



# ESTUDIO DEL MÉTODO DE OBTENCIÓN DE MADERA ÓPTICAMENTE TRANSPARENTE

Iván Javier Soledad Pinilla, Alexis Emir Llorente Martínez

Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia

## Resumen

El mayor consumo de energía en el mundo se utiliza en la iluminación y acondicionamiento de interiores. El objetivo del presente trabajo es estudiar el proceso de obtener madera ópticamente transparente para que sea una alternativa del vidrio en la industria de la construcción. La madera transparente puede tener las siguientes ventajas con respecto al vidrio: iluminación de interiores, resistencia al impacto y aislante térmico de edificaciones. Además, con un buen desempeño estructural, su funcionalidad estará también enfocada a sus ventajas decorativas. En este estudio se utilizó como materia prima madera de balsa (*Ochroma pyramidale*). El proceso consistió en tres pasos: 1. Proceso de deslignificación (con soluciones de NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>); 2. Blanqueo químico (con solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y finalmente 3. Infiltración de un polímero cuyo índice de refracción coincide con el índice de la pared celular, dando como resultado madera ópticamente transparente. Se evaluó el efecto que tiene el tiempo de duración de los procesos de deslignificación y blanqueo y la temperatura a la que se realizan, además del efecto que ocasiona sobre la madera deslignificada y blanqueada la infiltración de resina epóxica a través de ciclos de vacío. Se espera que la madera conserve su estructura tridimensional y mejore sus propiedades mecánicas. La morfología superficial de la madera antes y después de la infiltración polimérica se estudió mediante microscopía electrónica de barrido. Las mediciones FTIR se realizaron para estudiar la química de la madera y la espectroscopia UV-Vis para cuantificar las propiedades ópticas de las muestras cuando estas fueron sometidas a distintas concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el proceso de blanqueo. La madera transparente obtenida mediante el proceso descrito anteriormente es un candidato potencial para materiales de construcción transmisores de luz y ventanas transparentes de celdas solares.

**Palabras clave:** deslignificación; blanqueo químico; infiltración

### **Abstract**

*The highest energy consumption in the world is used in lighting and modification of interior design. The goal of this project is to study the process of obtaining optically transparent wood in order to offer an alternative of glass in the construction industry. Transparent wood can have the following advantages over glass: interior lighting, resistance to impact and thermal insulation. In addition to its good structural performance, the transparent wood will have decorative advantages. In this study, balsa wood (*Ochroma pyramidale*) was used as primary material. The process consisted of three stages: 1. Delignification process with NaOH and Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> solutions; 2. Chemical bleaching (with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution), and finally 3. An infiltration process with a polymer which its refraction index coincides with the refraction index of wood cellular wall, resulting in optically transparent wood. The effects of the time period of the delignification and bleaching processes, temperature as well as the infiltration through vacuum cycles of epoxy resin on delignified and bleached wood were studied. It is expected that wood would retain its three-dimensional structure and improve its mechanical properties. The surface morphology of the wood before and after polymeric infiltration was studied through scanning electron microscopy. FTIR measurements were performed to study wood chemistry and UV-Vis spectroscopy to quantify the optical properties of the samples when they were subjected to different concentrations of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> during the bleaching process. Transparent wood obtained by the process described above is a potential candidate as a transparent construction material in windows and transparent solar panels.*

**Keywords:** deslignification; chemical bleaching; infiltration

## **1. Introducción**

El calentamiento global ha causado una variabilidad en los patrones del clima a nivel mundial provocando un aumento de la temperatura de la atmósfera terrestre. Por ello, es fundamental la consideración del aislamiento térmico en sitios que tienen estaciones. Actualmente, el vidrio es el aislante utilizado en la construcción de edificaciones, que a pesar de utilizar con éxito la luz solar para proporcionar la iluminación interior, representan grandes pérdidas de energía en invierno, y lo contrario en el verano, esto lo convierte en un material ineficiente para aislar correctamente en las construcciones.

