frecuencia de repetición de 10 Hz durante 5 min. Para determinar la concentración de las NPs en el coloide obtenido, se pesó el disco de plata antes y después del proceso de ablación determinándose una concentración de [0.2mg/mL].

2.5. Síntesis de películas de NFC y de nanocompositos NPs-Ag/NFC.

Para la preparación de las películas de NFC, se tomaron varias muestras de 1 mL de la solución final de NFC purificada por diálisis y se depositaron en sustratos de teflón, los cuales fueron secados a 60°C durante 24 horas. Este procedimiento se realizó para determinar la concentración de NFC por mililitro de la solución que se ajustó a [2 mg/mL] con agua desionizada; la solución obtenida se colocó en una jeringa esterilizada de 10 mL y se filtró a través de filtros de teflón de 2.5 cm de diámetro y 5 μm de tamaño de poro. Para evitar que el nanocomposito se deformara durante el proceso de secado, el filtro de teflón junto con la película de NFC depositada fue prensado entre dos planchas de teflón calentando a 60°C durante 24h, obteniéndose películas de NFC de 10 mg.

Para la obtención de las películas de los nanocompositos (NPs-Ag/NFC), se siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente. Sin embargo, a la solución de NFC antes de ser vertida dentro de la jeringa, se le añadió la cantidad necesaria de NPs-Ag para obtener el nanocomposito con 5.0% en peso de NPs-Ag. La solución final se filtró a través de filtros de teflón de 2.5 cm de diámetro y 5 μm de tamaño de poro, y se secó entre dos planchas de teflón a 60°C durante 24h.

2.6. Caracterización.

2.6.1. Nanopartículas de Plata (NPs-Ag).

Las propiedades ópticas de las NPs-Ag se caracterizaron por espectroscopía ultravioleta visible (UV-Vis) en un equipo Perkin Elmer, lambda 35. Las dimensiones de las NPs-Ag fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) utilizando un microscopio de transmisión JEOL-2100 con filamento de LaB₆.

2.6.2. Caracterización de Celulosa, NFC y NPs-Ag/NFC.

Las fibras de celulosa, las NFC y los NPs-Ag/NFC fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), utilizando un microscopio JEOL JSM-6510LV con filamento de tungsteno, operado a 20Kv. Se caracterizaron también por espectroscopía de Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) en un equipo Bruker Tensor 27, con una fuente de Infrarrojo medio (MIR, por sus siglas en inglés) y con un accesorio de reflexión total atenuada (ATR, por sus siglas en inglés) modelo Bruker, Platinum con cristal de diamante, en un rango de medición de 4000 a 400cm⁻¹. La energía de banda prohibida fue determinada a partir de espectroscopía UV-Vis en el modo de reflectancia difusa (DRS, por sus siglas en inglés), en un equipo Perkin Elmer, lambda 35 con una esfera de integración. La morfología de las NFC se caracterizó mediante microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés), utilizando un equipo SPM Multimode marca Digital Instruments modelo AFM-4 en modo de contacto. Las imágenes AFM se procesaron utilizando el software WSXM. Así mismo, se obtuvieron imágenes de las NPs-Ag mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM).

3. Resultados y Discusión.

Al finalizar el proceso de lavado químico con NaOH se observó que, tanto las muestras de sargazo como las de nopal mantuvieron su forma inicial después del triturado sin cambios morfológicos evidentes. Sin embargo, durante el proceso de blanqueado, las muestras de sargazo experimentaron una transformación significativa, pasando de una morfología de hojuelas a una masa pastosa. Esta forma de pasta facilita la formación de las NFC ya que permite una mejor interacción de las FC con la molécula de TEMPO favoreciéndose la formación de las NFC.

En contraste, al finalizar el proceso de blanqueado, las NFC conservaron su estructura fibrosa, razón por lo que fue necesario extender el proceso de blanqueado al doble del tiempo (de dos a cuatro horas). Estos resultados iniciales revelaron las primeras diferencias entre las fuentes de celulosa utilizadas.

