

# SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE MADERA TRANSPARENTE CON RECUBRIMIENTOS DE Ag, A PARTIR DEL ÁRBOL DEL CHAKÁ (BURSERA SIMARUBA)

Itzel Polanco-Ortiz\*, Reyes Hernández-Castillo, Gerardo Madrigal-Avalos, Elías Tejero-Aguilar, Milenis Acosta-Díaz.

Laboratorio de Ciencia de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 97300 Mérida, Yucatán, México

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2022 - Fecha de aceptación: 15 de noviembre de 2022

## Resumen

En este trabajo se reporta una metodología para obtener maderas transparentes de *Bursera Simaruba*, que es un árbol abundante en la región sureste de México. Los análisis de morfología muestran que esta madera posee poros que se modifican con el proceso químico de la delignificación y la infiltración. Como resultado se obtienen maderas transparentes con transmitancias del orden del 40%, que pueden ser disminuidas en la región del infrarrojo cercano con recubrimientos en forma de película delgada de plata. Estas bicapas madera/Ag son una opción interesante para aplicaciones en construcciones sustentables y amigables con el ambiente.

**Palabras clave:** compuesto, madera transparente, películas delgadas, bloqueo de infrarrojo, propiedades ópticas.

## SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF TRANSPARENT WOOD WITH Ag COATINGS, OBTAINED FROM THE CHAKÁ TREE (BURSERA SIMARUBA)

## Abstract

This work reports a methodology to obtain transparent wood from *Bursera Simaruba*, a tree widely found in southeast Mexico. The morphological characterization shows wood pores that can be modified by the chemical process of delignification and infiltration. As a result, transparent wood with transmittances around 40% are obtained, which can be reduced in the near infrared region with Ag thin film coatings. These wood/Ag bilayers are an interesting option for applications in sustainable and environmentally friendly constructions.

**Keywords:** composite, transparent wood, thin films, infrared shielding, optical properties.

---

\*a11003568@alumnos.uady.mx

## 1 Introducción

Es ampliamente sabido que los árboles absorben carbono de la atmósfera, y esta característica puede ser utilizada para contrarrestar las emisiones de dióxido de carbono de las fuentes fósiles (Buchanan, 2007). En cuanto a energía embebida en una construcción, se necesita menos para procesar la madera que la que se necesita para fabricar concreto, vidrio o metales, sobre todo si la madera se obtiene de árboles de la región, lo cual reduce costos de transporte (Buchanan, 2007).

Un nuevo biomaterial, la madera transparente, ha llamado la atención para su aplicación en edificios sustentables. Este material es el resultado de verter un polímero con buen índice de refracción dentro de madera sin lignina, lo que provee al nuevo material buen desempeño óptico (Qin et al., 2018) y mejora sus propiedades mecánicas para aplicaciones estructurales (Jungstedt et al., 2020; Li et al., 2016; Zhu, Song, et al., 2016). Los trabajos previos en madera transparente se enfocan en diferentes aplicaciones como mejoramiento de eficiencia en celdas solares (Zhu, Li, et al., 2016), acristalamientos en edificios con barrera de UV (Bisht et al., 2021; C. Zhang et al., 2021) y en el sector de medicina como barrera de rayos X (Muhammad et al., 2022). Este nuevo material tiene potencial en edificios inteligentes, debido a su alta transmitancia, pudiendo proveer de privacidad, ya que presenta buen nivel de difusión opaco de luz (Qin et al., 2018).

En este trabajo se analiza el comportamiento optoelectrónico de la madera transparente con recubrimiento de Ag mediante RF sputtering, con el objetivo de poder aplicarse en edificios inteligentes, debido a su alta transmitancia en la longitud visible (Axelevitch & Apter, 2015; Leftheriotis et al., 1997; Surya Prakasarao et al., 2020), bloqueo del infrarrojo cercano y buenas características eléctricas (Surya Prakasarao et al., 2020).

## 2 Experimentación

Fabricación de la madera transparente:

**Delignificación:** Se usaron muestras con área de  $2.5 \text{ cm}^2$  y espesor de 0.70 mm de *Bursera Simaruba*, las cuales se sumergieron por 4 horas a  $85^\circ\text{C}$  en una solución de 4.6 pH de acetato de sodio ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$ , 99%, 82.03 g/mol, Sigma-Aldrich), agua destilada, ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , Farmacias Comercio) y clorito de sodio al 1.5 wt % ( $\text{NaClO}_2$ , 80%, Sigma-Aldrich). Después de la delignificación, las muestras se aclararon en agua destilada y posteriormente en alcohol isopropílico, este proceso se repitió 3 veces.