Por su parte, la madera es un material con excelentes propiedades mecánicas, térmicas, estructurales y decorativas [1]. La composición química de la madera va a estar definida de acuerdo al clima, ubicación geográfica, condiciones del suelo y la parte del árbol de donde se extrae (Raíz, tronco o rama) [2]. La madera se conforma principalmente por tres componentes: celulosa y hemicelulosa (65% - 75%), lignina (18% - 35%) y materiales orgánicos e inorgánicos (4% - 10%). [2]

Así, La celulosa y la hemicelulosa son ópticamente incoloras [1], la lignina se encuentra en las paredes celulares de la planta proporcionando rigidez, y también es la causante de la tonalidad de la madera. [3]

Para el caso de los países que presentan un clima tropical, la madera transparente por ser un material con propiedades excelentes permite adaptarse a múltiples usos. Con un buen desempeño estructural, su funcionalidad estará más enfocada a sus ventajas decorativas.

El objetivo principal del presente trabajo es plantear la posibilidad de procesar la madera para lograr la transparencia óptica, y así poder ser una alternativa del vidrio en la industria de la construcción, presentando ventajas respecto a este en: iluminación de interiores, resistencia al impacto y aislante térmico de edificaciones [3]. La madera fue sometida a tres procesos tales como: deslignificación, usando una solución de NaOH (2,5 mol/L) y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> (0,4 mol/L), posteriormente por un blanqueo químico con una solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (2,5 mol/L), en estos dos procesos las soluciones fueron diluidas en agua destilada y se llevaron a cabo a una temperatura de 100°C, finalmente, se le hizo una infiltración de una resina epóxica bajo vacío.

## 2. Estudios recientes sobre la Madera Transparente

La absorción de la luz sobre la madera va a estar determinada por la cantidad de lignina presente en ella, ya que esta es la encargada de aportarle coloración oscura a la madera. [3] Slegfried Fink [4] planteó en 1992 que la madera puede hacerse casi transparente por medio de un blanqueo químico, seguido de una compensación física mediante la inclusión en una matriz con el mismo índice de refracción (aproximadamente  $n=1,56$ ).

Lars Berglund et al. [5] en el 2016 obtuvieron madera transparente con una transmitancia del 85% y turbidez del 71%. Usando Madera de balsa, le realizaron el blanqueo químico con una solución al 1% en peso de clorito de sodio y usaron como polímero el metacrilato de metilo prepolimerizado infiltrado en la matriz por medio de vacío. Sin embargo, esta transmitancia se ve afectada por el espesor de la madera y la fracción de celulosa presente en la muestra.

Liangbing Hu et al. [1] en el 2016 obtuvieron madera transparente con dos características distintas: en una la muestra de madera utilizada tenía corte radial (poros perpendiculares a la superficie) y en la otra el corte era longitudinal (poros a lo largo de la superficie). El proceso de deslignificación se hizo con una solución de NaOH (2,5M) y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> (0,4M) en agua destilada, seguida de un blanqueo químico en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (2,5M). La infiltración del polímero tipo resina epóxica se llevó a cabo por medio de vacío. Al ser sometidas las dos muestras a un mismo tiempo en el proceso de deslignificación, el corte radial presentó mejores resultados que el corte longitudinal; de igual manera las muestras con corte radial y longitudinal dieron excelentes resultados en las pruebas de transmitancia y turbidez siendo mejores las del corte radial.

Liangbing Hu et al. [3] En el 2016 publicó una investigación que demuestra que la madera transparente deja pasar solo un poco menos de luz que el vidrio, pero proporciona un mejor aislamiento térmico, además de dar una iluminación interior uniforme y consistente ya que los canales de la madera dirigen la luz visible directamente a través del material, pero la estructura celulosa que aún permanece hace que esta también rebote generando un efecto llamado neblina.