Para confirmar que el proceso de síntesis de las FC fue bien realizado, las FC obtenidas se caracterizaron mediante FTIR. En la Figura 1 se muestran los espectros de las FC obtenidas a partir de sargazo y nopal sin purificar (Figuras 1a y 1b, respectivamente), así como purificadas por diálisis (Figuras 1c y 1d, respectivamente). Estos espectros concuerdan con los reportados en la literatura, confirmando la obtención de las FC

(Agrebi et al., 2019; Joaquín et al., 2019). En el espectro correspondiente a las FC obtenidas a partir de sargazo no purificadas (Figura 1a) se observa un número mayor de señales, lo que indica contaminación debida a los precursores utilizados. En las muestras purificadas (Figuras 1b y 1d), las bandas en 1600 cm⁻¹ y 480 cm⁻¹ atribuidas a los grupos funcionales carboxilo (–COO) presentaron una mayor intensidad en las FC provenientes de nopal respecto a las de sargazo, lo que sugiere una mayor proporción de estos grupos funcionales en estas muestras.

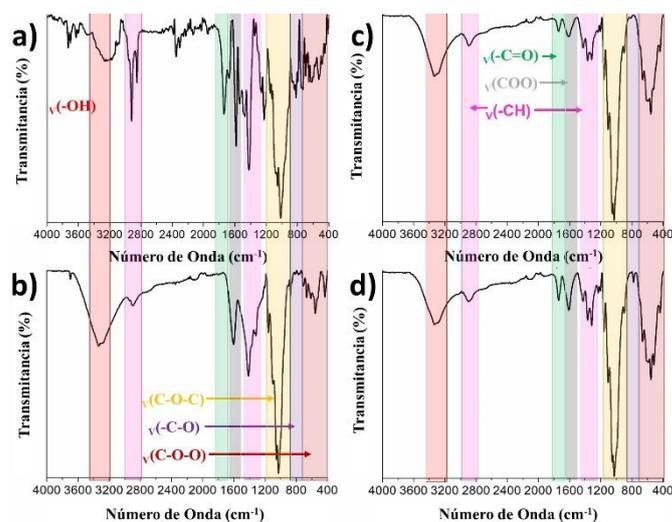


Figura 1. Espectros FTIR de las muestras de FC a partir de sargazo (a y b) y nopal (c y d) después de ser sintetizadas (a y c) y después de ser purificadas (b y d).

Las muestras de FC purificadas fueron utilizadas para ser sometidas al método de TEMPO con el propósito de obtener nanofibras de celulosa (NFC), observándose diferencias físicas entre las NFC obtenidas a partir de nopal y de sargazo. Las NFC sintetizadas a partir de FC de nopal no precipitaban, aún después de varios días de reposo, mientras que las NFC de sargazo lo hacían a las pocas horas como se puede apreciar en la Figura 2.

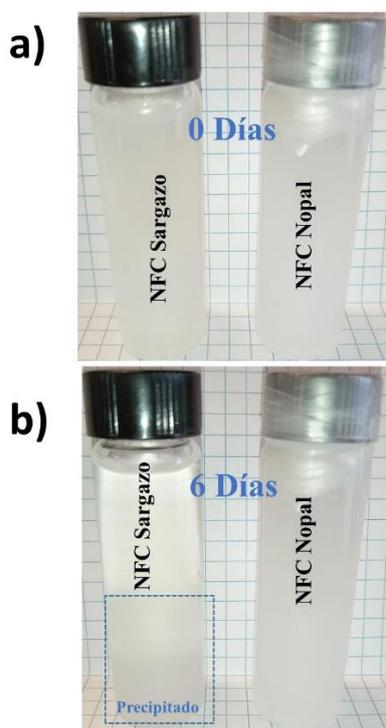


Figura 2. a) Solución de NFC recién realizado el proceso de purificación y b) después de seis días de reposo.

