

**Los biopreservantes inhibidores de hongos como alternativa sostenible para la  
inmunización de maderas, perspectiva para Bogotá, Colombia**

Gabriel Federico Jaramillo Cárdenas

Director

Ph.D. Carlos Eduardo Barragán Vidal

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Especialización en Biotecnología Agroambiental

2025

Página de Aceptación

---

Ph.D. Carlos Eduardo Barragán Vidal

Director Trabajo de Grado

---

Jurado

Bogotá - 2025

## **Agradecimientos**

Gracias a DIOS por la vida,

A mamá por su apoyo incondicional,

A los tutores de la UNAD-ECAPMA Carlos Barragán, Nataly Zamora, Camilo Cárdenas, Juliana Rivera y los demás tutores de la Especialización en Biotecnología Agroambiental, que guiaron este proceso de aprendizaje.

A Javier Rodríguez, Tito Calvo, Edwin Marulanda, Erika Páez.

Al gremio forestal de Bogotá.

## Resumen

Los preservantes para maderas comúnmente utilizados, traen consigo efectos nocivos para la salud y el medio ambiente, su uso es cuestionado constantemente a nivel mundial, siendo indispensable incorporar métodos y tecnologías limpias en la industria de la madera. Los preservantes naturales o biopreservantes son promisorios en la protección de la madera, sus principales fuentes provienen de los aceites esenciales de las plantas y extractivos de árboles leñosos, algunos de esos bioproductos son de origen animal. Estos productos naturales pueden combinarse con otros compuestos menos nocivos al medio ambiente, para formar coberturas duraderas con el fin de proteger la madera de agentes de deterioro bióticos y abióticos. En el contexto que se presenta para la ciudad de Bogotá y Colombia, se hace necesario vislumbrar productos de tecnología sostenible como los biopreservantes, para mitigar el impacto ambiental causado por la inmunización de maderas. Esta investigación documental descriptiva introduce en aspectos del sector maderero, de la pudrición fúngica y preservado de la madera, y documenta el potencial de los biopreservantes para evitar la degradación de la madera ocasionado por los hongos xilófagos, manchadores y mohos que la atacan, mencionando las fuentes, compuestos químicos, métodos para obtener los productos, aplicaciones realizadas en maderas y analiza los principales aspectos a tener en cuenta con miras a su uso en el sector de la madera.

***Palabras clave:*** Preservante natural madera, Extractivos vegetales, Pudrición fúngica, Sector maderero, Bogotá y Colombia.

### **Abstract**

The commonly used wood preservatives, carrying hazardous effects for health and the environment, use is frequently questionable around the world, being essential to incorporate eco-friendly methods and technologies in the wood industry. The natural preservatives or bio-based preservatives are promising in the wood protection, principal sources come from essential oils of the plants and woody tree extractives, some of those bioproducts are of animal origin. These natural products can be combined with other environmentally friendly compounds, to will form durable covers with the aim to protect wood of biotic and abiotic deterioral agents. In the context that going to show to Bogota city and Colombia, is necessary to outlook products of sustainable technology as bio-based preservatives, to reduce environmental impact caused of wood immunization. This descriptive documental investigation introduces in issues of timber sector, of fungal decay and wood preservation, and review the potential of bio-based preservatives to avoid rotting of wood caused for xylophagous fungi, mold and blue stain fungi that attack, showing the sources, chemical compounds, methods to obtain the products, wood performed applications and analyze the principal issues to take into account with perspective for use in wood sector.

**Keywords:** Bio-based wood preservative, Plant extractives, Fungal decay, Timber sector, Bogotá and Colombia.

## Tabla de Contenido

Introducción.....	11
Problema.....	14
Planteamiento del Problema.....	14
Justificación.....	17
Objetivos.....	20
Objetivo General.....	20
Objetivos Específicos.....	20
Metodología.....	21
Marco Teórico.....	23
Mecanismos de Degradación Fúngica de la Madera.....	23
Protección de la Madera de Agentes de Deterioro.....	27
Preservantes de Madera de Uso Común.....	29
Marco Contextual.....	32
Caracterización General del Sector de la Madera a Nivel Internacional.....	32
Contexto General en Colombia, y para la Ciudad de Bogotá.....	34
<i>Nivel de Tecnología en la Industria de la Madera.....</i>	<i>40</i>
Resultados.....	42
Preservantes Naturales y Biopreservantes.....	42
<i>Aceites Esenciales.....</i>	<i>42</i>
<i>Extractivos de Plantas.....</i>	<i>48</i>
<i>Extractivos de la Madera y Taninos.....</i>	<i>51</i>
<i>Biocompuestos y Química Verde.....</i>	<i>55</i>