### 3. Metodología

**Reactivos y materiales:** La madera de balsa fue adquirida en Balsa de Colombia Ltda, Café Madrid, Bucaramanga. Los reactivos utilizados para eliminar el contenido de lignina de la madera fueron: hidróxido de sodio (NaOH, 99%, Arquilab Ltda), sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , 99%, Arquilab Ltda) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 35%, Arquilab Ltda). Para el proceso de infiltración se hace uso de una resina epóxica (Crystal clear epoxy resin; parte A, resina epóxica, parte B, endurecedor con base polimercaptano, East Coast Resin, USA). Los disolventes utilizados fueron IPA (2-propanol, 98%, Arquilab Ltda) y agua destilada (Laboratorio escuela de ingeniería química).

**Pretratamiento:** La madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) con una densidad de  $250 \text{ kg/m}^3$  utilizada en el presente estudio fue cortada de forma radial empleando una sierra sin fin Jdd 240b para obtener muestras de  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  con un espesor de  $3 \text{ mm}$ . Posteriormente los bloques de madera se lavaron con agua destilada en ebullición para eliminar algunas impurezas y luego fueron secadas en un horno a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 10 min antes de la deslignificación.

**Proceso de deslignificación:** El proceso de extracción de lignina se llevó a cabo en dos etapas experimentales; deslignificación y blanqueo. La primera etapa consistió en preparar una disolución de NaOH ( $2,5 \text{ mol/L}$ ) y  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ( $0,4 \text{ mol/L}$ ) en agua destilada con el fin de disolver parte de la lignina presente en las paredes celulares. Cada bloque de madera se sumergió en un beaker con 40 ml de solución extractora.

El proceso de extracción es optimizado con temperatura, ya que aumenta la cinética de la reacción. Por esta razón, se utilizó una placa calefactora para calentar la solución a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las muestras permanecieron en la solución extractora y en constante ebullición durante 3 horas. El proceso se repite para 6, 9 y 12 horas. Debido a que el solvente utilizado fue agua destilada, ésta puede evaporarse, ya que la solución se encuentra en constante ebullición. Por lo tanto, se agregó agua destilada de manera intermitente para mantener el volumen original de 40 ml. Los bloques retirados de la solución de extracción de lignina fueron lavados en agua destilada en ebullición durante 5 minutos para remover la mayor parte de los productos químicos y preparar las muestras para el proceso de blanqueo.

**Blanqueo con peróxido de hidrógeno:** A continuación, se llevó a cabo la segunda etapa de deslignificación. Se preparó una solución blanqueadora de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 35%) diluido en agua destilada y se distribuye en beakers de 40 ml al igual que en la primera etapa del proceso. Las pruebas se realizaron variando la concentración

de la solución en un rango de 0.5M – 4M y se mantuvieron en constante ebullición, 100 °C, sin agitación, durante 3 horas o hasta desaparecer el color marrón presente en los bloques de madera. Para los bloques de madera que aún preservaban un tono marrón al finalizar el proceso de blanqueo fue necesario sumergir las muestras en solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a la misma molaridad con la que se blanqueó inicialmente, pero esta vez a temperatura ambiente durante 24 horas o hasta quedar totalmente incoloras. Cuando desapareció el color marrón, las muestras se retiraron de la solución blanqueadora y se enjuagaron con agua destilada fría. Se recomienda tomar precauciones de seguridad al iniciar la reacción por la alta producción de espuma que conlleva al derramamiento de la solución, salpicaduras y corrosión de la placa calefactora. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la primera etapa de deslignificación, el proceso de blanqueo solo se le realizó a las muestras deslignificadas durante 6 horas.

**Preparación de la resina epóxica:** Para la fabricación de la madera transparente se debe infiltrar los bloques de madera previamente deslignificados y deshidratados con un sustituto polimérico para la lignina extraída, resistente a los rayos UV y al deterioro por humedad.

Inicialmente se preparó el polímero sustituto mezclando la resina epóxica con el agente catalizador en vaso de precipitado, ésta mezcla se hizo en proporción 1 a 2 respectivamente y a temperatura ambiente. Cualquier variación de esta relación hará que el epóxido nunca se polimerice completamente o dificultar la infiltración del polímero en la madera. El mezclado es la parte más importante de este procedimiento; dependiendo de la cantidad mezclar durante 3 a 5 minutos continuamente sin hacer movimientos bruscos, debido a que aparecerán burbujas de aire indeseables. Durante la mezcla el epóxido tendrá un color blanco nublado; se debe seguir mezclando hasta que todos los signos de turbidez y rayas blancas adquieran un color completamente transparente.

