

**ESTUDIO DE LA DESLIGNIFICACIÓN Y BLANQUEO CON PERÓXIDO DE  
HIDRÓGENO DE ALGUNAS MADERAS TROPICALES A ALTA  
TEMPERATURA.**

**EDWIN RICARDO BENITEZ BENITEZ  
JIMY ALEJANDRO MONROY BENITEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

**ESTUDIO DE LA DESLIGNIFICACIÓN Y BLANQUEO CON PERÓXIDO DE  
HIDRÓGENO DE ALGUNAS MADERAS TROPICALES A ALTA  
TEMPERATURA.**

**EDWIN RICARDO BENITEZ BENITEZ  
JIMY ALEJANDRO MONROY BENITEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico**

**Director:  
RAMIRO MARTINEZ REY  
Ph. D. en Ingeniería Química.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

## AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Industrial de Santander (UIS)**, por permitirnos formarnos personal y profesionalmente en su alma máter.

A la **Escuela de Ingeniería Química** por entregarnos las bases y herramientas para salir a desempeñar nuestra profesión.

Al **PhD Ramiro Martínez Rey** por la experiencia y conocimientos compartidos, por la confianza depositada para hacernos partícipes de este proyecto.

A los **Técnicos del Laboratorio de Ingeniería Química Don Eduardo y Don Wilson** por el acompañamiento a lo largo del proyecto y su disposición de servicio en las diferentes etapas.

Al **Químico General Joaquín** por la colaboración y total disposición para realizar las diferentes pruebas en el espectrómetro uv-vis.

Al **Ingeniero Guillermo** por su asesoría y apoyo en la realización del proyecto.

Al **Ingeniero Elkin** por toda la experiencia aportada a este proyecto.

Al grupo de colegas Ocaña people por todas las experiencias vividas juntos y todo el conocimiento compartido durante estos últimos años.

*Señor gracias por los planes que tienes para mí, tu gracia y fortaleza ha permitido este logro.*

*A mi madre, María Mariela Benítez la mujer más luchadora fuente de mi inspiración, le agradezco a Dios infinitamente por darme a mí negrita como mamá.*

*A mis hermanos Luz, Ligia, Cristian, Nataly y Fernanda, que con su apoyo incondicional me han permitido alcanzar mí sueño.*

*A Angie Becerra por tu amor puro y sincero.*

**Edwin Ricardo Benitez Benitez**

*A Dios y a la Virgen María quienes inspiraron mi espíritu para concluir este proyecto exitosamente. A mis padres quienes me dieron la vida, educación, y apoyo en esta etapa. A mi novia, compañeros de estudio, maestros y amigos, quienes sin su ayuda no hubieran logrado hacer esta tesis, a todos ellos mil gracias desde el fondo de mi alma.*

***Jimmy Alejandro Monroy Benitez.***

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	23
1.1 REACTIVOS Y MATERIALES .....	24
1.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA. ....	24
1.3 PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN PARA LAS TRES MADERAS. ....	25
1.4 DETERMINACIÓN DE LIGNINA PARA LAS TRES MADERAS.....	25
1.5 BLANQUEO DE MADERA DESLIGNIFICADA .....	26
1.6 INFILTRACIÓN DE RESINA EPÓXICA .....	27
1.7 CARACTERIZACIÓN UV/VIS DE MUESTRAS DE MADERA.....	28
2. RESULTADOS .....	29
2.1 PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN.....	29
2.1.1 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL TIEMPO Y LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN.....	31
2.1.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA CON LA TEMPERATURA.....	35
2.2 BLANQUEO DE LAS MUESTRAS DE MADERA.....	37
2.3 INFILTRACIÓN DE RESINA EPÓXICA. ....	39
2.4 CARACTERIZACIÓN UV/VIS DE MUESTRAS DE MADERA.....	40
3. CONCLUSIONES .....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS.....	49

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Estructuras moleculares de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina.....	17
Figura 2. Madera de balsa. (a) Imagen segmento de madera, (b) imagen SEM de sección transversal, (c) imagen SEM de vista superior. ....	18
Figura 3. Madera de cedro amarillo. (a) Imagen segmento de madera, (b) imagen SEM de vista superior, (c) imagen SEM de sección transversal, (d) imagen SEM de sección transversal a 20 $\mu\text{m}$ . ....	18
Figura 4. Madera de roble. (a) Imagen segmento de madera, (b) imagen SEM de vista superior, (c) imagen SEM de sección transversal, (d) imagen SEM de sección transversal a 20 $\mu\text{m}$ . ....	19
Figura 5. Representación casa con techo de madera transparente.....	22
Figura 6. Esquema de la metodología de investigación.....	23
Figura 7. Muestras de madera sin someter a tratamiento, de izquierda a derecha: cedro, roble y balsa respectivamente. ....	30
Figura 8. Coloración de muestras de madera posterior al proceso de deslignificación, de izquierda a derecha: Cedro, Roble y Balsa respectivamente. ....	30
Figura 9. Presencia de transparencia en una muestra de balsa al final del proceso de deslignificación.....	30
Figura 10. Variación del contenido de lignina en la madera de balsa sometida a diferentes temperaturas durante el proceso de deslignificación. ....	31

Figura 11. Variación del contenido de lignina en la madera de roble sometida a diferentes temperaturas durante el proceso de deslignificación. ....	33
Figura 12. Variación del contenido de lignina en la madera de cedro amarillo sometida a diferentes temperaturas durante el proceso de deslignificación.....	34
Figura 13. Comportamiento de balsa, roble y cedro en el proceso de deslignificación a 403 K. ....	35
Figura 14. Comportamiento de balsa, roble y cedro en el proceso de deslignificación a 413 K. ....	35
Figura 15. Comportamiento de balsa, roble y cedro en el proceso de deslignificación a 423 K. ....	36
Figura 16. Muestra amarilla en el proceso de blanqueo, de izquierda a derecha: balsa, roble y cedro, respectivamente. ....	38
Figura 17. Muestra de madera completamente blanqueada, de izquierda a derecha: cedro y balsa, respectivamente. ....	38
Figura 18. Muestra de madera roble, deslaminación en el proceso de blanqueo. ....	38
Figura 19. Muestras de madera al finalizar el proceso de infiltración, izquierda cedro, derecha balsa. ....	39
Figura 20. Resultado final, muestras infiltradas y completamente secas, izquierda cedro, derecha balsa. ....	40
Figura 21. Uv-vis de la madera cedro amarillo antes y después del tratamiento. ....	40
Figura 22. Uv-vis de la madera de balsa antes y después del tratamiento. ....	41

## LISTA DE ANEXOS

**Pág.**

ANEXO A. PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN A TEMPERATURAS MAYORES 433 K. ....	49
ANEXO B. PROCESO DE BLANQUEO MAL REALIZADO. ....	50
ANEXO C. MONTAJE EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS A) DESLIGNIFICACIÓN, B) BLANQUEO, C) INFILTRACIÓN DE RESINA EPÓXICA. ....	51
ANEXO D. PROCESO EXPERIMENTAL EN LA DETERMINACIÓN DE LIGNINA EXTRAÍDA EN LA ETAPA DE DESLIGNIFICACIÓN, APLICACIÓN DE LA NORMA DE LA TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY T 222 OM-02. ....	53
ANEXO E. PORCENTAJE DE LIGNINA RETIRADA A 423 K. ....	54

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA DESLIGNIFICACIÓN Y BLANQUEO CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO DE ALGUNAS MADERAS TROPICALES A ALTA TEMPERATURA \*

**AUTORES:** EDWIN RICARDO BENITEZ BENITEZ.  
JIMY ALEJANDRO MONROY BENITEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** MADERA ÓPTICAMENTE TRANSPARENTE, DESLIGNIFICACIÓN, TRANSMITANCIA, BLANQUEO, RESINA EPÓXICA.

### DESCRIPCIÓN:

La madera ha venido siendo un tema de interés investigativo por su aplicación a tecnologías emergentes. Los estudios recientes han utilizado maderas blandas y temperaturas inferiores a 373 K. En la presente investigación se utilizó un reactor Parr 4560 acoplado a un controlador de temperatura Parr 4848 para la etapa de deslignificación; con este equipo se lograron temperaturas mayores a las reportadas por los estudios mencionados. De esta manera se pudo observar que durante el proceso de deslignificación se obtuvieron mejores porcentajes de retiro de lignina a temperaturas mayores de 373 K.

Ya que los estudios previos tomaron como materia de estudio el balsa (madera blanda), en este estudio se utilizaron tres tipos de maderas tropicales: balsa, roble y cedro que representa una madera blanda, una semi-dura y dura respectivamente. Estos tres tipos de madera se sometieron al proceso de deslignificación y se analizó el efecto del tiempo y la temperatura para cada madera; posteriormente se realizó un blanqueo e infiltración, con el objetivo de obtener maderas con propiedades ópticas transparentes.

Para muestras de maderas de 2 mm de espesor infiltradas con resina epóxica se obtuvieron transmitancias de 70% para el balsa y 75% para cedro amarillo a longitudes de onda de 800 a 900 nm. Para la madera dura no se pudo realizar las pruebas de transmitancia debido a que en la etapa de blanqueo la muestra de roble se deshace a consecuencia de su estructura rígida.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías de Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ramiro Martínez Rey. Ph. D. en Ingeniería Química.

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF THE DELIGNIFICATION AND BLEACHING WITH HYDROGEN PEROXIDE OF SOME TROPICAL WOODS AT HIGH TEMPERATURE.\*

**AUTHORS:** EDWIN RICARDO BENITEZ BENITEZ,  
JIMY ALEJANDRO MONROY BENITEZ\*\*

**KEYWORDS:** OPTICAL TRANSPARENT WOOD, DELIGNIFICATION, TRANSMITTANCE, BLEACH, EPOXY RESIN.

### DESCRIPTION:

The wood has been a subject of investigative interest by its application to emerging technologies. Recent studies have used softwoods and temperatures below 273 K. In the present investigation was used a 4560 Parr Reactor coupled to a 4848 Parr temperature controller for the delignification stage; higher temperatures that those reported by the mentioned studies were reached with this equipment. In this way, better rates of lignin removal were observed at greater temperatures than 273 K during the delignification process.

Taking into account that previous investigations took the balsa (wood) as case study; in this paper were used three types of tropical woods: balsa, oak and cedar that represents a softwood, semi-hard and hard respectively. These three types of wood were underwent to the process of delignification and the effect of time and temperature for each wood were analyzed. Subsequently, with the aim of obtaining wood with transparent optical properties, bleaching and infiltration were carried out.

At wavelengths of 800 to 900 nm, transmittances of 70% and 75% were obtained for balsa and yellow cedar respectively, both samples with 2 mm thickness infiltrated with epoxy resin. Transmittance test could not be realized in hardwood due to the fact that the sample falls apart during the bleaching stage, as a result of its rigid structure.

---

\* Undergraduate Project.

\*\* physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Advisor: Ramiro Martínez Rey. Chemical Engineer, Ph.D.

## INTRODUCCIÓN

El mundo está en constante crecimiento económico y debido a esto hay un aumento en la demanda de consumo de energía. [1], el sector residencial consume el 11% de la energía eléctrica del país, la mayor parte de esta energía se suministra a través de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural [2], que resultan en la producción de gases de efecto invernadero y contribuyen al calentamiento global. Según informes recientes, la temperatura global ha estado aumentando continuamente en los últimos 100 años llegando a subir un grado en este periodo. [3], [4]. Por esto se hace necesario la búsqueda de alternativas eficientes y renovables para el ahorro energético [5], una de las formas de reducir la cantidad de energía que se consume en el sector residencial es complementar edificios con exteriores semitransparentes, estos edificios pueden reducir potencialmente la utilización de luz artificial al sustituirla por luz natural.

Actualmente se realizan investigaciones en la búsqueda de materiales renovables con propiedades ópticas que permitan el paso de la luz para ser utilizados en el sector de la construcción y extender su aplicabilidad a diferentes ramas como: la fotónica, celdas solares de película delgada y celdas fotoelectroquímicas [5]; la madera ópticamente transparente sería un material que contribuiría al desarrollo de estas nuevas ramas.