Para tratar de elucidar a que se debe esta diferencia en los tiempos de precipitación, las NFC fueron caracterizadas por FTIR y se compararon con los espectros FTIR de las FC correspondientes. En la Figura 3 se comparan los espectros FTIR de las FC (en negro) con las de las NFC (en azul) de cada una de las muestras. Se puede observar que los espectros FTIR de las muestras de NFC a partir de sargazo (Figura 3a), presentan bandas en 3250 cm^{-1} y 1400 cm^{-1} atribuidas a los grupos funcionales hidroxilo (-OH), descartándose la presencia de agua debido a que no está presente la banda en 1640 cm^{-1} asociada a agua fisisorbida (Fengel, 1993); se observa una disminución en la intensidad de las bandas en 3350 cm^{-1} atribuidas a las cadenas de carbono-hidrógeno (-CH) que indica una menor cantidad de estos grupos funcionales en las NFC provenientes de sargazo lo que sugiere una reducción en la estructura de la fibra. Adicionalmente, se aprecia un aumento en la intensidad de las bandas en 480 cm^{-1} correspondientes a los grupos funcionales (-COO), que podría atribuirse a una reducción en el tamaño de las fibras lo que favorecería una mayor libertad vibracional de estos grupos funcionales (Jonoobi et al., 2010).

En contraste, los espectros FTIR de las NFC provenientes de nopal (Figura 3b) no muestran un cambio notable en la intensidad de las bandas discutidas anteriormente; en este caso se observa un aumento en la intensidad de las bandas en 1750 y 1600 cm^{-1} , atribuidas a los grupos funcionales carbonilo y carboxilo respectivamente. Este comportamiento de las bandas relacionadas con grupos funcionales que contienen oxígeno podría explicar por qué las NFC de nopal no precipitan, ya que estos grupos funcionales promueven interacciones con el medio acuoso, favoreciendo la estabilidad de este coloide.

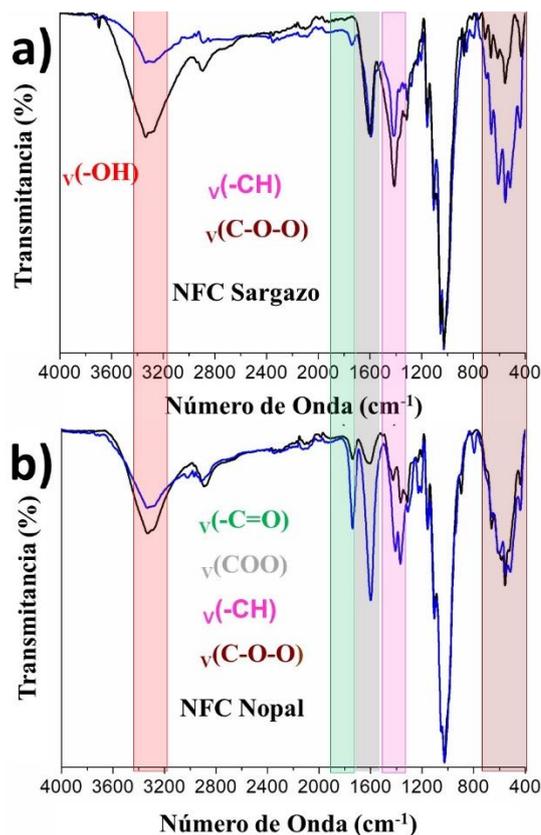


Figura 3. a) Espectros FTIR de las muestras de FC (negro) y NFC (azul) de sargazo purificadas, b) Espectros FTIR de las muestras de FC (negro) y NFC (azul) de nopal purificadas,

Para determinar las dimensiones de las FC y NFC obtenidas a partir de sargazo, estas muestras fueron caracterizadas mediante SEM y AFM respectivamente. En la Figura 4a, se muestra una micrografía de las FC obtenida por SEM en la que se puede observar claramente su morfología en forma de fibras con dimensiones de decenas de micrómetro. En la Figura 4b, se presenta una imagen de AFM de las NFC en la que se aprecian nanofibras de celulosa con grosores aproximados de 50 nm y longitudes de algunas μm . Estos resultados confirman que el proceso de síntesis utilizado es eficaz para la obtención de NFC.