<i>Compuestos de Base Biológica y Combinación Tecnológica</i> .....	61
Análisis de Caso: los Biopreservantes como Alternativa Sostenible en el Inmune de	
Maderas .....	66
Conclusiones.....	74
Recomendaciones .....	76
Referencias Bibliográficas.....	77

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Hongos que Atacan la Madera</i> .....	26
<b>Tabla 2</b> <i>Recopilación de Experimentos con Aceites Esenciales Vegetales que Inhiben Hongos de la Madera</i> .....	46
<b>Tabla 3</b> <i>Recopilación de Experimentos con Extractivos de Plantas que Inhiben Hongos de la Madera</i> .....	50
<b>Tabla 4</b> <i>Recopilación de Experimentos con Extractivos de la Madera y Taninos que Inhiben Hongos de la Madera</i> .....	54
<b>Tabla 5</b> <i>Recopilación de Experimentos con Biocompuestos que Inhiben Hongos de la Madera</i> .	60
<b>Tabla 6</b> <i>Recopilación de Experimentos con Compuestos de Base Biológica que Inhiben Hongos de la Madera</i> .....	65

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Diagrama de Flujo de la Revisión Documental</i> .....	22
<b>Figura 2</b> <i>Consumo Total de Madera en Colombia, Durante los Años 2009 a 2019</i> .....	36
<b>Figura 3</b> <i>Consumo de Madera Legal en la Ciudad de Bogotá D.C</i> .....	39
<b>Figura 4</b> <i>Etapas en el desarrollo de biopreservantes para madera</i> .....	73

### Lista de Abreviaturas

<b>AWPA</b>	<i>American Wood Protection Association</i>
<b>CCA</b>	<i>Arseniato de Cobre Cromado</i>
<b>CEPAL</b>	<i>Comisión Económica para América Latina y el Caribe</i>
<b>CG-EM</b>	<i>Cromatografía de Gases Acoplada a Espectrometría de Masas</i>
<b>COV</b>	<i>Compuestos Orgánicos Volátiles</i>
<b>DAMA</b>	<i>Departamento Administrativo del Medio Ambiente de Bogotá</i>
<b>EPA</b>	<i>Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos</i>
<b>FAO</b>	<i>Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación</i>
<b>ICONTEC</b>	<i>Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación</i>
<b>MADR</b>	<i>Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia</i>
<b>MADS</b>	<i>Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia</i>
<b>M<math>\beta</math>CD</b>	<i>Metil <math>\beta</math>-ciclodextrina</i>
<b>ODS</b>	<i>Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>
<b>OIMT</b>	<i>Organización Internacional de Maderas Tropicales</i>
<b>PFNM</b>	<i>Productos Forestales no Maderables</i>
<b>SDA</b>	<i>Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá</i>

## Introducción

La madera es un material natural de origen renovable que secuestra carbono y que al tener alta relación peso-resistencia es atractiva para uso en múltiples áreas. Las propiedades inherentes de la madera la hacen estable dimensionalmente frente a variaciones de temperatura y a servir como aislante térmico y acústico por sus características de densidad y estructura porosa (MinAmbiente, 2023). Un escenario global con incremento en el consumo de madera, contribuye sustancialmente a la aspiración social de un futuro más sostenible al ser un recurso renovable; no obstante, existen riesgos asociados cuando se expone a factores bióticos y abióticos que conllevan a su deterioro, siendo necesario tratamientos de preservación para mantener las propiedades físico-mecánicas de la madera y aumentar su durabilidad (Changotra et al., 2024). El desarrollo de métodos de preservación de maderas con productos no tóxicos para el medioambiente como los basados en productos naturales, es hacia donde los mercados deben virar, limitando o prohibiendo ciertos productos que generan riesgos ambientales y adoptando la economía circular al aprovechar residuos del material para elaboración de biopreservantes (Jarvinen et al., 2022; Calovi et al., 2024).

La presión a nivel mundial por obtener productos alternos a los preservantes de maderas de primera o segunda generación con compuestos que presenten una menor toxicidad para el ser humano y el medioambiente, hace que surjan los biopreservantes catalogados como preservantes de tercera o cuarta generación, que en general se caracterizan por tener componentes orgánicos y ser menos tóxicos para los sistemas terrestres o acuáticos (Hassan et al, 2016). Actualmente cuando se implementan técnicas para la preservación de maderas, es considerado de alto impacto económico el no tener en cuenta aspectos para la protección del medioambiente y la salud y seguridad humana. El desarrollo de biopreservantes va en incremento a nivel mundial y pueden

llegar a ser biocidas tan efectivos como los preservantes químicos, y dado que el público es cada vez más renuente al uso de productos nocivos (Teaca et al., 2019; Fang et al., 2021).