**Infiltración:** En un sistema de vacío, se vertió la resina epóxica (Poliwood Sistema A+B, Poliformas Plásticas) en una proporción de 3:1 y se procedió a infiltrar las muestras delignificadas a 30 inHg por 50 minutos, este proceso se repitió 3 veces. La muestra infiltrada se colocó entre dos placas de vidrio y se curó por 12 horas en un horno a una temperatura alrededor de  $50^\circ\text{C}$ .

**Crecimiento de Ag:**

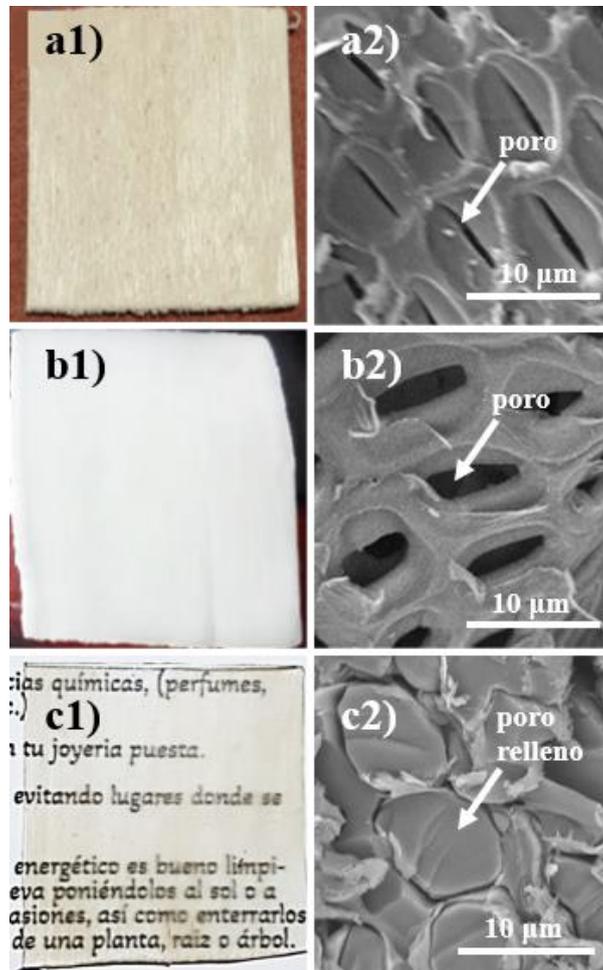
Antes del crecimiento, los sustratos de madera transparente fueron limpiados con baño ultrasónico. Los recubrimientos de plata se crecieron en los sustratos por RF sputtering no reactivo a temperatura ambiente. Todos los recubrimientos se prepararon usando el sistema de sputtering Intercovamex-V3 con un magnetron Lesker's Torus, conectado a una fuente de potencia RF Dressler Cesar. Los recubrimientos se crecieron usando un blanco de Ag de Kurt. J. Lesker con dimensiones de 2 pulgadas de diámetro y 0.250 pulgadas de espesor. Se utilizó una potencia de RF de 50 W, la distancia entre el blanco y el sustrato se mantuvo a 5.0 cm, la presión base en la cámara de crecimiento fue de  $3 \times 10^{-5}$  Torr. Posteriormente se introdujo en la cámara 5 mTorr de argón con una pureza de 99.999%. Los espesores de Ag obtenidos fueron de 25 nm, 10 nm, 7 nm y 4 nm.

Los estudios morfológicos de la madera antes del crecimiento fueron llevados a cabo usando un microscopio de barrido electrónico (SEM) JOEL 7600. Las propiedades ópticas fueron medidas usando un espectrofotómetro Labtron Double Beam UV/Vis. Las propiedades eléctricas fueron analizadas usando un sistema Hall Ecopia HMS 5000 a temperatura ambiente.