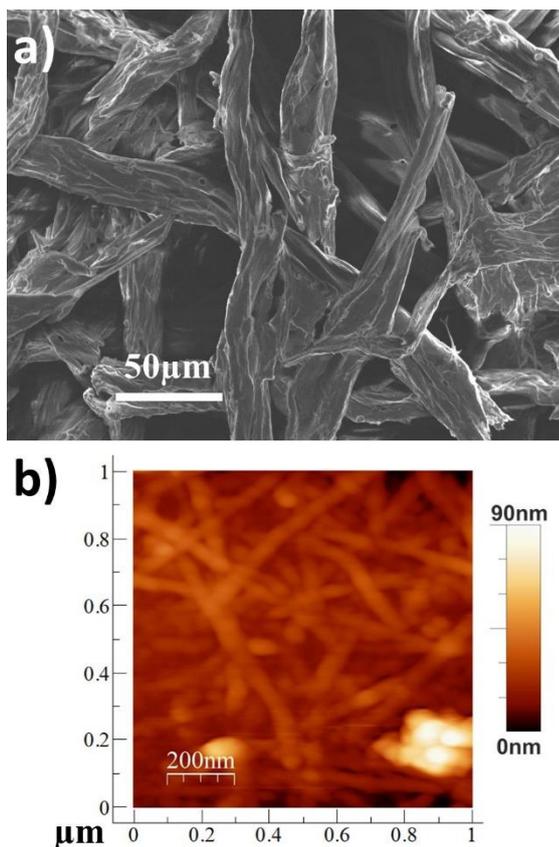


Figura 4. a) Imagen SEM de las FC, b) imagen AFM de las NFC de sargazo

Las NPs-Ag fueron caracterizadas por espectroscopía UV-Vis, observándose la presencia de una banda de absorción en 448 nm (Figura 5a) atribuida al plasmón de superficie de las NPs-Ag, indicativo de la presencia de partículas cuasi-esféricas con dimensiones nanométricas (Rafique et al., 2019), lo cual se confirma con la imagen de TEM mostrada en la figura 5b, así como con el histograma de tamaño de partícula que muestra un diámetro promedio de 12 nm.

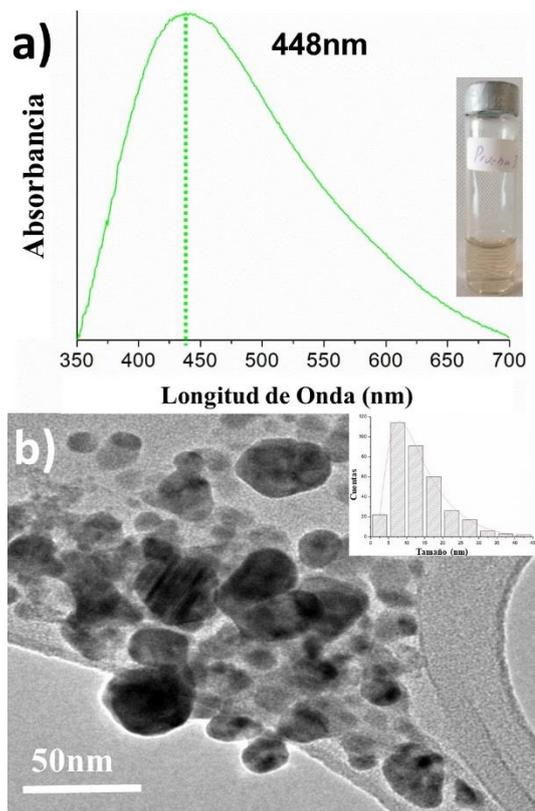


Figura 5. a) Espectro de absorción de las NPs-Ag obtenidas por ablación láser y b) Micrografía TEM e histograma de tamaños correspondientes de las NPs-Ag.

Los nanocompuestos formados por nanopartículas de plata soportadas sobre las nanofibras de celulosa (NPs-Ag/NFC) con 5.0% en peso de NPs-Ag fueron caracterizados mediante UV-Vis en el modo DRS. Los espectros de reflectancia fueron transformados al coeficiente de absorción (α) utilizando la función de Kubelka-Munk para calcular la energía de banda prohibida mediante el método de Tauc. La Figura 6 muestra los resultados obtenidos en los que se muestran las energías de banda prohibida determinadas para las muestras de NFC a partir de nopal y sargazo (Figura 6a y b respectivamente). En términos generales se obtiene un valor de aproximadamente 5.6 eV, en buen acuerdo con el reportado para la celulosa (Shanshool et al., 2016; Srivastava et al., 2020). Al incorporar las NPs-Ag a las NFC, aparece una nueva transición a ~ 2.8 eV (442.8nm) (Figura 6c y d), que corresponde de la región visible del espectro electromagnético. Esta se puede atribuir a la introducción de estados electrónicos por debajo de la banda de conducción debido a la presencia de las NPs-Ag. Este resultado sugiere que los nanocompuestos NPs-Ag/NFC podrían tener aplicaciones potenciales en fotocatalisis para eliminar contaminantes presentes en el agua.