La madera es un material que ha estado presente en nuestro diario vivir con excelentes propiedades mecánicas, térmicas, estructurales y decorativas [6], y por lo tanto es útil para la fabricación de papel, cartón, estructuras de viviendas etc.; Sin embargo la madera natural sufre grandes afectaciones por el medio ambiente [8] ya que la madera tiende a absorber humedad cuando se expone al agua, lo que produce un deterioro progresivo en su estructura [7]; pero aun así el desarrollo tecnológico hace que la madera pueda mejorar sus propiedades y tenga mucho más

que ofrecernos en ramas emergentes como bioingeniería, electrónica flexible y energía limpia [5].

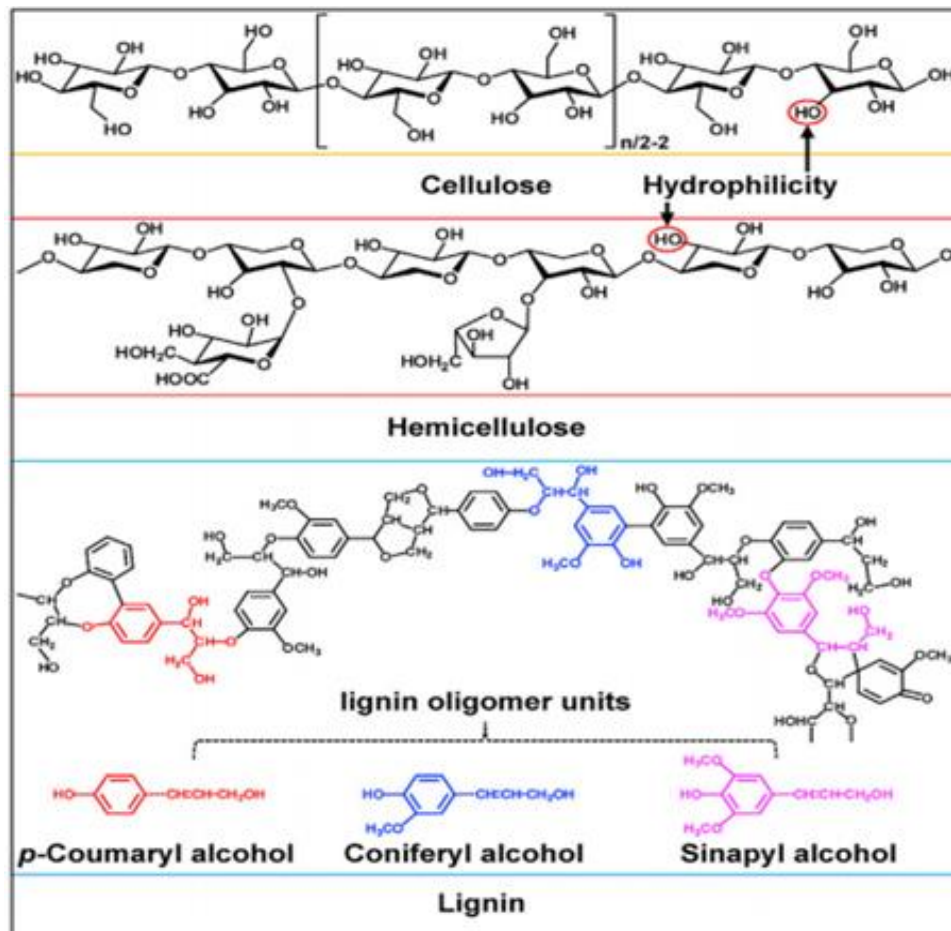
Este material multifuncional, heterogéneo, higroscópico y anisotrópico [9], está compuesto principalmente por los siguientes componentes: materiales orgánicos e inorgánicos (4%-10%), celulosa y hemicelulosa (65%-75%) y por último la lignina (18%-35%). La celulosa y hemicelulosa forman una matriz ópticamente incolora [6], la celulosa es un polisacárido (figura 1) de cadena larga compuesto por 7000-15000 unidades de monómeros de glucosa que forman la fibra estructural del reino vegetal, la hemicelulosa constituida por polisacáridos amorfos de cadena corta formada por unidades monoméricas y grupos ácidos. La lignina es un compuesto fenólico complejo amorfo (figura 1) la cual se encuentra en las paredes celulares de la planta proporcionando rigidez en los árboles [10], [11]. El color natural de la madera es opaco y no permite el paso de la luz, esto se debe principalmente a la porosidad con diámetros en el orden de decenas de micrómetros que dispersan la luz en el rango visible, sumado todo esto a la absorción de la luz por parte de los grupos cromóforos presentes en la lignina. [12], [13].

De acuerdo a su microestructura, la madera se clasifica en tres tipos: maderas blandas formadas por dos tipos de células; las traqueidas que constituyen la mayor parte de las células, proporcionando el soporte estructural; este tipo de madera cuenta con buques de diámetro grande usados para el transporte de fluidos, nutrientes, y células parénquima, las cuales forman una estructura en forma de rayos (figura 2), las maderas semi-blandas están formadas por células traqueidas y parénquimas que componen los rayos formando una estructura similar a una caja (figura 3) y por último las maderas duras se componen de tres tipos de células: fibras, vasos y parénquimas, las celdas de fibras proporcionan soporte estructural (que constituyen 35-70% de la madera) con estructura tipo panel rígido, la conducción de fluidos es a través de vasos, células agrandadas con paredes delgadas y espacios de poro pequeño; tanto las maderas blandas como las

maderas duras tienen rayos, formados por células de parénquima más pequeñas y rectangulares. [16].

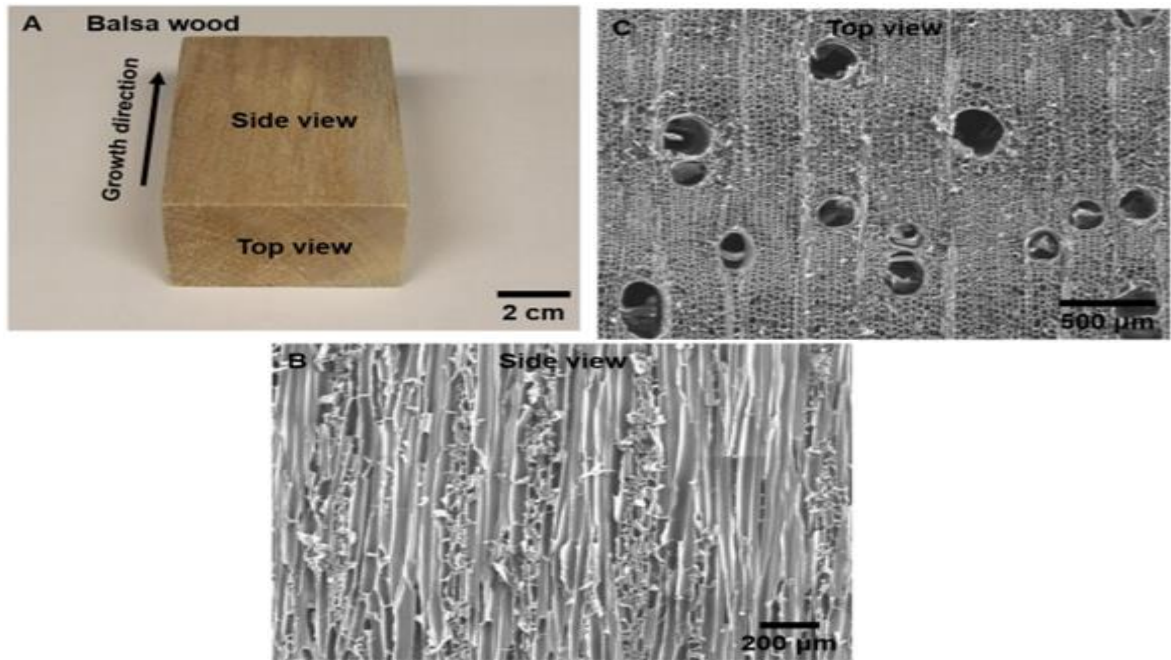
Para esta investigación se trabajó con madera blanda, balsa (*Ochroma pyramidale*), madera semi-dura, cedro amarillo (*Albizia guachapele*) y madera dura, roble (*Tabebuia rosea*).

Figura 1. Estructuras moleculares de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina.



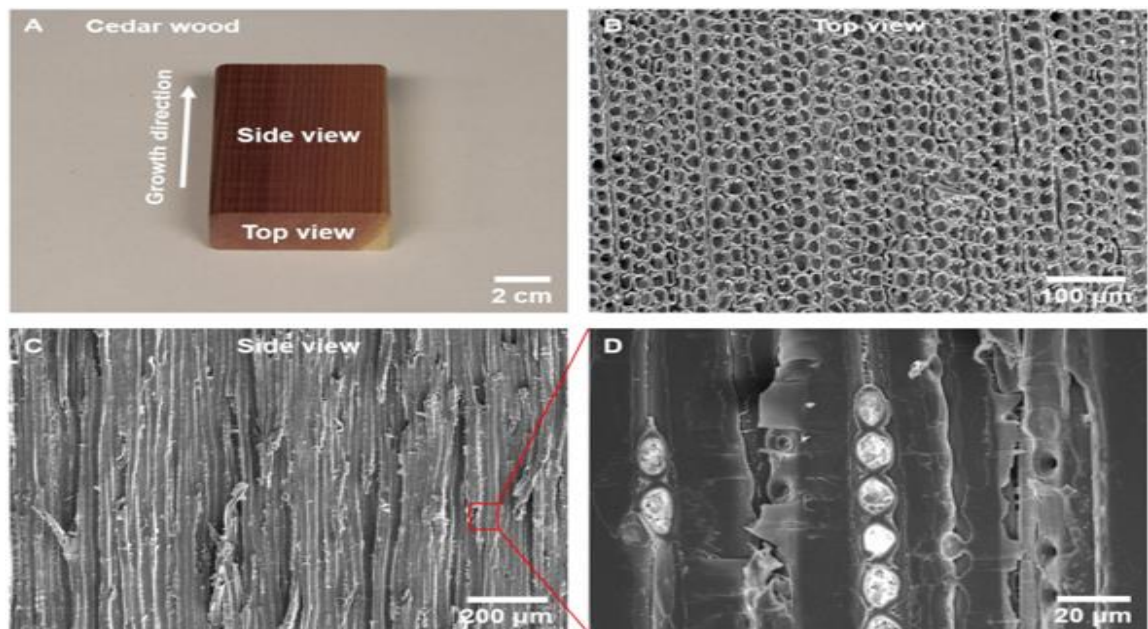
Fuente: Modificado de Joule (2017) [16].

Figura 2. Madera de balsa. (a) Imagen segmento de madera, (b) imagen SEM de sección transversal, (c) imagen SEM de vista superior.



Fuente: modificado de Joule (2017) [16].