### 3 Resultados y discusión

En la **Fig. 1** se observa una comparación de muestras de madera y de imágenes SEM del

corte transversal de la madera *Bursera Simaruba* natural, delignificada e infiltrada, siendo a), b), c) respectivamente. Se distingue en a2) una formación tipo celdas con poros en forma de aberturas lineales en su región central. Se aprecia en b2) un aumento considerable de las dimensiones de los poros asociado al proceso de remoción de lignina. En c2) se observa que los poros ahora están rellenos con el polímero. La evolución de la morfología de la *Bursera Simaruba* es similar a otros reportes en la literatura, la mayoría de ellos para la madera de balsa (Mi et al., 2020; Qiu et al., 2020).



**Fig. 1** Comparación de muestras de madera con sus respectivas imágenes SEM, a) madera natural, b) madera delignificada, c) madera infiltrada. Magnificaciones de x 1000.

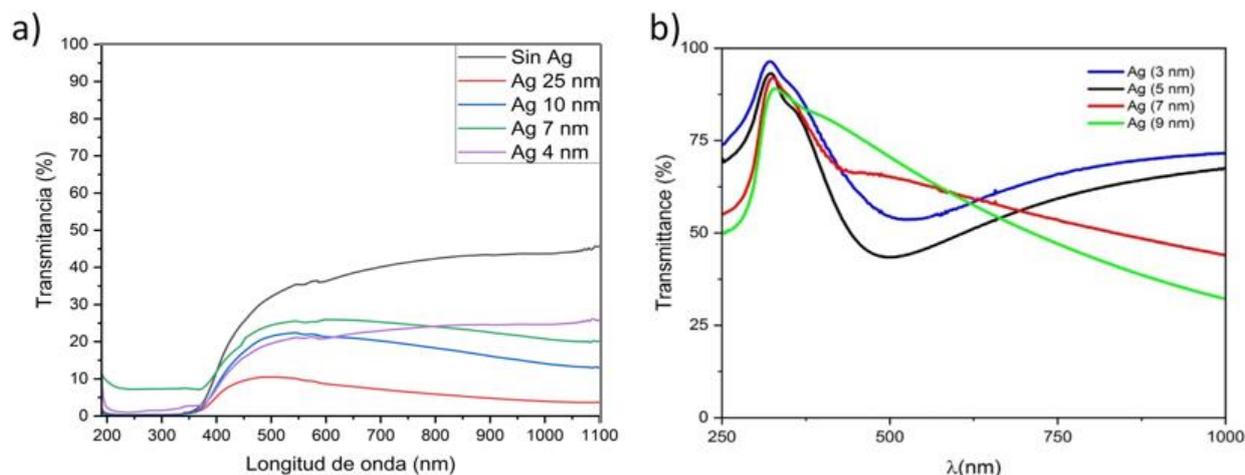
#### Propiedades ópticas

En la **Fig. 2a** se muestran las transmitancias en función de la longitud de onda de la

madera infiltrada con y sin recubrimientos de Ag. Se evidencia que la transmitancia es constante alrededor de 45% en los rangos de 450 a 1100 nm para la madera infiltrada sin

recubrimiento. En reportes previos (Castillo et al., 2020) se demostró que las películas de Ag muestran una disminución de transmitancia en el rango de 600 a 1100 nm como se observa en la figura 2b. Al aumentar el espesor del recubrimiento de Ag de los 4 a 25 nm se observa una disminución de la transmitancia en todo el intervalo de las longitudes de onda; es importante destacar

que, a partir de los 7 nm, las películas delgadas de Ag sobre la madera, logran disminuir la transmitancia en el intervalo de 600 a 1100 nm y tener su máximo valor en el espectro visible. Este tipo de recubrimientos en la madera infiltrada cumplen con el propósito de disminuir la transmitancia en la región del infrarrojo cercano.



**Fig. 2** Transmitancias en función de longitud de onda. a) madera infiltrada con y sin recubrimientos de Ag. b) Comparación de películas delgadas de Ag con diferentes espesores (Castillo et al., 2020).

Se ha reportado en la literatura diferentes metodologías para el bloqueo de infrarrojo en maderas transparentes, como lo es la adición de nanopartículas en el polímero de infiltración de diferentes compuestos como  $Cs_xWO_3$ ,  $SnO:Sb,VO_2:W$  (Qiu et al., 2019; Yu et al., 2017; L. Zhang et al., 2020), la

deposición sonoquímica de ZnO (Hu et al., 2022), y la infiltración de hidrogeles en la madera delignificada (Liu et al., 2021).