**Infiltración de la resina en vacío y fabricación de la madera transparente:** A continuación, se seleccionaron los mejores bloques de madera que obtuvieron mejores resultados en el proceso de deslignificación. Para la selección, se tuvo en cuenta la cantidad de lignina extraída y las muestras más incoloras. Antes de la infiltración del polímero las muestras fueron deshidratadas sumergiéndolas en 20 ml de IPA durante 10 minutos.

Seguidamente, la infiltración de la resina epóxica líquida en la madera deslignificada se hizo bajo vacío con la ayuda de un sistema compuesto por un desecador de 300mm con grifo punzón GL 36, placa de porcelana (vidrio borosilicato 3.3, SIMAX), un vacuómetro de conexión vertical de 2.5" y una bomba de vacío de membrana. La cantidad de vacío que se aplica, así como el tiempo de infiltración al vacío son variables críticas para obtener una madera transparente, pues una presión excesiva causa un colapso en la estructura interna de la madera y una presión insuficiente tienen como consecuencia la pérdida de la forma original de la muestra o una infiltración incompleta. La madera se sumerge en la solución de resina epóxica por 2 horas con 4 repeticiones a 25 inHg de presión.

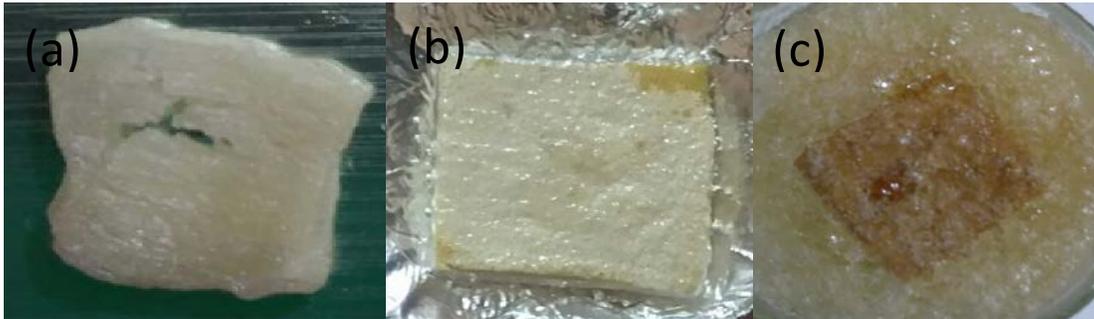
Durante los primeros 10 minutos la solución se desgasificó para liberar completamente el aire que está presente en los poros de la madera. Una vez que la solución junto con la madera se estabiliza (no hay burbujeo) la cámara de vacío se desconecta de la bomba y es sellada con una válvula. Seguidamente, el vacío se mantuvo durante 30 minutos y se observa una disminución en el nivel de la solución debido a la infiltración del polímero; pasado este tiempo, se liberó el vacío para permitir que la resina llenara la estructura de madera por presión atmosférica. La infiltración al vacío se repitió tres veces más para garantizar que el polímero se infiltrara completamente. Por último, el bloque de madera polimerizado se retiró de la cámara de vacío. A continuación, se procedió con el proceso de curado o endurecimiento del polímero durante 12 horas en un horno a 40 °C; un aumento en la temperatura acelera el endurecimiento de las muestras, pero afecta la tonalidad de las mismas. Finalmente, la muestra de madera polimerizada se retira del horno y se deja en reposo a temperatura ambiente hasta que la resina se solidifique completamente.