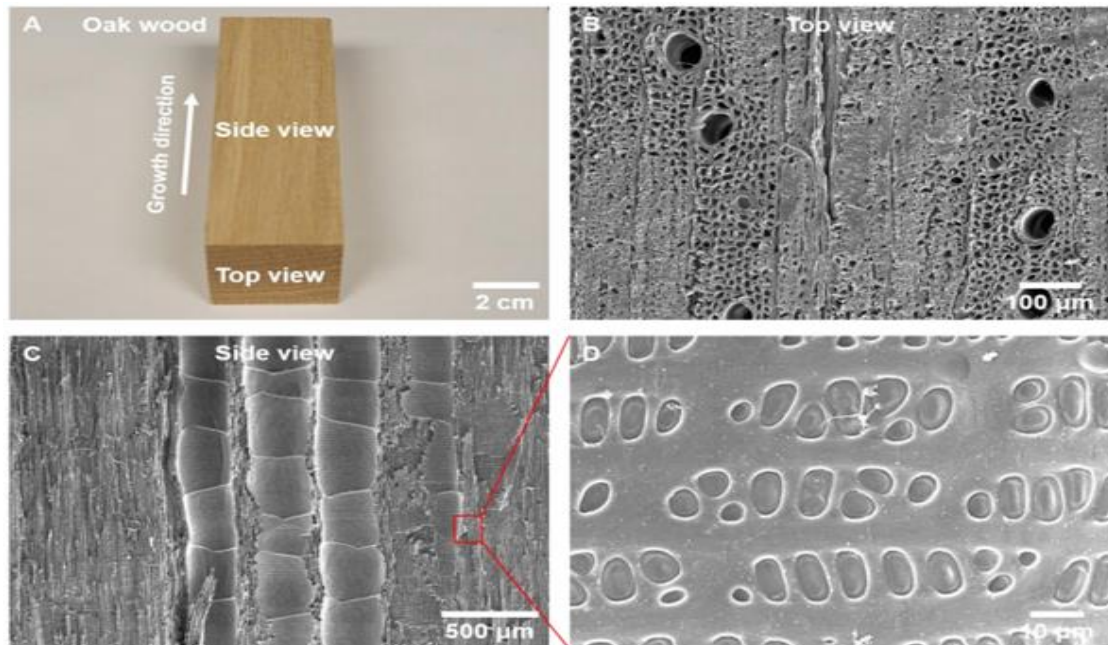
Figura 3. Madera de cedro amarillo. (a) Imagen segmento de madera, (b) imagen SEM de vista superior, (c) imagen SEM de sección transversal, (d) imagen SEM de sección transversal a 20 μm.



Fuente: Modificado de Joule (2017) [16].

Las diferencias estructurales en la madera también conducen a variaciones en sus propiedades. Una de ellas es la densidad de la madera, la cual varía significativamente con la especie, desde  $175 \text{ kg m}^{-3}$  para la madera de balsa sienta esta la más liviana hasta más de  $1,000 \text{ kg m}^{-3}$  para algunos tipos de sándalo; la densidad está directamente relacionada con la porosidad, característica significativa en la clasificación de la madera de acuerdo a su estructura, esta particularidad diferencia la madera blanda, semi-dura y dura. La existencia de elementos de vasija, en la madera dura predominan con diámetros de lumen grandes y traqueidas (figura 4), en la madera semi-dura se encuentran en menor cantidad con diámetros de lumen pequeños y traqueidas (figura 3), y por último la madera blanda se caracteriza por tener gran cantidad de traqueidas muy alargadas con un diámetro del lumen más pequeño interconectadas a través de fosas dando soporte estructural (figura 2) [21].

Figura 4. Madera de roble. (a) Imagen segmento de madera, (b) imagen SEM de vista superior, (c) imagen SEM de sección transversal, (d) imagen SEM de sección transversal a  $20 \mu\text{m}$ .

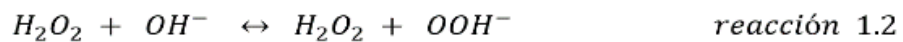


Fuente: Modificado de Joule (2017) [16].

La estructura anisotrópica con la que cuenta la madera ha llamado la atención de muchos investigadores [6],[11],[14],[17],[18],[19], los cuales han realizado procesos para la obtención de madera transparente; estos procesos están dados por tres etapas secuenciales: Deslignificación, blanqueo e infiltración.

La deslignificación es donde se lleva a cabo la remoción del contenido de lignina presente en la madera mediante su solubilización y dejando intacta la estructura mesoporosa compuesta por celulosa y hemicelulosa. Se han desarrollado dos técnicas para esta etapa, la primera de ellas se basa en la utilización de clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ) a 352 K con tiempos de proceso de 6 a 12 horas [14],[15],[16], y la segunda utilizando hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a temperatura de ebullición en tiempos de proceso de 6 a 12 horas [6],[11],[17],[18],[19].

Es común que la madera presente niveles bajos de blancura después de retirarle la lignina debido a que parte de lignina removida queda atrapada en la madera y no es posible extraerla [18], por lo cual se hace necesario hacer un proceso de blanqueo con peróxido de hidrógeno [6],[11],[17],[18],[19], el cual al estar en medio alcalino produce iones perhidroxilo como lo indica las reacciones 1.1 y 1.2, estos iones reaccionan con los grupos cromóforos (grupos carbonilos conjugados) presentes en la lignina para producir aldehídos y ácidos carboxílicos incoloros dejando la madera de color blanco. Este proceso debe llevarse con pH menores a 10,5 y temperaturas menores a 353 K para evitar la descomposición del peróxido que está dada por la reacción 1.3 [20].



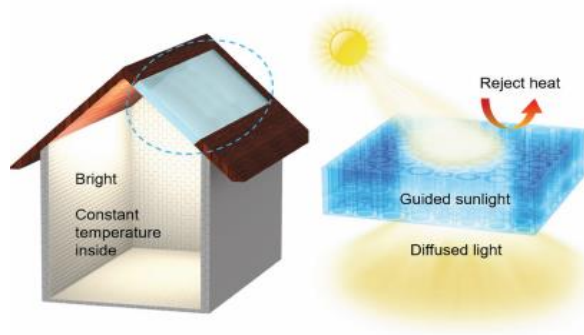
Luego de blanquear la madera, se recubre con una solución polimérica con propiedades ópticas transparentes y un índice de refracción similar a la madera blanqueada esto con el fin de evitar la dispersión de la luz ( índice de refracción de la pared celular de la madera =1,53) [21], las muestras se introducen en una cámara de vacío con el fin de desgasificar la mezcla, al retirar la muestra de la cámara de vacío el polímero se infiltra por acción de gravedad, llenando los espacios dejados por la lignina y los micro poros presentes; la homogeneidad de la filtración del polímero en esta etapa conlleva a una mejor consistencia y transparencia de la muestra final[18],[19].

Los resultados obtenidos durante el proceso secuencial en las tres etapas han alcanzado transmitancias de hasta el 90% para la madera de balsa con láminas menores a 1 mm de espesor [14], [17], 60 % para láminas de 2 mm de espesor [14] y 50% para láminas de 3 mm de espesor [18], reportado por estudios realizados en la Universidad Industrial de Santander; adicional a esto las muestras presentan altos valores de niebla óptica en todos los casos superando valores del 80%.

Estas propiedades de la madera transparente hace que pueda ser utilizada como material prometedor en la construcción de techos y ventanas de viviendas o edificios como se ilustra en la figura 5 reemplazando parcialmente la luz artificial por luz natural; estas piezas podrían tener mayores propiedades mecánicas que las que posee el vidrio y a la vez servir de aislante natural por la baja conductividad térmica que presenta la madera [11],[16], otro posible uso y en el cual hay mucho por estudiar es el recubrimiento de paneles solares con láminas delgadas de madera transparente lo cual disminuye el reflejo y aumenta el camino óptico de los rayos

de luz lo que facilita su absorción [22], este fenómeno aumenta la eficiencia de los paneles solares de un 15 a 18 % [17].

Figura 5. Representación casa con techo de madera transparente.



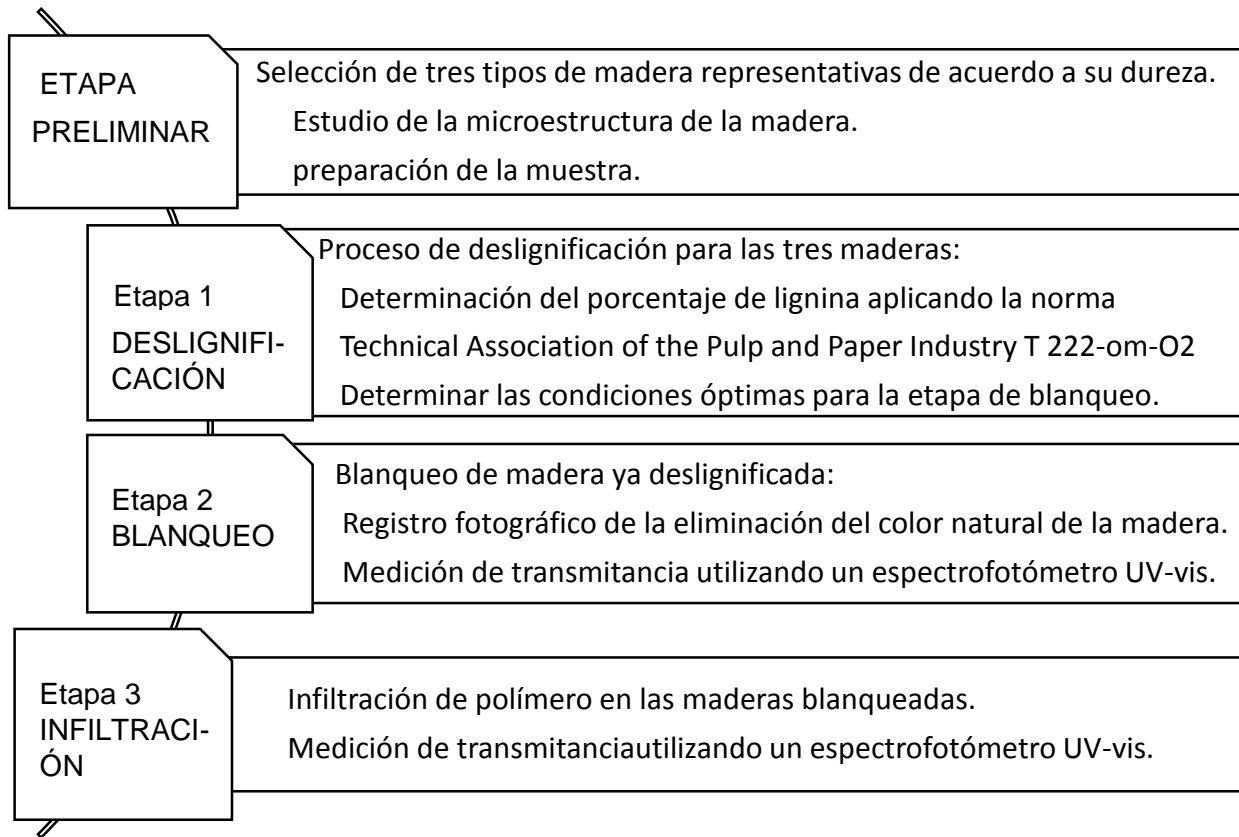
Fuente: Modificado de Advanced Energy Materials (2016) [11].

Este proyecto tiene como objetivo el estudio de las maderas de balsa, cedro amarillo y roble; madera blanda, semi-dura y dura respectivamente, con el fin de obtener madera transparente; para esto las maderas serán sometidas a tres procesos: Deslignificación con temperaturas mayores a 373 K usando una disolución de NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> donde se determinarán las condiciones óptimas de tiempo y temperatura; Posterior a esto se realizara un blanqueo químico utilizando una solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y finalmente se realizara la infiltración de resina epoxica a la madera en condiciones de vacío, al producto de estos dos últimos procesos se les realizará pruebas de transmitancia para analizar su posible uso como material semi-transparente.

## 1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

En esta unidad se describen los materiales, equipos y metodología implementada para la fabricación de madera transparente. La metodología experimental adoptada para el desarrollo de este proyecto de investigación se describe con algunas modificaciones de investigaciones previas y se representa en el esquema de la figura 6.

Figura 6. Esquema de la metodología de investigación.



## 1.1 REACTIVOS Y MATERIALES

Durante la investigación se trabajó con tres tipos de madera: el balsa, el roble flor morado y el cedro amarillo. El balsa (*Ochroma pyramidale*) fue adquirida en Balsa de Colombia Ltda, Café Madrid, Bucaramanga y el roble flor morado (*Tabebuia rosea*) al igual que cedro amarillo (*Albizia guachapele*) fueron obtenidas en Pauna, Boyacá. Los reactivos utilizados para la extracción lignina presente en la madera fueron: hidróxido de Sodio (NaOH, Laboratorios León S.A) y sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, Chemi). Para el blanqueo se usó una solución de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 35% Laboratorios Leon S.A); En el proceso de infiltración se utilizó como polímero, resina epóxica (Crystal clear epoxy resin; parte A, resina epóxica, parte B, endurecedor con base polimercaptano, East Coast Resin, USA). Los disolventes utilizados fueron isopropanol (2-propanol, 98%, Arquilab Ltda) y agua desionizada (Laboratorio Escuela de Ingeniería Química).