### Propiedades eléctricas

En la

10-6 atribuibles a las propiedades eléctricas de Ag. Es importante tomar en cuenta que, a pesar de utilizar un sustrato diferente al vidrio, la rugosidad de la superficie de las maderas transparentes nos permitió obtener una excelente interconexión en películas delgadas de Ag. Lo anterior se afirma al obtener unas resistividades en el orden de  $10^{-6} \Omega\text{cm}$  a 300 K, comparado con los trabajos mencionados anteriormente.

**Tabla 1** se observan las propiedades eléctricas de las muestras de Ag crecidas sobre los sustratos de madera transparente, es importante tomar en cuenta que los espesores son estimados de acuerdo a una razón de crecimiento de 0.33 nm/s (Castillo et al., 2020). La bicapa de Ag 4 nm/madera transparente no presenta propiedades eléctricas, demostrando que no se formó una película metálica continua. A partir de 7 nm para todas las muestras se obtienen películas continuas con una resistividad del orden de

La obtención de madera transparente conductiva eléctricamente abre posibilidades de aplicaciones en el campo de celdas solares orgánicas, ventanas inteligentes y dispositivos electrónicos.

**Tabla 1** Propiedades eléctricas de las muestras de Madera/Ag.

Muestra Madera/Ag	Espesor (nm)	Bulk Con. (10 <sup>23</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\rho$ 300 K ( $\Omega$ cm)	Movilidad (cm <sup>2</sup> /Vs)	R <sub>s</sub> ( $\Omega$ /sq)
S1	4	-	-	-	-
S2	7	-1.83	6.02x10 <sup>-6</sup>	5.53	6.00
S3	10	-1.78	4.44x10 <sup>-6</sup>	7.91	2.96
S4	25	-1.40	4.41x10 <sup>-6</sup>	1.01x10 <sup>1</sup>	2.21

## 4 Conclusiones

Se reporta la obtención de madera transparente a partir de madera natural de *Bursera Simaruba* sometido a un proceso químico de delignificación. De las imágenes de microscopía electrónica de barrido se observa la evolución desde estructuras tipo celdas con poros con aberturas lineales en su región central para la madera natural, hasta un ensanchamiento de estos poros al delignificar y finalmente una estructura con poros rellenos con el polímero con el que se realiza la infiltración. Se observa un cambio considerable en las transmitancias ópticas de las maderas infiltradas respecto de las recubiertas con una película delgada de plata. A partir de los 7 nm de espesor de la Ag se logra una disminución de la transmitancia en el infrarrojo cercano (660- 1100 nm), esto se correlaciona con la formación de una película

continua de plata con buenas propiedades eléctricas. Estas bicapas transparentes y conductoras (madera/Ag) constituyen una alternativa novedosa para aplicaciones en electrónica orgánica y flexible.

## 5 Reconocimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT SENER 254667. Los autores agradecen a Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Cinvestav IPN financiado por los proyectos FOMIX Yucatán 2008 108160 CONACYT LAB 2009 01 123913 292692 294643 188345 y 204822 en especial al Dr. Víctor Rejón por el apoyo técnico para las imágenes SEM.

## Referencias

- Axelevitch, A., & Apter, B. (2015). In-situ investigation of optical transmittance in metal thin films. *Thin Solid Films*, 591, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.01.046>
- Bisht, P., Pandey, K. K., & Barshilia, H. C. (2021). Photostable transparent wood composite functionalized with an UV-absorber. *Polymer Degradation and Stability*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109600>
- Buchanan, A. (2007). *Energy and CO 2 Advantages of Wood for Sustainable Buildings*.