#### 4. Resultados

Las muestras de madera con medidas de 2.5 x 2.5 x 0.3 cm al ser sumergidas en la solución de deslignificación (NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) inmediatamente no presentan ningún tipo de cambio en su coloración ya sea la muestra o la solución. Al alcanzar una temperatura de 100°C y a medida que avanza el tiempo, la solución toma una coloración naranja oscura que se va intensificando cada vez más debido a que la lignina presente en la muestra de madera se disuelve en la solución de deslignificación. La cantidad de la lignina presente en la muestra se disuelve en su mayoría en la primera hora [1] ya que en este tiempo la coloración de la solución presenta un cambio considerable respecto a los intervalos de tiempo después de la primera hora. Al pasar las primeras 3 horas se ha retirado la mayor parte de la lignina que se puede extraer en este proceso de deslignificación, sin embargo, como lo que se quiere es retirar la mayor parte de la lignina de la madera el proceso continúa hasta las 6 horas donde la solución aun presenta cambios considerables en su coloración. También se analizaron muestras que se sometieron a este proceso de deslignificación por 9 y 12 horas, pero la solución al no presentar cambios significativos en su coloración estos tiempos no se consideraron para este proceso, por lo que se escogió un tiempo óptimo de deslignificación de 6 horas la cual se tuvo en cuenta para estandarizar el proceso. Cabe aclarar que el análisis que se le hizo a cada solución fue un análisis cualitativo basado en el cambio de la coloración que este presentaba al pasar el tiempo. Al retirar las muestras de madera de la solución pasada las 6 horas, estas van a tener un color café el cual indica la cantidad de lignina presente en la superficie de la muestra que luego será retirado en el proceso de blanqueo.

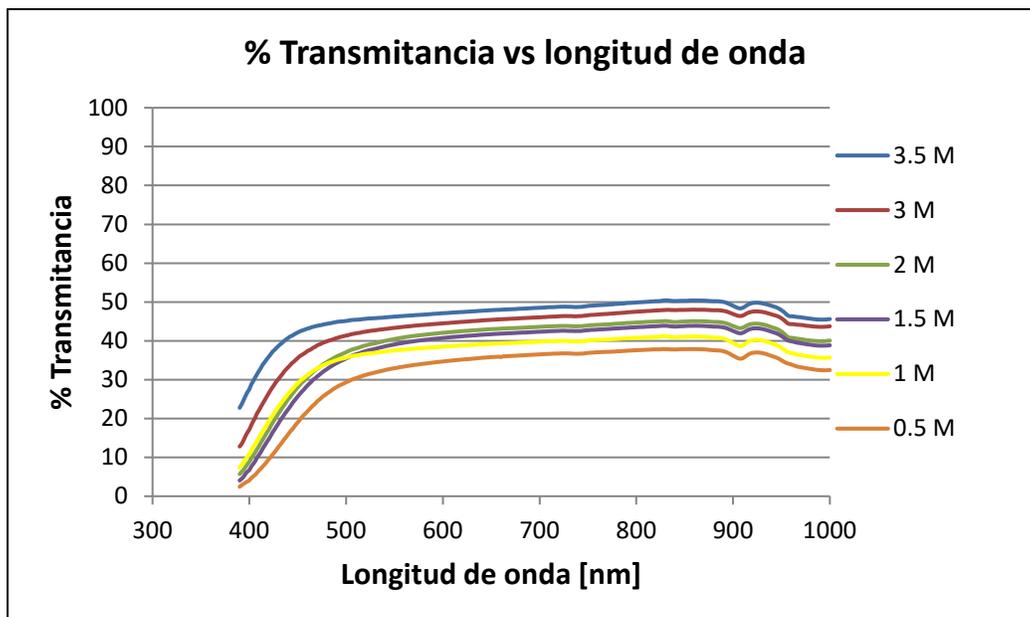
La presión óptima de infiltración de la resina epóxica fue de 25 inHg aplicando 4 ciclos de vacío con una duración de 30 minutos cada uno. Se evidenció que estas condiciones de vacío son variables críticas en la fabricación de la madera transparente, pues una presión superior a 25 inHg por más de 4 ciclos causó agrietamiento y deformación en la estructura interna de la madera (ver figura 2, a); sin

embargo, cuando las pruebas se realizan a bajas presiones y por un corto periodo de tiempo ocurre una infiltración imparcial del polímero y la madera se seca como se puede observar en la figura 2, b. No obstante, llevar el proceso por más de 2 horas o un tiempo indefinido bajo las condiciones óptimas de presión favorece la inmersión completa, pero esto tiene un efecto secundario, ya que la resina se polimeriza con presencia de burbujas de aire (ver figura 2, c).