## 1.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

Las maderas fueron cortadas de forma perpendicular al crecimiento de los árboles, esto con el fin de retirar más fácil la lignina de la madera [6]; para esto se empleó una sierra eléctrica (Metabo KGS 305) para obtener muestras de 20 mm x 20 mm con un espesor de 2 mm, Culminado el proceso de corte se realizó un lijado suave utilizando papel lija referencia N° 180 con el propósito de eliminar defectos del corte y finalmente se hace un lavado con agua destilada a 323 K para eliminar rastros de polvo generados en el corte.

### **1.3 PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN PARA LAS TRES MADERAS.**

Estudios anteriores han realizado el proceso de deslignificación a temperaturas inferiores a 373 K [6],[11],[17][18],[19]; por el contrario en este estudio, el proceso de deslignificación se realizó a temperaturas mayores a 373 K ya que a estas temperaturas se espera que el proceso sea más eficiente en la eliminación de la lignina; adicionalmente ensayos preliminares determinaron que la temperatura máxima para el procesos de deslignificación de la muestras de madera es de 433 K ya que a esta temperatura las tres maderas se deshace totalmente obteniendo una especie de suspensión ver anexo (Anexo A), por tal razón se eligieron como temperaturas de experimentación 403 K, 413 K y 423 K, para cada temperatura se realizaron estudios de deslignificación a cuatro tiempos diferente: 1 hora, 2 horas, 4 horas y 6 horas de tratamiento.

La solución de deslignificación se preparó como lo sugiere Hu et al (2016) “se disuelve hidróxido de sodio (NaOH) 2,5 M y sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) 0,4 M utilizando como solvente agua desionizada”, seguidamente se colocan las muestras de manera horizontal al interior del reactor Parr 4560, acoplado a un sistema de control de temperatura Parr 4848 utilizando como refrigerante agua a 298 K, (ver anexo C) se hace necesario utilizar este tipo de reactor ya que se manejan temperaturas mayores a 373 K(temperatura normal de ebullición del agua); al terminar los ciclos se retiran las muestras y se lavan con abundante agua desionizada teniendo cuidado para evitar rupturas.

### **1.4 DETERMINACIÓN DE LIGNINA PARA LAS TRES MADERAS.**

Terminada la etapa de deslignificación se lavan las muestras para retirar la lignina ya disuelta y posteriormente ser secadas en un horno a una temperatura de 378 K durante tres horas, tiempo al cual se alcanza peso constante [18], luego del secado

completo se someten a molienda con el fin de obtener harina de madera utilizando un molino Tecnal referencia Wiley (TE-650) y tamiz N° 60, seguidamente a la harina de madera se aplica la norma de determinación de lignina (Technical Association of the Pulp and Paper Industry T 222 om-02) [23], (Anexo D), la cual consiste en añadir 15 ml de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 72% en peso a 1 g de harina de madera seca, posterior a esto se mantiene la solución a 293 K agitando cada 15 min durante 2 h. Al concluir el tiempo la solución se transfiere a un matraz Erlenmeyer de 1L y se diluye hasta llegar a una concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3% en peso; esta solución se lleva a ebullición en un sistema de reflujo durante 4 h. Al terminar la solución es filtrada en un crisol Gooch de porosidad media y se lava con 100 ml de agua destilada caliente; la materia insoluble retenida se seca en un horno a 378 K hasta alcanzar peso constante; El contenido de lignina fue determinado con la siguiente ecuación:

$$\% \text{lignina} = \frac{\text{Peso insolubles}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

Este estudio realizado a diferentes tiempos y diferentes temperaturas y para cada tipo de madera se grafica en porcentaje de lignina vs el tiempo de tratamiento. El tiempo para el cual el porcentaje de lignina permanece aproximadamente constante para las diferentes maderas a temperatura 423 K son 2 horas, este se tomó como el tiempo de tratamiento que será utilizado en la etapa de deslignificación. Ver los resultados presentados en la figura 15.

### **1.5 BLANQUEO DE MADERA DESLIGNIFICADA**

Luego de definir la temperatura y el tiempo óptimo para el proceso de deslignificación se procede a realizar la etapa de blanqueo a las siguientes condiciones: en una solución blanqueadora de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 3,5 M (Hu et al 2016) se sumergen las muestras; este proceso se realizó en caja petri con el fin de manipular más fácil las muestras. La solución se mantuvo a 343 K ya que

el rango óptimo de blanqueo está reportado de 343 a 353 K, [20], para llegar a esta temperatura se hacen rampas de 10 K; estabilizado el setpoint para el nuevo intervalo y continuando el proceso hasta llegar a 343 K, esto con el fin de no desestabilizar la reacción y mantener estable el peróxido. Realizar cambios bruscos en la temperatura provoca resultados indeseados como los mostrados en el Anexo B. Para esta etapa se usó una plancha de calentamiento marca C-MAG HS 7D-IKA la cual cuenta con sistema de control de temperatura. La remoción en la cantidad de lignina en la etapa deslignificación está directamente relacionada con el tiempo de blanqueo; para la madera de balsa el tiempo de blanqueo es más corto que para la madera de cedro debido a su estructura desorganizada y menos rígida, la madera de roble no se logra blanquear; esta fase acaba cuando desaparece el color café o amarillo presente en las láminas de madera; culminado el proceso se lava con abundante agua destilada y se conserva en una solución de alcohol isopropílico.

## **1.6 INFILTRACIÓN DE RESINA EPÓXICA**

Una vez blanqueada las muestras de madera se conservan en isopropanol con el fin de evitar efectos de secado [18], se procede a preparar la mezcla de resina epóxica, la cual consiste en mezclar en proporción 1:1 el componente A, resina epóxica y el componente B de la resina a temperatura ambiente mezclando suavemente para evitar la aparición de pequeñas burbujas indeseadas en el proceso. Esto se realiza durante 5 minutos o hasta obtener un color completamente transparente [19].

Antes de realizar la infiltración las muestras se deshidratan sumergiendo nuevamente las muestras de madera en 20 mL de alcohol isopropílico durante 10 minutos tal como lo sugiere [19], con el fin de retirar la mayor cantidad de agua presente en la madera; luego en una caja Petri se recubre la muestra con la resina previamente preparada y se infiltra al vacío para desgasificar mediante un sistema compuesto por un desecador de 200 mm, placa de porcelana (vidrio borosilicato

3.3, SIMAX con válvula para conexión de vacío), un vacuometro de conexión vertical de 2,5 in y una bomba de vacío marca Welch de referencia 1405; la presión de vacío alcanzada por el sistema es de 28 inHg, este proceso se lleva a cabo en 3 repeticiones cada una de 30 minutos con el fin de garantizar una completa infiltración. Al terminar la muestra de madera se retira de la cámara de vacío y se deja en reposo durante 5 horas a temperatura ambiente, finalizado este tiempo la muestra de madera es retirada de la caja Petri y es colocada sobre papel aluminio para así continuar el secado a temperatura ambiente hasta que el polímero solidifique completamente.

### **1.7 CARACTERIZACIÓN UV/VIS DE MUESTRAS DE MADERA.**

Una vez secado los trozos de madera blanqueadas e infiltradas con la resina epóxica se procede a realizar mediciones de transmitancia en luz visible en el rango de 400 a 800 nm, Para esto se utilizó el espectrofotómetro SPECORD 210 PLUS UV/VIS con una esfera de integración de 60mm de diámetro.

## 2. RESULTADOS

### 2.1 PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN.

En la figura 7 se presentan las maderas de balsa, cedro y roble que fueron sometidas a el proceso de deslignificación; este proceso se realizó en el reactor batch descrito en la sección 1.3 con una solución de NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> a 423 K y 2 horas de reacción; condiciones determinadas tras a ver graficado el porcentaje de lignina retirada vs el tiempo de reacción, a estas condiciones se mantuvo durante las dos horas.

Pasadas las dos horas de reacción las muestras presentan un color oscuro como el mostrado en la figura 8, esto debido a que parte de la lignina retirada queda atrapada en la madera; en la figura 9 se observa que a pesar del color negro que presentan las muestras ya se evidencia translucidez.

Después de dos horas de reacción de deslignificación a 423 K se pierden propiedades mecánicas, esto lo evidencia la madera de roble que a pesar de ser una madera dura una ligera flexión causa la ruptura de la muestra; caso contrario ocurre con la madera de balsa con estructura más entrelazada y por lo tanto soporta una mayor flexión. Las maderas blandas de balsa y semi-dura de roble sometidas a 423 K y 2 horas de reacción, presentan mejores características para ser sometidas a la etapa de blanqueo.

Figura 7. Muestras de madera sin someter a tratamiento, de izquierda a derecha: cedro, roble y balsa respectivamente.

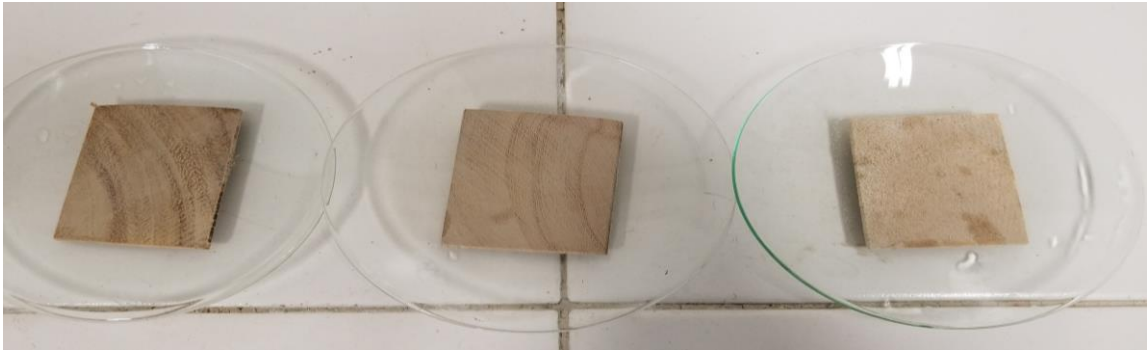


Figura 8. Coloración de muestras de madera posterior al proceso de deslignificación, de izquierda a derecha: Cedro, Roble y Balsa respectivamente.

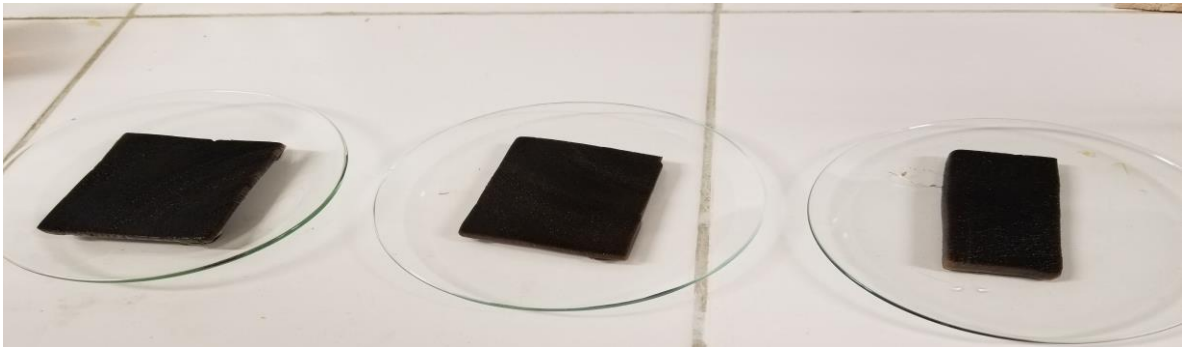
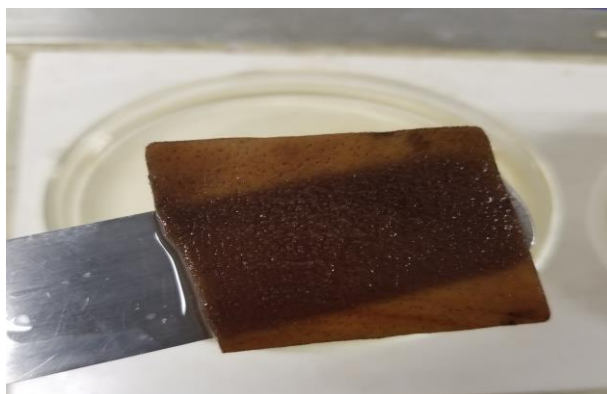


Figura 9. Presencia de transparencia en una muestra de balsa al final del proceso de deslignificación.