\*a11003568@alumnos.uady.mx

- Castillo, R. H., Peñuñuri, F., Canto-Reyes, D., Borges Pool, A., Mendez-Gamboa, J. A., & Acosta, M. (2020). Electrical percolation threshold evaluation of silver thin films for multilayer WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> transparent conductive oxide. *Materials Letters*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126913>
- Hu, X., Zhang, Y., Zhang, J., Yang, H., Wang, F., bin Fei, & Noor, N. (2022). Sonochemically-coated transparent wood with ZnO: Passive radiative cooling materials for energy saving applications. *Renewable Energy*, 193, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.008>
- Jungstedt, E., Montanari, C., Östlund, S., & Berglund, L. (2020). Mechanical properties of transparent high strength biocomposites from delignified wood veneer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105853>
- Leftheriotis, G., Yianoulis, P., & Patrikios, D. (1997). Deposition and optical properties of optimised ZnS/Ag/ZnS thin films for energy saving applications. *Thin Solid Films*, 306(1), 92–99. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00250-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00250-2)
- Li, Y., Fu, Q., Yu, S., Yan, M., & Berglund, L. (2016). Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance. *Biomacromolecules*, 17(4), 1358–1364. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b00145>
- Liu, S., Tso, C. Y., Du, Y. W., Chao, L. C., Lee, H. H., Ho, T. C., & Leung, M. K. H. (2021). Bioinspired thermochromic transparent hydrogel wood with advanced optical regulation abilities and mechanical properties for windows. *Applied Energy*, 297, 117207. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117207>
- Mi, R., Li, T., Dalgo, D., Chen, C., Kuang, Y., He, S., Zhao, X., Xie, W., Gan, W., Zhu, J., Srebric, J., Yang, R., & Hu, L. (2020). A Clear, Strong, and Thermally Insulated Transparent Wood for Energy Efficient Windows. *Advanced Functional Materials*, 30(1). <https://doi.org/10.1002/adfm.201907511>
- Muhammad, N. A., Armynah, B., & Tahir, D. (2022). High transparent wood composite for effective X-ray shielding applications. *Materials Research Bulletin*, 154, 111930. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111930>
- Qin, J., Li, X., Shao, Y., Shi, K., Zhao, X., Feng, T., & Hu, Y. (2018). Optimization of delignification process for efficient preparation of transparent wood with high strength and high transmittance. *Vacuum*, 158, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.09.058>
- Qiu, Z., Wang, S., Wang, Y., Li, J., Xiao, Z., Wang, H., Liang, D., & Xie, Y. (2020). Transparent wood with thermo-reversible optical properties based on phase-change material. *Composites Science and Technology*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108407>
- Qiu, Z., Xiao, Z., Gao, L., Li, J., Wang, H., Wang, Y., & Xie, Y. (2019). Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 172, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>
- Surya Prakasarao, C., Hazarika, P., DSouza, S. D., Fernandes, J. M., Kovendhan, M., Arockia Kumar, R., & Paul Joseph, D. (2020). Investigation of ultra-thin and flexible Au–Ag–Au

transparent conducting electrode. *Current Applied Physics*, 20(10), 1118–1124.  
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2020.06.016>

Yu, Z., Yao, Y., Yao, J., Zhang, L., Chen, Z., Gao, Y., & Luo, H. (2017). Transparent wood containing CsXWO<sub>3</sub> nanoparticles for heat-shielding window applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 6019–6024. <https://doi.org/10.1039/c7ta00261k>

Zhang, C., Ma, Y., Lin, T., Yin, X., Wei, X., & Wang, Z. (2021). Transparent Photochromic Wood Composites Incorporating AgBr Nanoparticles for UV-shielding Applications. *Paper and Biomaterials*, 6(4), 21–29. <https://doi.org/10.1213/j.issn.2096-2355.2021.04.003>

Zhang, L., Wang, A., Zhu, T., Chen, Z., Wu, Y., & Gao, Y. (2020). Transparent Wood Composites Fabricated by Impregnation of Epoxy Resin and W-Doped VO<sub>2</sub> Nanoparticles for Application in Energy-Saving Windows. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(31), 34777–34783. <https://doi.org/10.1021/acami.0c06494>

Zhu, M., Li, T., Davis, C. S., Yao, Y., Dai, J., Wang, Y., AlQatari, F., Gilman, J. W., & Hu, L. (2016). Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells. *Nano Energy*, 26, 332–339.  
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.020>

Zhu, M., Song, J., Li, T., Gong, A., Wang, Y., Dai, J., Yao, Y., Luo, W., Henderson, D., & Hu, L. (2016). Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites. *Advanced Materials*, 28(26), 5181–5187. <https://doi.org/10.1002/adma.201600427>