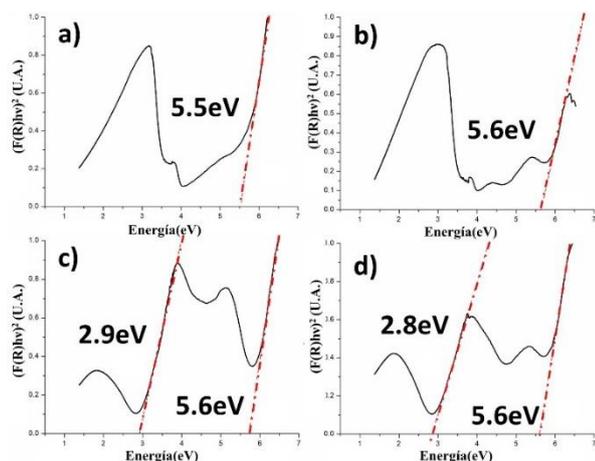


Figura 6. Gráficos de Tauc de NFC provenientes de a) nopal y b) de sargazo. Gráficos de Tauc de los nanocompositos a partir de NFC de c) de nopal y d) de sargazo.

Con el propósito de determinar la retención de las NPs-Ag soportadas en las NFC, los nanocompositos se sumergieron en agua durante 24h manteniéndolas en agitación continua. En la figura 7, se muestran los espectros de absorbancia del agua en que estuvieron sumergidos los nanocompositos. Como se puede observar en los espectros de la solución que estuvo en contacto con los nanocompositos con NFC a partir de sargazo (Figura 7a), no se observa ninguna señal, lo que indica que las NPs-Ag se lograron retener sobre las nanofibras de celulosa. Por el contrario, los espectros de absorbancia de la solución que estuvo en contacto con los nanocompositos preparados con NFC a partir de nopal (Figura 7b) muestran que a partir de las 2h aparece la señal debida al plasmón de superficie de la plata, indicando que las NPs de Ag se desprenden del soporte.

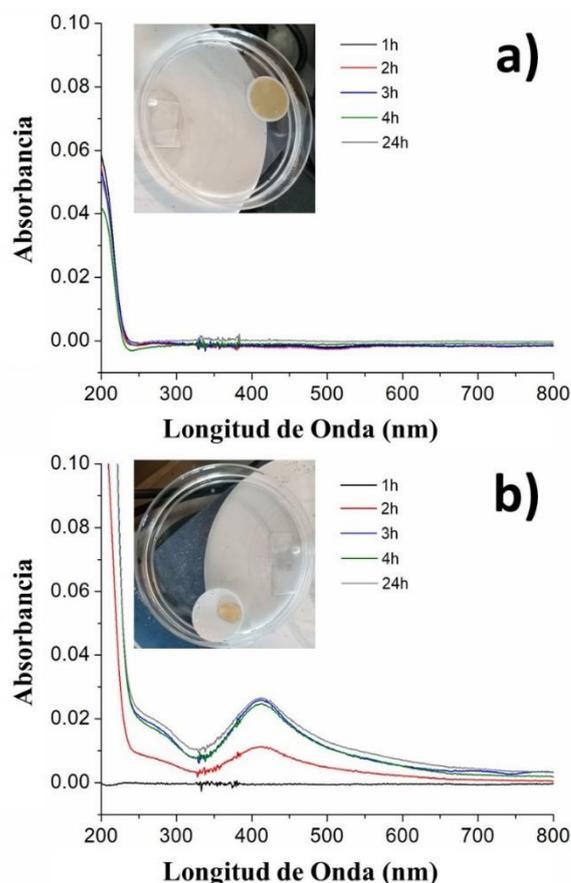


Figura 7. Espectros de absorbancia de: a) agua en contacto con los nanocompositos de NPs-Ag/NFC de sargazo y de b) agua en contacto con los nanocompositos de NPs-Ag/NFC de nopal.