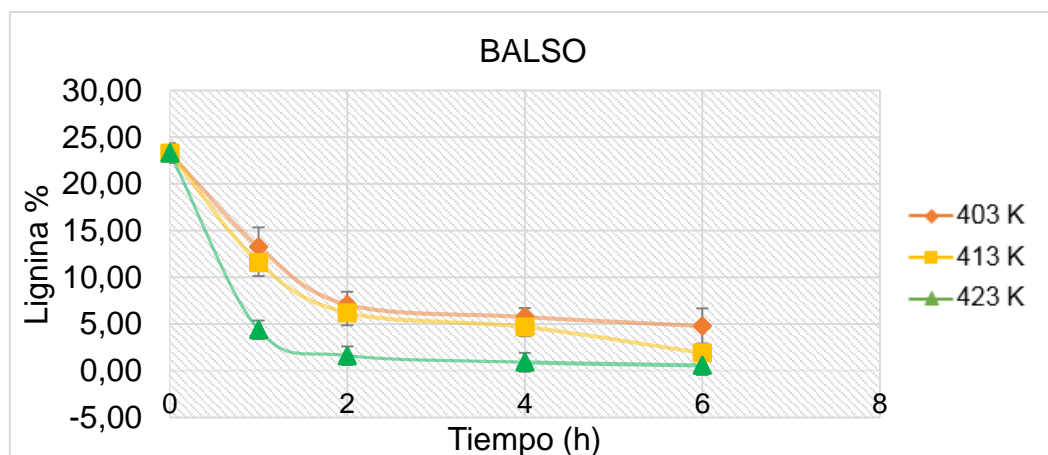


### 2.1.1 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL TIEMPO Y LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN.

El proceso para determinar los parámetros de tiempo y temperaturas más óptimos en la remoción de lignina, se hizo partiendo de estudios anteriores los cuales reportaron [18], un tiempo óptimo de 6 horas a temperaturas inferiores a 373 K. partiendo de este rango de experimentación se evaluaron tres temperaturas menores a 433 K por lo expuesto en el apartado 1.3; las temperaturas seleccionadas fueron 403 K, 413 K y 423 K. para la comparación se realizan las figuras 10, 11 y 12, que relacionan el porcentaje de lignina retirada vs el tiempo de operación; es evidente observar como el aumento del tiempo favorece la remoción del contenido de lignina para las tres muestras de madera a las tres temperaturas mencionadas anteriormente.

Tratándose de un sistema cerrado estas temperaturas están en función a la presión de vapor de la solución acuosa: 1.3 atm a 403 K, 1.5 atm a 413 K y 1.7 atm a 423 K. variable que no afecta el proceso de deslignificación significativamente.

Figura 10. Variación del contenido de lignina en la madera de balsa sometida a diferentes temperaturas durante el proceso de deslignificación.

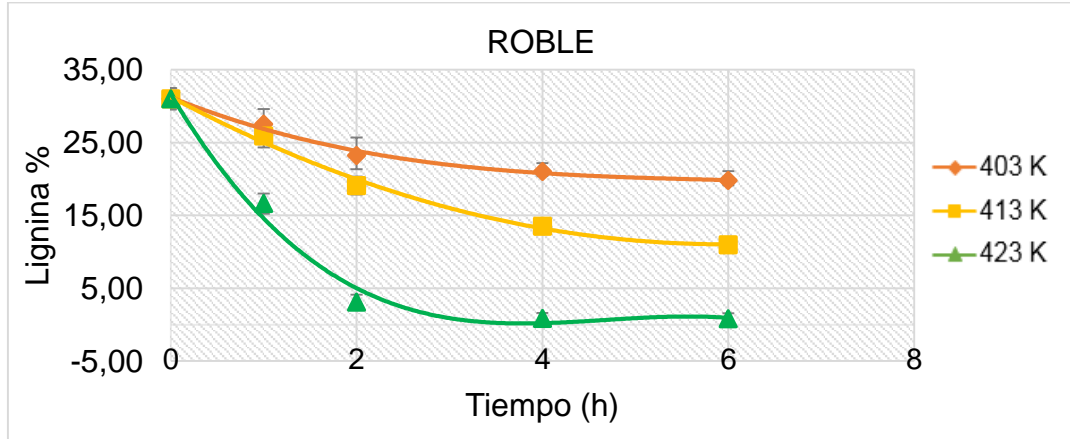


En la figura 10 se observa que el balsa (madera blanda), inicialmente presenta un 23% de lignina en su composición; para las primeras 2 horas de reacción el porcentaje de la lignina decrece rápidamente y luego permanecer constante, esto se debe a que inicialmente se remueve la lignina de las capas superficiales de la madera la cual se extrae con mayor facilidad; a partir de las dos horas de reacción la cantidad de lignina retirada es mínima debido a que la solución deslignificadora no logra penetrar totalmente, haciendo difícil la remoción [19].

A mayores temperaturas el proceso de disolución facilita la extracción de lignina como se ve en la figura 10, en la cual se observa que a 423 K la curva posee una mayor pendiente; debido a que la solución disuelve la lignina de capas superficiales dándole paso a la solución deslignificadora para que pueda reaccionar en la parte más interna de la madera [18], a las dos 2 horas de reacción el porcentaje de lignina sobrante en la madera es 7%, 6% y 1,5% aproximadamente a temperaturas de 403 K, 413 K y 423 K respectivamente, para la madera blanda de balsa. Debido a que los grupos cromóforos presentes en la lignina son uno de los encargados de absorción de la luz se infiere que con un valor tan bajo de lignina presente en la muestra de madera de balsa y siendo la celulosa y hemicelulosa insolubles en la solución, con una estructura entrelazada; la madera de balsa posee las características esenciales para obtener madera ópticamente transparente.

Estudios reportados del proceso de deslignificación realizados anteriormente en la Universidad Industrial de Santander, utilizando una mezcla de igual composición de NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> para la madera blanda de balsa y mostraron que para un proceso de 6 horas se obtienen porcentajes de lignina de 16%, 13% y 11% para temperaturas de 343 K, 363 K y 371 K respectivamente, lo que corrobora los resultados obtenidos en esta investigación, donde el aumento de la temperatura tiene un efecto significativo a la hora de retirar la lignina haciendo más eficiente el proceso, con mejores resultados.

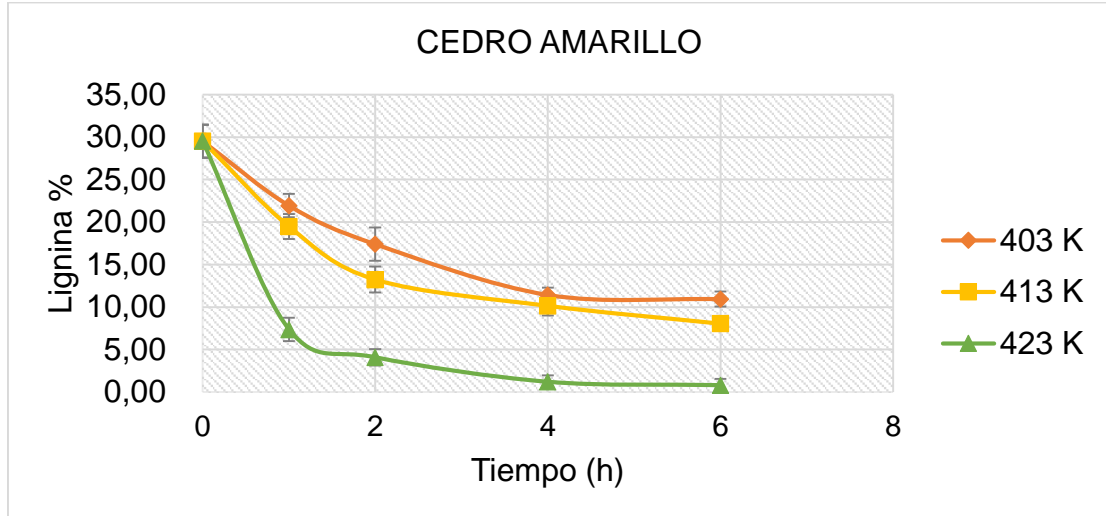
Figura 11. Variación del contenido de lignina en la madera de roble sometida a diferentes temperaturas durante el proceso de deslignificación.



En la figura 11 se observa que el roble, una madera dura con un porcentaje de lignina inicial de 31%, representa un comportamiento similar a la madera de balsa, donde en las primeras horas se retira la mayor cantidad de lignina, adicionalmente en esta figura podemos observar el efecto de la temperatura con mayor claridad en un tiempo de dos horas se obtuvieron porcentajes de lignina de 22%, 19% y 5% para temperaturas de 403 K, 413 K y 423 K respectivamente. Para este tipo de madera no hay estudios reportados para el proceso de deslignificación usado en esta investigación.

La existencia de elementos de vasija, en la de roble (madera dura) predominan con diámetros de lumen grandes ver figura 4, estos buques unidos principalmente por la lignina y al ser retirada afectan la estructura generando posibles problemas en la etapa de blanqueo.

Figura 12. Variación del contenido de lignina en la madera de cedro amarillo sometida a diferentes temperaturas durante el proceso de deslignificación.



En la figura 12 se observa el comportamiento del cedro amarillo una madera semi-dura con un porcentaje de lignina inicial de 29%, esta madera presenta un comportamiento similar a la madera de balsa y roble, por lo cual se constatar que a pesar de la estructura amorfa y anisotrópica de la madera los resultados siguen un mismo patrón, retirando la mayor cantidad de lignina en las primeras dos horas con porcentajes de lignina de 17%. 13% y 4% para temperaturas de 403 K, 413 K y 423 K respectivamente. Al igual que el roble para este tipo de madera no hay estudios reportados en el proceso de deslignificación.

Observando las figuras 10, 11 y 12 para tiempos superiores a dos horas el porcentaje de lignina retirada es baja y considerando que la temperatura con mejores resultados es de 423 K; se tomaran como puntos óptimos de referencia 2 horas de proceso a 423 K.

## 2.1.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA CON LA TEMPERATURA.

Las figuras 13, 14 y 15 muestran el comportamiento del porcentaje de lignina retirado en el proceso de deslignificación vs el tiempo de reacción a 403 K, 413 K y 423 K de temperatura para la madera de balsa, cedro y roble.

Figura 13. Comportamiento de balsa, roble y cedro en el proceso de deslignificación a 403 K.

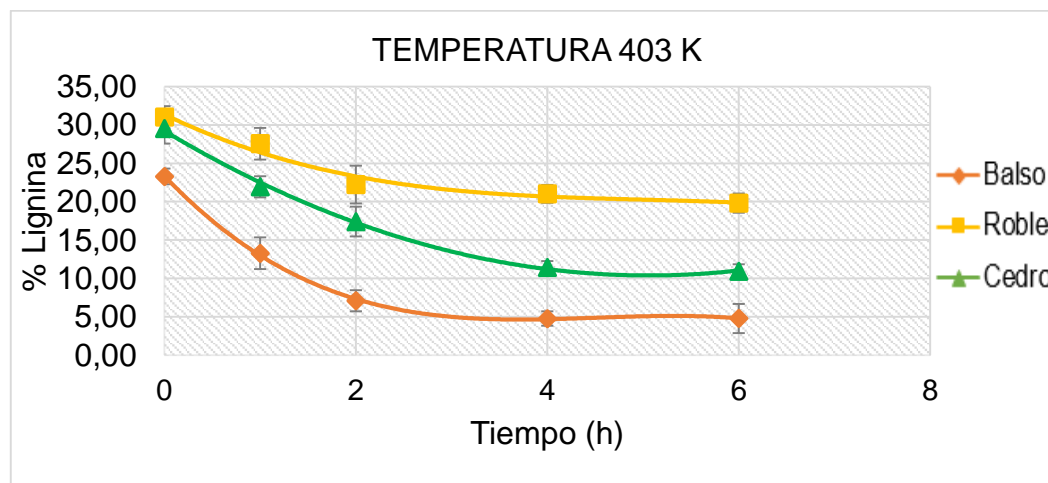


Figura 14. Comportamiento de balsa, roble y cedro en el proceso de deslignificación a 413 K.