A grandes rasgos, los hongos se dividen entre los que atacan y desintegran la pared celular para alimentarse (hongos xilófagos) y los manchadores de las maderas o cromógenos que luego de colonizar la afectan de forma superficial, así como los mohos de la madera (Navas, 2013). En la inhibición de hongos de pudrición marrón (p. ej. *Gloeophyllum sp.*), y blanca (p. ej. *Trametes sp.*), y hongos del manchado de la madera (p. ej. *Ophiostoma sp.*), los biopreservantes como método de cubrimiento protector o impregnado, pueden ser empleados para algunas especies de maderas y como eficaces preservantes para las maderas de baja durabilidad natural (González et al., 2015; Wozniak, 2022). El eucalipto y pino provenientes de reforestaciones son especies que han aumentado su demanda en el mercado de maderas, esto debido a la escasez en el comercio de especímenes maderables resistentes a la pudrición (Dias y Barreiros, 2018). Los árboles de medio o rápido crecimiento pueden tener menor calidad de la madera y ser más susceptibles a los agentes de deterioro como hongos o insectos (Gupta et al., 2021).

Dentro de los preservantes naturales para maderas se pueden mencionar los aceites esenciales, extractos de plantas, extractivos de la madera y taninos, existen además combinaciones de preservantes naturales con otros compuestos o polímeros (Changotra et al., 2024). Con la ayuda de tecnologías recientes como la química verde o la combinación con nanotecnología también se constituyen biopreservantes, otras tecnologías generan bio-aceites con propiedades antifúngicas, derivados de la pirólisis de madera o del procesamiento de pasta de celulosa (Kaur et al., 2016; Barbero et al., 2018). La presente investigación documental destaca a los biopreservantes como una oportunidad para mitigar el impacto ambiental generado en el proceso de preservación de maderas y según el contexto se analiza una matriz de variables

técnicas y ambientales a tener en cuenta, con miras al uso en maderas en la ciudad de Bogotá y por extensión en Colombia.

## **Problema**

### **Planteamiento del Problema**

Los distintos tratamientos para la preservación de maderas, incorporan en su mayoría sustancias químicas como el pentaclorofenol, carbendazim, cipermetrina, subproductos de la refinación del petróleo, la creosota, naftenatos, sales de cobre y zinc, así como productos a base de cromo, cobre, boro, arsénico, entre otros (Gómez et al., 2006). Muchas de estas sustancias son contaminantes para el medioambiente y tóxicos en el ser humano, debido a que existe factores de riesgo al momento de su aplicación, ocasionando problemas en la salud por la exposición a los humos industriales y polvos minerales (DAMA, 2003; Ortega et al., 2019). También hay afectación medioambiental causada por lixiviación, al impregnar la madera con compuestos comerciales de bajo costo como el cobre-cromo-arsénico (CCA), los cuales se lavan y escurren al alcantarillado y/o canales recolectores, contribuyendo a la contaminación del agua, y también contaminando el suelo por infiltración (Goncalves y Rocco, 2020); a pesar de que dentro de la tecnología de maderas, existen técnicas que mejoran la penetración y fijación de los preservantes en las maderas como el método vacío presión (Tuset y Duran, 1979; ICONTEC, 2002).

El Departamento Administrativo del Medio Ambiente de Bogotá (2003) resalta como un problema de salud y un importante impacto ambiental, la emisión de sustancias peligrosas derivadas de las sales de impregnado de la madera que contienen creosota, pentaclorofenol, cipermetrina y sales de cobre-cromo-arsénico (CCA). Generalmente el personal que trabaja en las bodegas de almacenaje y sitios de acopio de maderas en las zonas de aglomeración de la cadena productiva de Bogotá, se encuentra expuesto a sustancias químicas, donde algunos operarios no utilizan los elementos de protección personal a pesar de conocerlos (DAMA 2003). López et al (1996) resalta que los preservantes causan emisiones atmosféricas durante su

aplicación, al producirse compuestos orgánicos volátiles (COV), estas sustancias permanecen vaporizadas en el aire, afectando la salud de los operarios y terceras personas, agravado por el uso de disolventes como el thinner y otros productos, usados en las demás etapas del procesamiento de la madera como los barnices, tintas y pinturas (López et al., 1996). Un residuo peligroso resultado del proceso de inmunización, son los lodos generados en los tanques de mezcla de inmunizado que son compuestos altamente tóxicos (DAMA 2003).