Para tratar de elucidar la razón por la cual los nanocompositos provenientes de sargazo retenían a las NPs de Ag, éstos se caracterizaron mediante FTIR. En la Figura 8, se presentan los espectros FTIR del nanocomposito a partir de sargazo y de las NFC provenientes de nopal. Los resultados muestran una disminución en las bandas correspondientes a los grupos funcionales ($-C=O$), ($-COO$) y ($-CH$), que han sido asociados previamente con la dispersión de las NFC en medios acuosos (Solhi et al., 2023). Esta disminución sugiere una interacción directa entre las NPs-Ag y estos grupos funcionales de las NFC, lo que limita la dispersión del nanocomposito de sargazo en el agua. Como resultado, se facilita su aplicación en la eliminación de contaminantes en medios acuosos.

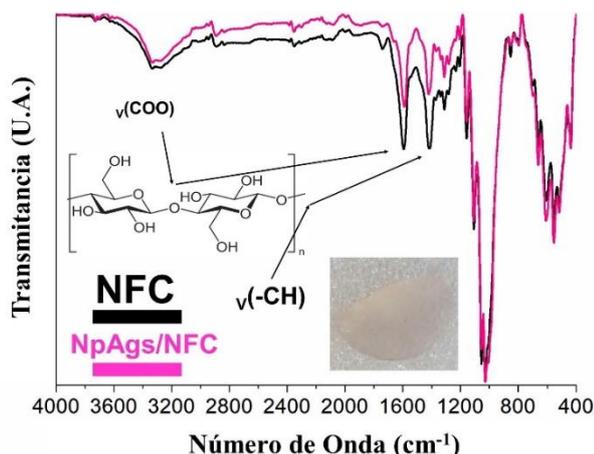


Figura 8. Espectros FTIR de las NFC a partir de nopal (negro) y los nanocompositos de NPs-Ag/NFC de sargazo (rosa).

4. Conclusiones

Se obtuvieron fibras de celulosa (FC) y nanofibras de celulosa (NFC) a partir de dos desechos, sargazo y nopal, utilizando reactivos de bajo impacto ambiental. Se obtuvieron nanopartículas de plata (NPs-Ag) mediante ablación láser en medio líquido, lo que disminuyó la generación de contaminantes. A partir de estos materiales se sintetizaron dos tipos de nanocompositos (NPs-Ag/NFC), los cuales mostraron la presencia de una nueva transición a ~ 2.8 eV. Ambos tipos de nanocompositos presentaron diferencias en sus propiedades químicas y físicas: los nanocompositos NPs-Ag/NFC de nopal presentaron alta solubilidad en agua, mientras que los nanocompositos NPs-Ag/NFC de sargazo mostraron una alta capacidad para retener las NPs-Ag. Debido a estas características, se espera que los nanocompositos preparados a partir de sargazo tengan aplicaciones potenciales para la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la M. en C. Lizbeth Triana Cruz y al Dr. Oscar Fernando Olea Mejía por su asistencia técnica, así como al CCIQS UAEM-UNAM por haber proporcionado las facilidades. Se agradece de igual manera al Ing. Edwin Jesús García Martínez del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica UASLP por su asistencia técnica. Este trabajo fue apoyado por CONAHCYT a través de beca de estancia postdoctoral 722355 (B.P.R).

Referencias

Agrebi, F., Ghorbel, N., Bresson, S., Abbas, O., & Kallel, A. (2019). Study of nanocomposites based on cellulose nanoparticles and natural rubber latex by ATR/FTIR spectroscopy: The impact of