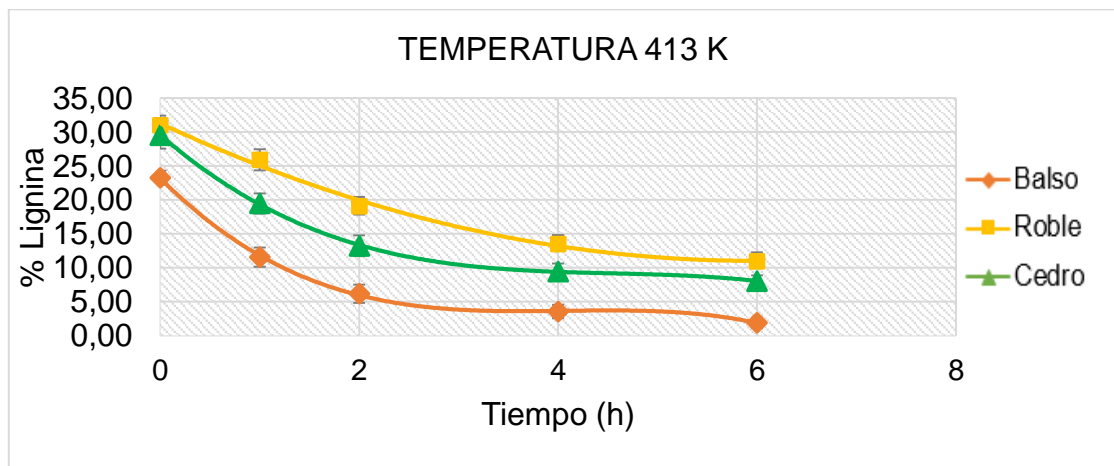
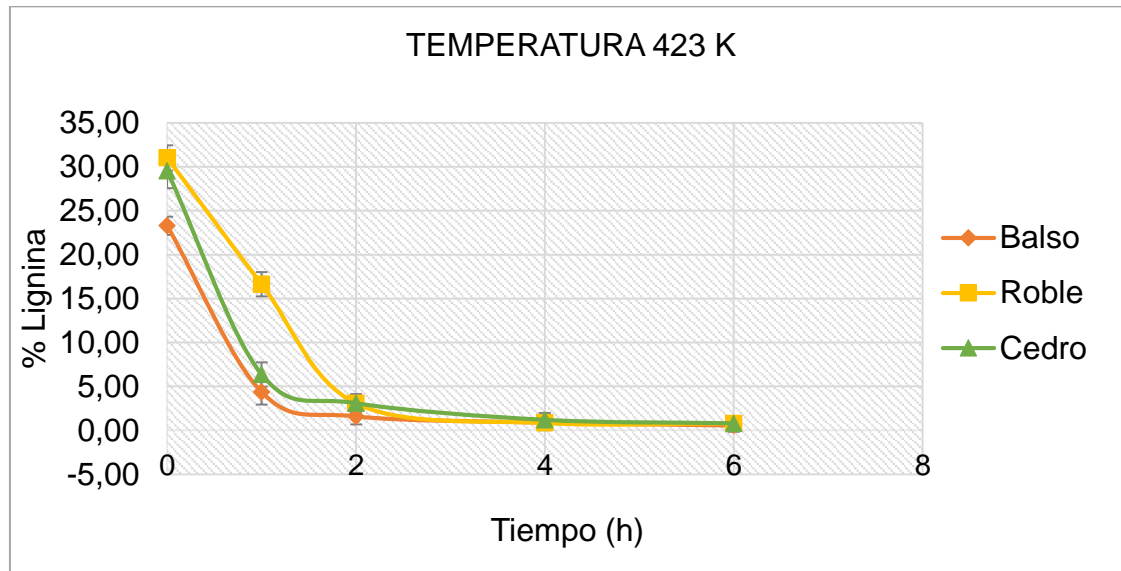


Figura 15. Comportamiento de balsa, roble y cedro en el proceso de deslignificación a 423 K.



En las gráficas 13,14,15 se observa que para todas las temperaturas el comportamiento es semejante con disminución de contenido de lignina en todas las maderas, durante el proceso la madera que logró mayor eficiencia fue el balsa donde el porcentaje de lignina presenta los valores menores a lo largo del proceso, ver anexo E , la madera de roble es la que más dificultades presenta a la hora de extraerse el contenido de lignina y el cedro presenta un comportamiento medio como era de esperarse al observar las figura 2 C, figura 3 B y figura 4 B, donde se ilustra el corte transversal para la madera de balsa, cedro y roble respectivamente. Al ser comparadas estas figuras se percibe que el roble presenta una estructura más compacta propia de las maderas duras, haciendo que sea necesario mayor tiempo y temperatura para retirar la lignina, ya que el espacio entre fibras de celulosa, hemicelulosa y lignina es muy reducido lo que dificulta la penetración de la solución de deslignificación, de la misma manera se observa que el balsa presenta una estructura más porosa, facilitando la disolución de lignina. Para el tiempo y la temperatura escogida las tres maderas presentan valores similares en porcentajes de lignina.

## 2.2 BLANQUEO DE LAS MUESTRAS DE MADERA.

Como se observa en la figura 8 las muestras presentan un color oscuro, por lo cual se sumergen las muestras en una solución de peróxido de Hidrógeno ( $H_2O_2$ ). Una vez sumergidas las muestras en la solución éstas van perdiendo el color oscuro y gradualmente se tornan de color amarillo pálido, como se muestra en la figura 16, hasta perder completamente el color y las muestras quedan completamente blancas, como se ilustra en la figura 17. Esto se debe a que la lignina restante del proceso deslignificación reacciona con los iones per hidroxilos produciendo aldehídos y ácidos carboxílicos que junto a la celulosa y hemicelulosa forman una matriz incolora [20]; el tiempo que tarda en blanquearse totalmente la muestra es variable debido a la estructura anisotrópica de la madera, pero las mediciones se ubican de 25 a 60 minutos.

El proceso de blanqueo del roble presenta un comportamiento diferente a la madera de cedro y balsa ya que esta no logra blanquearse totalmente y su estructura se empieza a debilitar al punto que la muestra termina totalmente desintegrada en el proceso, esto se debe a que las maderas duras presentan una distribución más compacta y menos porosa en comparación a las maderas blandas como se ilustra en la figura , la lignina aparte de cumplir funciones de soporte estructural es una de las encargadas de unir la celulosa y hemicelulosa y su eliminación repercute en dejar la estructura más débil; al iniciar la etapa de blanqueo la matriz debilitada no soporta el proceso por tal razón empieza a ver una deslaminación en la madera, que termina deshaciéndose completamente [16], este comportamiento se observa en la figura 18.

Figura 16. Muestra amarilla en el proceso de blanqueo, de izquierda a derecha: balsa, roble y cedro, respectivamente.

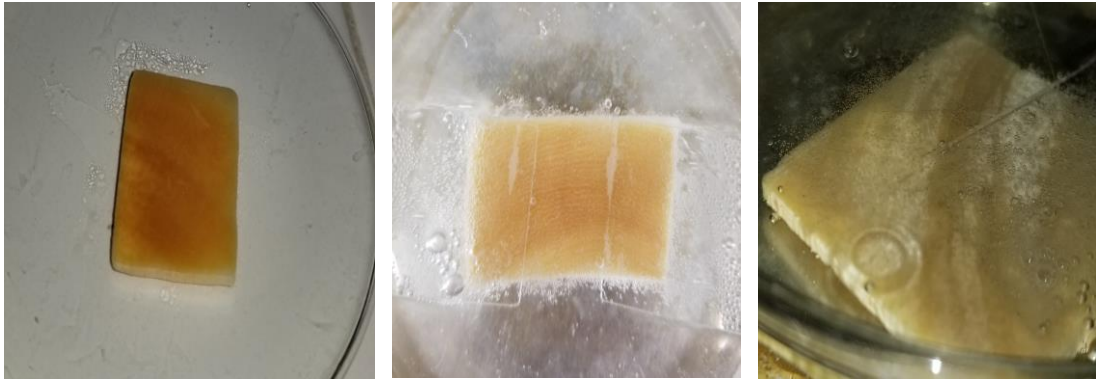


Figura 17. Muestra de madera completamente blanqueada, de izquierda a derecha: cedro y balsa, respectivamente.

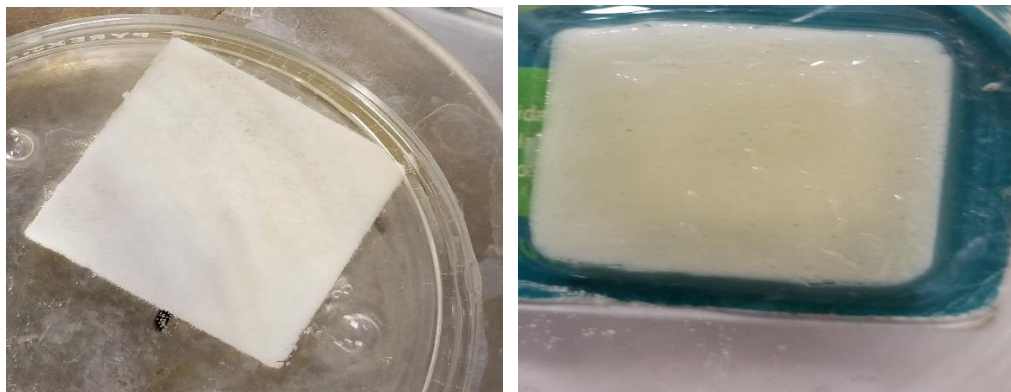


Figura 18. Muestra de madera roble, deslaminación en el proceso de blanqueo.



### 2.3 INFILTRACIÓN DE RESINA EPÓXICA.

Al iniciar el proceso de desgasificación se observa que a medida que se incrementa el vacío, la mezcla heterogénea de madera y solución de resina epóxica empieza a burbujear, esto debido a que el alcohol y aire presente en la muestra empieza a salir de la matriz de madera, al finalizar cada ciclo de media hora se retira el vacío y la resina se infiltra dentro de la madera por acción de la gravedad.

Al finalizar se observa que la muestra es totalmente transparente como se ilustra en la figura 19, del mismo modo es evidente que la madera conserva la porosidad y estructura inicial, sin embargo, al iniciar el proceso de secado las muestras pierden transparencia y se tornan amarillentas esto debido a la acción del catalizador encargado de endurecer la mezcla, el resultado final de este proyecto se evidencia en la figura 20.

Figura 19. Muestras de madera al finalizar el proceso de infiltración, izquierda cedro, derecha balsa.