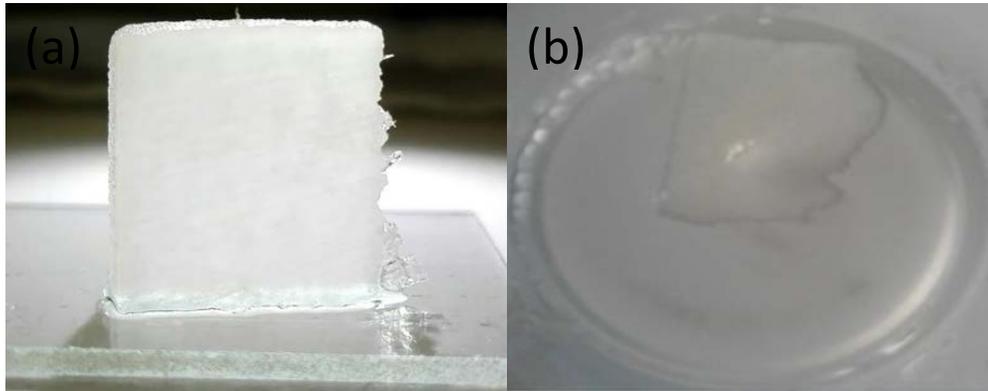
**Figura 1.** Efecto del tiempo, cantidad de ciclos y presión de vacío en la infiltración de la resina epóxica a la madera luego del tratamiento con peróxido de hidrógeno (autores).

La figura 3 muestra el resultado de las mediciones UV-visible de transmitancia óptica para las muestras de madera con un espesor de 3 mm variando la concentración de la solución de blanqueo con peróxido de hidrógeno (0,5 M – 4 M) en un rango de longitudes de onda de 300 nm a 1000 nm. Se puede observar que el porcentaje de transmitancia es directamente proporcional a un aumento de la concentración de la solución blanqueadora, describiendo una tendencia logarítmica similar entre cada una de las tomas.



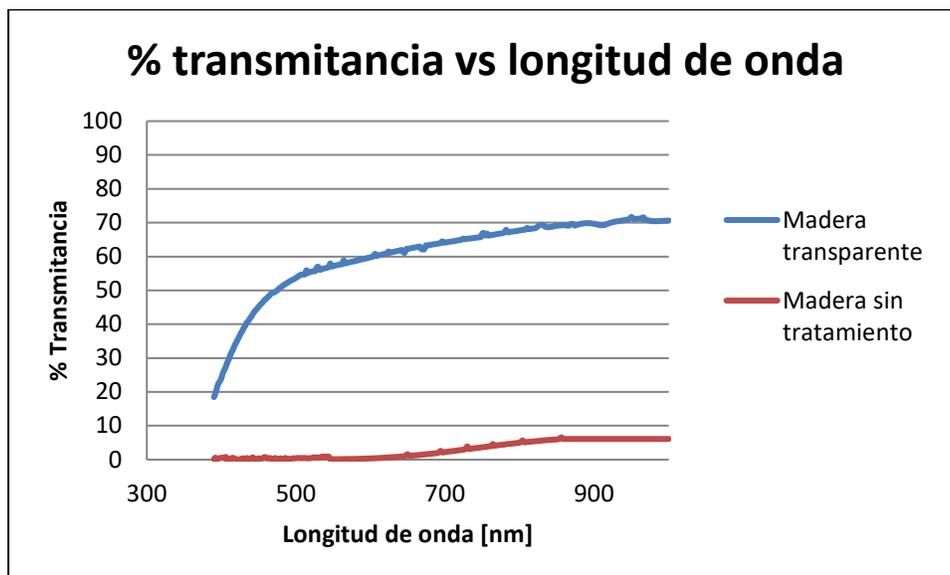
**Figura 2.** UV-visible de transmitancia óptica de madera blanqueada variando la concentración de la solución de blanqueo con peróxido de hidrógeno (0,5 M – 4 M) en un rango de longitudes de onda de 300 nm a 1000 nm.