- reinforcement. *Polymer Composites*, 40(5), 2076–2087. doi: 10.1002/pc.24989
- Aziz, N., Faraz, M., Pandey, R., Shakir, M., Fatma, T., Varma, A., Barman, I., & Prasad, R. (2015). Facile Algae-Derived Route to Biogenic Silver Nanoparticles: Synthesis, Antibacterial, and Photocatalytic Properties. *Langmuir*, 31(42), 11605–11612. doi: 10.1021/acs.langmuir.5b03081
- Fahma, F., Febiyanti, I., Lisdiana, N., Arnata, I. W., & Sartika, D. (2021). Nanocellulose as a new sustainable material for various applications: A review. *Archives of Materials Science and Engineering*, 109(2), 49–64. doi: 10.5604/01.3001.0015.2624
- Fengel, D. (1993). Influence of Water on the OH Valency Range in Deconvoluted FTIR Spectra of Cellulose. *Holzforschung*, 47(2), 103–108. doi: 10.1515/hfsg.1993.47.2.103
- Hoang, T. T. T. Le, Insin, N., & Sukpirom, N. (2020). Catalytic activity of silver nanoparticles anchored on layered double hydroxides and hydroxyapatite. *Inorganic Chemistry Communications*, 121(August), 108199. doi: 10.1016/j.inoche.2020.108199
- Joaquín, A., Gloria, I., Ceja, C., Alma, R., México, T., Postgraduados, C. De, Tabasco, C., & Carlos, P. (2019). Bleaching of cellulose fiber from sugar cane (*Saccharum* spp.) straw with hydrogen peroxide. *Agroproductividad*, 12, 11–17. Retrieved from file:///C:/Documentos D/PARA SINCRONIZAR/Procesos 4- celulosa/Blanqueo de la fibra de celulosa caña de azucar.pdf
- Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A. P., Hussein, M. Z. B., & Oksman, K. (2010). Preparation of cellulose nanofibers with hydrophobic surface characteristics. *Cellulose*, 17(2), 299–307. doi: 10.1007/s10570-009-9387-9
- Melro, E., Filipe, A., Sousa, D., Valente, A. J. M., Romano, A., Antunes, F. E., & Medronho, B. (2020). Dissolution of kraft lignin in alkaline solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148, 688–695. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.153
- Rafique, M., Rafique, M. S., Kalsoom, U., Afzal, A., Butt, S. H., & Usman, A. (2019). Laser ablation synthesis of silver nanoparticles in water and dependence on laser nature. *Optical and Quantum Electronics*, 51(6), 1–11. doi: 10.1007/s11082-019-1902-0
- Renuart, E., & Viney, C. (2000). Biological fibrous materials: Self-assembled structures and optimised properties. Elsevier Masson SAS. *Pergamon Materials Series*. doi: 10.1016/S1470-1804(00)80012-7
- SAGARPA. (2015). Estudio de Factibilidad para el Establecimiento de Cultivo de Nopal (*Opuntia*) en Tierras Ociosas en los Estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas con Fines Alimenticios, Energeticos y Ambientales. *Informe Detallado*, 94. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346982/Nopal_Detallado.pdf
- SEMARNAT. (2021). Lineamientos Técnicos y de Gestión para la Atención de la Contingencia Ocasionada por Sargazo en Caribe Mexicano y Golfo de México. *INECC, Primera Ed*(112). Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/636709/SEMARNAT-INECC-SARGAZO-2021.pdf>
- Shanshool, H. M., Yahaya, M., Yunus, W. M. M., & Abdullah, I. Y. (2016). Investigation of energy band gap in polymer/ZnO nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(9), 9804–9811. doi: 10.1007/s10854-016-5046-8
- Solhi, L., Guccini, V., Heise, K., Solala, I., Niinivaara, E., Xu, W., Mihhels, K., Kröger, M., Meng, Z., Wohlert, J., Tao, H., Cranston, E. D., & Kontturi, E. (2023). Understanding Nanocellulose-Water Interactions: Turning a Detriment into an Asset. *Chemical Reviews*, 123(5), 1925–2015. doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00611
- Srivastava, D., Kuklin, M. S., Ahopelto, J., & Karttunen, A. J. (2020). Electronic band structures of pristine and chemically modified cellulose allomorphs. *Carbohydrate Polymers*, 243. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116440
- Zhou, H., Zhu, H., Xue, F., He, H., & Wang, S. (2020). Cellulose-based amphoteric adsorbent for the complete removal of low-level heavy metal ions via a specialization and cooperation mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 385(December 2019), 123879. doi: 10.1016/j.cej.2019.123879