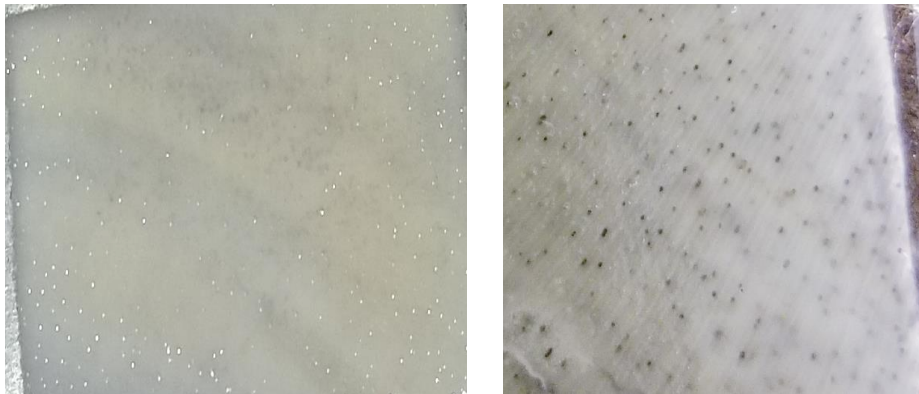


Figura 20. Resultado final, muestras infiltradas y completamente secas, izquierda cedro, derecha balsa.



#### 2.4 CARACTERIZACIÓN UV/VIS DE MUESTRAS DE MADERA.

Las muestras de cedro y balsa fueron sometidas a un análisis Uv-Vis con el objetivo de conocer los cambios porcentuales de transmitancia en el desarrollo del proceso, para esto se analizaron muestras sin tratamiento, al finalizar el blanqueo y finalmente las muestras infiltradas con resina epóxica; en la figura 21 se ilustra los cambios de transmitancia en el cedro amarillo y la figura 22 en la madera de balsa.

Figura 21. Uv-vis de la madera cedro amarillo antes y después del tratamiento.

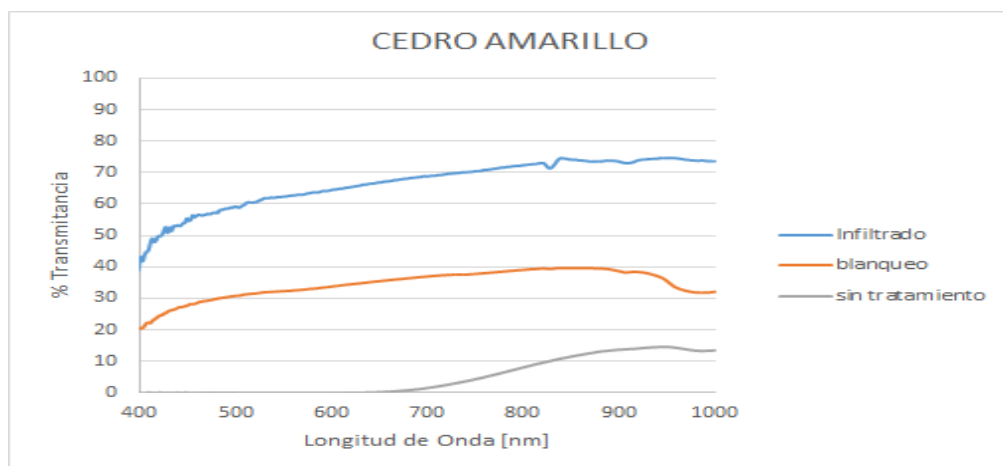
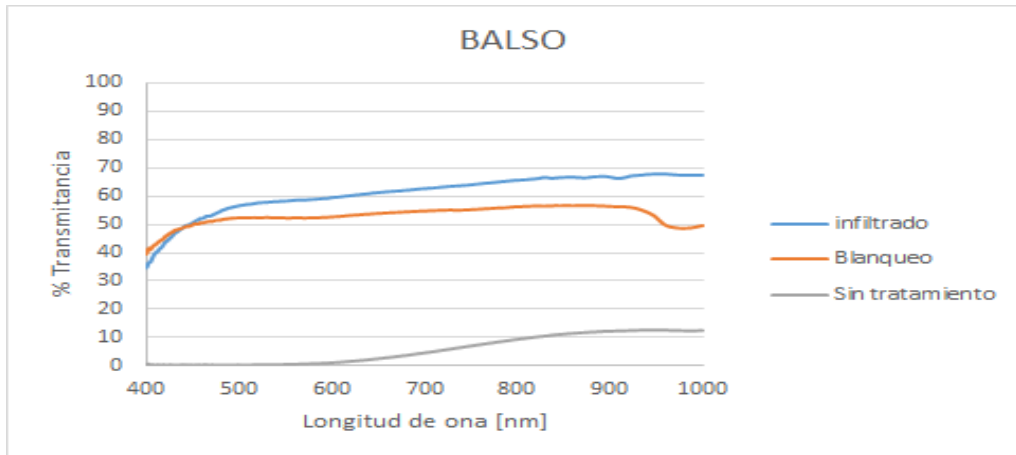


Figura 22. Uv-vis de la madera de balsa antes y después del tratamiento.



En las gráficas se observa que la muestras sin tratamiento no superan el 20% en todos los rangos de longitudes de onda, esto se debe a la presencia de lignina en la madera la cual por sus grupos cromóforos absorbe los haces de luz [14]; al finalizar el proceso de blanqueo en rangos de 800 a 900 nm solo presenta el 40% y 55% de transmitancia para el cedro y balsa respectivamente, estos valores no son mayores debido a la gran diferencia que existe entre los índices de refracción del aire y la Holocelulosa (celulosa y hemicelulosa), 1.0 y 1,53 respectivamente que generan dispersión de la luz [18] , por tal motivo al infiltrar la madera con resina epóxica con índice de refracción de 1,60; similar al de la Holocelulosa la dispersión de la luz disminuye y aumenta la transmitancia, a valores de 75% para el cedro y 70% para el balsa en un rango de longitudes de onda de 800 a 900 nm.

### 3. CONCLUSIONES

El aumento del tiempo y la temperatura en el proceso de deslignificación con NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> favorece la eliminación de lignina en todas las muestras de madera, siendo 423 K y 2 horas de tratamiento el punto óptimo para llevar a cabo el proceso.

Para la madera dura se hace más difícil eliminar el contenido de lignina, debido a que su estructura es muy compacta lo que dificulta la penetración de la solución de NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> en la madera.

Al ser infiltradas las muestras de madera con resina epóxica se alcanzan transmitancias de 70% y 75% para la madera de balsa y cedro amarillo respectivamente, estos valores demuestran que efectivamente la madera puede tener uso importante al ser utilizado como material semi-transparente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yaddanapudi, Haritha Sree, et al. "Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications." *Vacuum* 146 (2017): 649-654.
- [2] Ministerio de Minas y Energía – Unidad de Planeación Minero Energético UPME. Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2016 – 2021. Versión para discusión. (2016).
- [3] Vermeer, Martin, and Stefan Rahmstorf. "Global sea level linked to global temperature." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106.51 (2009): 21527-21532.
- [4] Hansen, James, et al. "Global surface temperature change." *Reviews of Geophysics* 48.4 (2010).
- [5] Zhu, Hongli, et al. "Wood-derived materials for green electronics, biological devices, and energy applications." *Chemical reviews* 116.16 (2016): 9305-9374.
- [6] Zhu, Mingwei, et al. "Highly anisotropic, highly transparent wood composites." *Advanced materials* 28.26 (2016): 5181-5187.
- [7] Lu, Yan, Miao Feng, and Hongbing Zhan. "Preparation of SiO<sub>2</sub>-wood composites by an ultrasonic-assisted sol-gel technique." *Cellulose* 21.6 (2014): 4393-4403.
- [8] Zhu, Hongli, et al. "Transparent paper: fabrications, properties, and device applications." *Energy & Environmental Science* 7.1 (2014): 269-287.
- [9] Fan, Tong-Xiang, Suk-Kwun Chow, and Di Zhang. "Biomorphic mineralization: from biology to materials." *Progress in Materials Science* 54.5 (2009): 542-659.

[10] PARHAM, RUSSELL A., and RICHARD L. GRAY. "Formation and structure of wood." 1984. 3-56.

[11] Li, Tian, et al. "Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation." *Advanced Energy Materials* 6.22 (2016).

[12] Li, Yuanyuan, et al. "A new perspective on transparent wood: Lignin-retaining transparent wood." *ChemSusChem* (2017).

[13] Fink, Siegfried. "Transparent wood—a new approach in the functional study of wood structure." *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood* 46.5 (1992): 403-408.

[14] Li, Yuanyuan, et al. "Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance." *Biomacromolecules* 17.4 (2016): 1358-1364.

[15] Jia, Chao, et al. "Scalable, anisotropic transparent paper directly from wood for light management in solar cells." *Nano Energy* 36 (2017): 366-373.

[16] Jia, Chao, et al. "Rich Mesostructures Derived from Natural Woods for Solar Steam Generation." *Joule* 1.3 (2017): 588-599.

[17] Zhu, Mingwei, et al. "Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells." *Nano Energy* 26 (2016): 332-339.

[18] Mesa Sierra, Elkin Leonardo "Estudio de los Procesos de Deslignificación con NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> e Infiltración de Silicato de Sodio en la Madera de Balsa". Universidad Industrial de Santander. Trabajo de Grado: Ingeniero Químico. (2017).

[19] Llorente Martínez, Alexis Emir & soledad Pinilla, Iván Javier. "Estudio de la aplicación del método de obtención de madera ópticamente transparente para las maderas de balso y pauche". Universidad Industrial de Santander. Trabajo de Grado: Ingeniero Químico. (2017).

[20] García, C., et al. "Estudio cinético de la descomposición del peróxido de hidrógeno en condiciones de extrema alcalinidad." Rev Cien Tecnol Medio Ambiente. II Separata 2: 1 16 (2004).

[21] Gibson, Lorna J. "The hierarchical structure and mechanics of plant materials." Journal of the Royal Society Interface (2012): rsif20120341.

[22] Chen, Chaoji, et al. "Highly flexible and efficient solar steam generation device." Advanced Materials 29.30 (2017).

[23] Effland, Marilyn J. "Modified procedure to determine acid-insoluble lignin in wood and pulp." Tappi; (United States) 60.10 (1977).

## BIBLIOGRAFÍA

CHEN, Chaoji, et al. Highly flexible and efficient solar steam generation device. *Advanced Materials*, 2017, vol. 29, no 30.

EFFLAND, Marilyn J. Modified procedure to determine acid-insoluble lignin in wood and pulp. *Tappi;(United States)*, 1977, vol. 60, no 10.

FAN, Tong-Xiang; CHOW, Suk-Kwun; ZHANG, Di. Biomorphic mineralization: from biology to materials. *Progress in Materials Science*, 2009, vol. 54, no 5, p. 542-659.

FINK, Siegfried. Transparent wood—a new approach in the functional study of wood structure. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 1992, vol. 46, no 5, p. 403-408.

GARCÍA, C., et al. Estudio cinético de la descomposición del peróxido de hidrógeno en condiciones de extrema alcalinidad. *Rev Cien Tecnol Medio Ambiente. II Separata 2: 1*, 2004, vol. 16.

GIBSON, Lorna J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012, p. rsif20120341.

HANSEN, James, et al. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 2010, vol. 48, no 4.

JIA, Chao, et al. Rich Mesostructures Derived from Natural Woods for Solar Steam Generation. *Joule*, 2017, vol. 1, no 3, p. 588-599.

JIA, Chao, et al. Scalable, anisotropic transparent paper directly from wood for light management in solar cells. *Nano Energy*, 2017, vol. 36, p. 366-373.

LI, Tian, et al. Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation. *Advanced Energy Materials*, 2016, vol. 6, no 22.

LI, Yuanyuan, et al. A new perspective on transparent wood: Lignin-retaining transparent wood. *ChemSusChem*, 2017.

LI, Yuanyuan, et al. Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance. *Biomacromolecules*, 2016, vol. 17, no 4, p. 1358-1364.

LLORENTE MARTÍNEZ, Alexis Emir & SOLEDAD PINILLA, Iván Javier. “Estudio de la aplicación del método de obtención de madera ópticamente transparente para las maderas de balsa y pauche”. Universidad Industrial de Santander. Trabajo de Grado: Ingeniero Químico. 2017.

LU, Yan; FENG, Miao; ZHAN, Hongbing. Preparation of SiO<sub>2</sub>-wood composites by an ultrasonic-assisted sol-gel technique. *Cellulose*, 2014, vol. 21, no 6, p. 4393-4403.