Todas las muestras permiten atravesar la luz a una longitud de onda de 390 nm con un 3% de transmisión a una molaridad de 0,5 y del 22% para muestras 3.5 M, siendo ésta última la mejor concentración para el tratamiento de la madera llegando a reportar 50% de transmitancia por encima de 800 nm (ver figura 4, a). Se podría decir que seguir aumentando la concentración de la solución favorecería la transmisión de la luz por encima de éste valor, pero no ocurrió así, ya que para el tratamiento a 4 M la alta concentración de peróxido degrada la *Ochroma pyramidale* en trozos o la disuelve completamente (ver figura 4, b).



**Figura 3.** (a) Madera blanqueada en solución 3.5 M de peróxido de hidrógeno con transmitancia del 50%, (b) Degradación de la madera en solución 4 M (autores).

La figura 5 muestra las medidas de transmitancia óptica de la madera transparente después del proceso de infiltración al vacío con resina epóxica y de la madera sin ningún tipo de tratamiento. Se obtuvo una transmitancia máxima de aproximadamente el 71% por encima de 900 nm.



**Figura 4.** UV-visible de transmitancia óptica en la madera transparente y la madera sin tratamiento en un rango de longitudes de onda de 300 nm a 1000 nm.

Por otro lado, se puede ver que la madera de balsa sin tratamiento alguno exhibe una transmitancia casi del 0%. Esto se debe a la presencia de celulosa, lignina y hemicelulosa que absorben la mayor parte de la luz [6] y solo hay un cambio de 6% de transmisión para longitudes de onda superiores a 800 nm. Por esta razón, la mayor transmitancia de la madera transparente puede ser utilizada para desarrollar un nuevo tipo de ventanas a base de madera o el diseño de interiores en comparación a las ya existentes de vidrio o plástico (ver figura 6).



**Figura 5.** Obtención de madera ópticamente transparente con una transmitancia de 71% (autores).

## 5. Referencias

- [1] Zhu, M.; Song, J.; Li, T.; Gong, A.; Wang, Y.; Dai, J.; Yao, Y.; Luo, W.; Henderson, D. and Hu, L. (2016). Highly Anisotropic, highly transparent wood composites. *Advanced Materials*, Vol. 28, No.26, pp. 5181-5187.
- [2] Russel, A. and Richard, L.G. (1984). Formation and Structure of Wood. *Advances in Chemistry*, Vol. 207, pp. 3-56.
- [3] Li, T.; Zhu, M.; Yang, Z.; Song, J.; Dai, j.; Yao, Y.; Pastel, G.; Yang, B. and Hu, L. (2016). Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation. *Advanced Energy Materials*, Vol. 6, No. 22, pp. 1-7.
- [4] Fink, S. (1992). Transparent wood – A new approach in the functional Study of wood structure. *Holzforschung*, Vol. 46, No. 5, pp. 403-408.
- [5] Li, Y.; Fu, Q.; Yu, S.; Yang, M. and Berglund, L. (2016). Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance. *Biomacromolecules*, Vol. 17, No. 4, pp. 1358-1364
- [6] Karlinasari, L.; Sabed, M.; Wistara, I. and Purwanto, Y. (2014). Near infrared (NIR) spectroscopy for estimating the chemical composition of (*Acacia mangium* Willd.) wood. *Journal of Indian Academy of Wood Science*, Vol. 11, No. 2, pp. 162-167.

## Sobre los autores

- **Iván Javier Soledad Pinilla:** Estudiante de ingeniería química, Universidad Industrial de Santander, [ivansoledad@hotmail.com](mailto:ivansoledad@hotmail.com)
- **Alexis Emir Llorente Martínez:** Estudiante de ingeniería química, Universidad Industrial de Santander, [alemloma@gmail.com](mailto:alemloma@gmail.com)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2017 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)