MESA SIERRA, Elkin Leonardo Estudio de los Procesos de Deslignificación con NaOH y Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> e Infiltración de Silicato de Sodio en la Madera de Balsa. Universidad Industrial de Santander. Trabajo de Grado: Ingeniero Químico. 2017.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA – UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICO UPME. Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2016 – 2021. Versión para discusión. 2016.

PARHAM, RUSSELL A.; GRAY, RICHARD L. Formation and structure of wood. 1984.

VERMEER, Martin; RAHMSTORF, Stefan. Global sea level linked to global temperature. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, vol. 106, no 51, p. 21527-21532.

YADDANAPUDI, Haritha Sree, et al. Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications. Vacuum, 2017, vol. 146, p. 649-654.

ZHU, Hongli, et al. Transparent paper: fabrications, properties, and device applications. Energy & Environmental Science, 2014, vol. 7, no 1, p. 269-287.

ZHU, Hongli, et al. Wood-derived materials for green electronics, biological devices, and energy applications. Chemical reviews, 2016, vol. 116, no 16, p. 9305-9374.

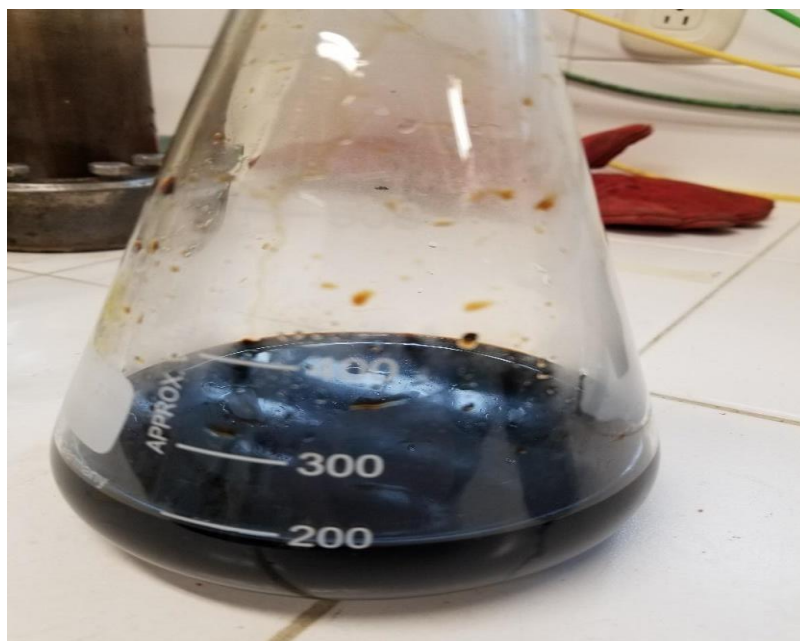
ZHU, Mingwei, et al. Highly anisotropic, highly transparent wood composites. Advanced materials, 2016, vol. 28, no 26, p. 5181-5187.

ZHU, Mingwei, et al. Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells. Nano Energy, 2016, vol. 26, p. 332-339.

## ANEXOS

### ANEXO A. PROCESO DE DESLIGNIFICACIÓN A TEMPERATURAS MAYORES 433 K.

Figura A.1. Muestra de madera completamente disuelta en la solución de NaOH y  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  realizando el proceso de deslignificación a 433 K.



Con el fin de conocer hasta que temperatura podría llevarse el proceso de deslignificación de las muestras de madera se realizaron varios experimentos preliminares, donde evidencio que a 433 K, se presentan resultados indeseados como los mostrados en la figura A1.

## ANEXO B. PROCESO DE BLANQUEO MAL REALIZADO.

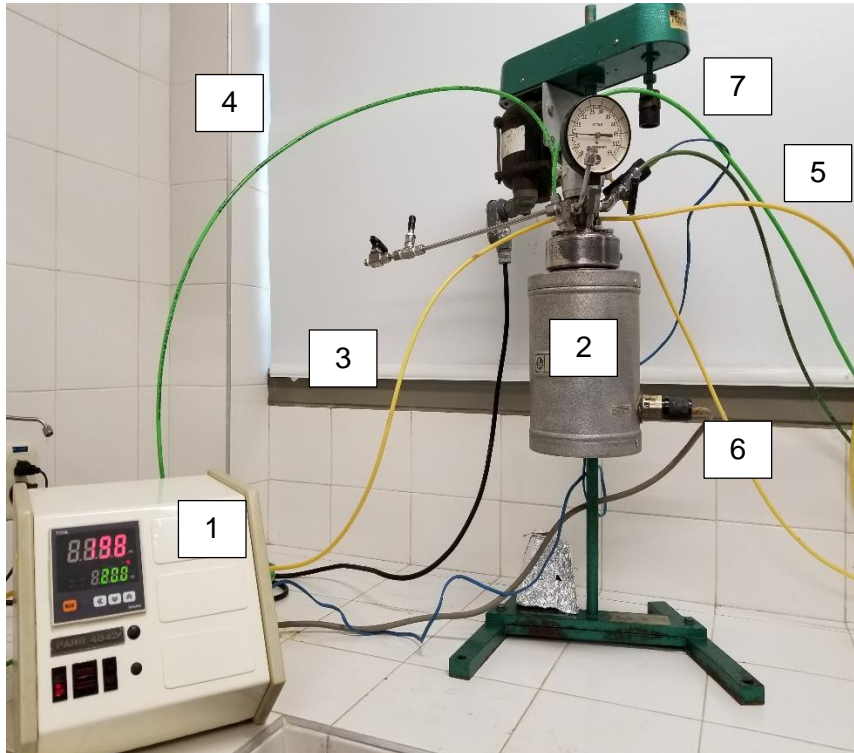
Figura B.1. Reacción inestable de peróxido de hidrogeno.



Al realizar la etapa de blanqueo se observó que se debe evitar hacer cambios bruscos de temperatura ya que el peróxido de hidrogeno es muy inestable y puede generar resultados indeseado como lo mostrados en la figura B, .donde se presentan burbujeo bruscos y gran cantidad de desprendimiento de vapores.

**ANEXO C. MONTAJE EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS C1) DESLIGNIFICACIÓN, C2) BLANQUEO, C3) INFILTRACIÓN DE RESINA EPÓXICA.**

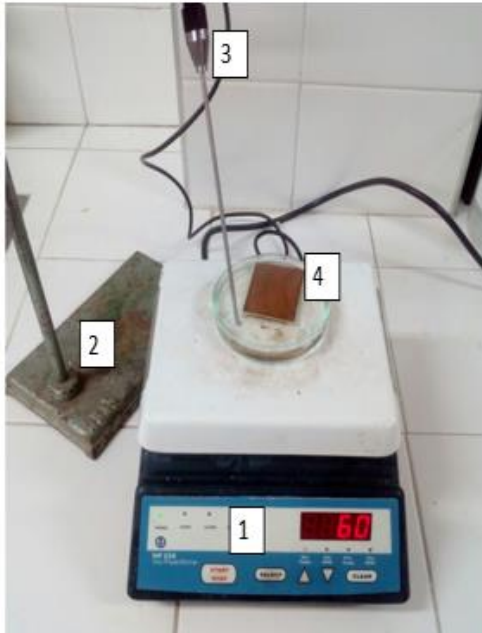
Figura C.1. Reactor Parr 4560 acoplado a controlador Parr 4848.



1. Controlador modular 4848 Parr.
2. Reactor mini 4560 600 ml.
3. Entrada agua de enfriamiento para la unidad magnetica.
4. Agua de enfriamiento para el reactor.
5. Salida agua de enfriamiento para la unidad magnetica.
6. Salida de agua de enfriamiento.

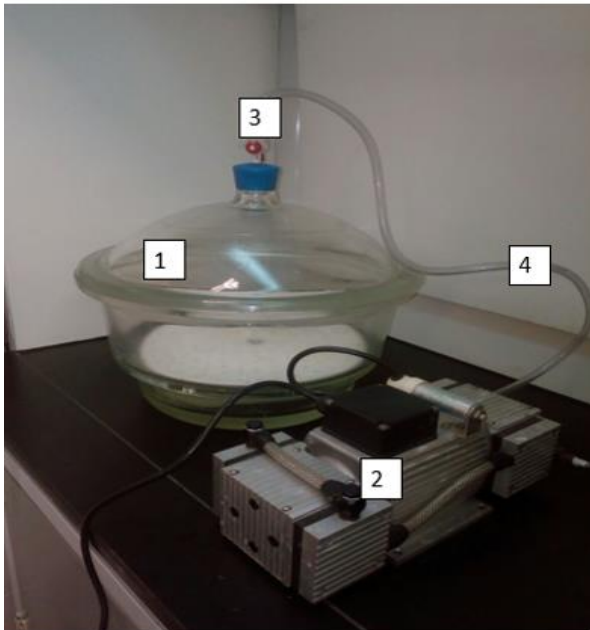
Reactor mini 4560 de cabeza móvil con un volumen máximo de 600 ml, temperatura estándar de clasificación MAWP, 3000 psi, con máxima temperatura de operación 500 ° c, medición de temperatura termopar fijo, serpentín una espina, motor de agitador 1/8 hp velocidad con variable, con suministro eléctrico de 115 voltios, este se observa en la figura C1.

Figura C.2. Esquema del montaje experimental para el proceso de blanqueo



1. Plancha de calentamiento
2. Soporte Universal.
3. Termómetro eléctrico de contacto.
4. Caja Petri.

Figura C.3. Esquema del montaje experimental del proceso de infiltración.



1. Desecador de 200 mm (vidrio borosilicato 3.3, SIMAX ).
2. Bomba de vacío (Welch 1405).
3. válvula de conexión a vacío.
4. Vacuometro de conexión vertical de 2,5 in

**ANEXO D. PROCESO EXPERIMENTAL EN LA DETERMINACIÓN DE LIGNINA  
EXTRAÍDA EN LA ETAPA DE DESLIGNIFICACIÓN, APLICACIÓN DE LA  
NORMA DE LA TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER  
INDUSTRY T 222 OM-02.**

Figura D.1. Etapas de la norma Technical Association of the Pulp and Paper Industry T 222-om-02.

El proceso se divide en 6 etapas ilustradas en la figura D1.



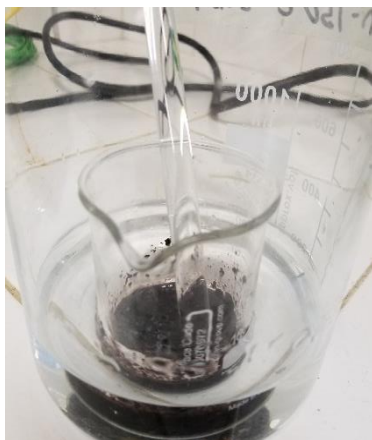
1. DESLIGNIFICACIÓN



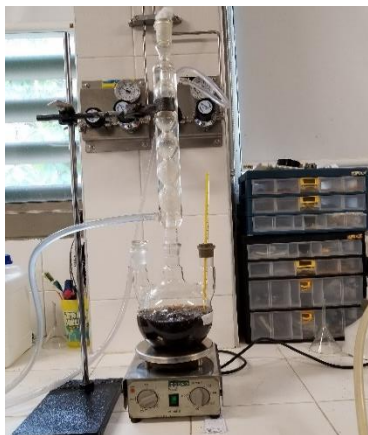
2. SECADO



3. TRITUTURADO



4. DIGESTIÓN



5. REFLUJO



6. FILTRACIÓN

## ANEXO E. PORCENTAJE DE LIGNINA RETIRADA A 423 K.

### TEMPERATURA 423 K

TIEMPO (Horas)	MUESTRA	% LIGNINA
0	Balso	23,284
1	Balso	4,365
2	Balso	1,597
4	Balso	0,895
6	Balso	0,555
0	Roble	31,007
1	Roble	16,633
2	Roble	3,085
4	Roble	0,844
6	Roble	0,798
0	Cedro	29,523
1	Cedro	6,368
2	Cedro	3,085
4	Cedro	1,192
6	Cedro	0,797