La madera en bloque o trozas sin tratamientos preliminares llega desde distintos lugares de la geografía nacional, a bodegas o sitios confinados en unidades productivas de centros urbanos, donde los establecimientos generalmente carecen de ventilación suficiente para el secado natural, apilando las trozas o bloques durante largos períodos de tiempo, y donde varias microempresas no tienen acceso a la tecnología del secado de maderas; estos factores ralentizan la reducción de humedad de la madera, que de ser deficiente induce a la aparición de organismos que deterioran la madera como los hongos (DAMA 2003). El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), menciona que el recurso maderable se desperdicia en Colombia tanto en los centros de suministro como en los principales centros de acopio de madera, debido a falencias en la infraestructura adecuada para la protección fitosanitaria de la madera y poco aprovisionamiento para la defensa contra los cambios climáticos, ocasionando pérdidas en el sitio y deterioro del recurso (MinAmbiente, 2015). Debido a estas condiciones, es necesario preservar la madera para evitar su degradación por agentes biológicos como los hongos, con compuestos que presenten la menor toxicidad para las personas y el medioambiente. El uso de biopresevantes mitiga las afectaciones ambientales y de salud que se generan en los procesos de preservado convencional de maderas (Briceño et al., 2010; González et al., 2015; Velásquez et al., 2019; Goncalves y Rocco, 2020).

De acuerdo a lo anteriormente planteado, los preservantes químicos convencionales para maderas, no satisfacen como productos de bajo impacto en la salud humana y el medioambiente, surgiendo la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuales son los principales tipos de biopreservantes con potencial de inhibición fúngico, con miras a la adopción de tecnologías sostenibles en el inmunizado de las maderas que son comercializadas en Bogotá, y por extensión para Colombia?

## Justificación

El desarrollo en la tecnología de maderas tiene en cuenta que cada especie de madera tiene unas propiedades particulares en la composición y estructura interna, lo que le concede a una u otra especie diferentes estados de durabilidad natural. Mediante la preservación de maderas se busca que la durabilidad se extienda por lo menos cinco veces más que si lo hiciera sin la aplicación de un producto. El preservante debe ostentar características tales como toxicidad a los agentes de deterioro, pero no fitotoxicidad, penetración en la madera de manera uniforme, tener permanencia, es decir que no sea fácilmente lixiviable, que no sea un producto corrosivo, que no combustione una vez aplicado en la madera, que sea de fácil aplicación, que permita acabados y además en la medida de lo posible que sea un producto económico (Tuset y Duran, 1979; Martínez, 2017).

Los preservantes como el arseniato de cobre cromado (CCA) hace que la madera impregnada con este compuesto químico, sea un residuo peligroso a final del ciclo de uso por la liberación de partículas al ambiente (Barbero et al., 2019). Los residuos de maderas que han sido inmunizadas, así como maderas aglomeradas y contrachapadas que contienen sustancias tóxicas de origen (inmunizantes, adhesivos, resinas, etc.), requieren tratamientos especiales para su manejo. Estos residuos de madera, no deberían ser utilizados como combustible en calderas, porque su combustión genera contaminantes atmosféricos (DAMA, 2003). La madera al final de su vida útil debe ser posible de utilizar para producción de energía como combustible, como compostaje o como una fuente de fibras secundarias sin presentar problemas relacionados con los productos químicos residuales de su tratamiento (Dias y Barreiros, 2018).

El incremento de las inversiones en tecnologías modernas, permiten reducir el impacto ambiental de las plantas manufactureras en la industria de la madera, obteniendo beneficios

económicos y ambientales, y de manera paralela los avances realizados en la producción de energía, como la utilización de fuentes orgánicas (p. ej. el licor negro y los residuos de la madera) para combustible o para otros usos, contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (DAMA, 2003). Los biopreservantes se presentan como una alternativa de solución que inhiben hongos de pudrición blanca, parda o blanda (p. ej. *Alternaria sp.*), así como hongos del manchado de la madera para algunas especies de maderas, y se muestra como alternativa el uso de los biopreservantes de madera, sobre los preservantes comúnmente utilizados, siendo una tendencia reciente que se está dando para su reemplazo gradual, debido a la baja o ninguna emisión de compuestos tóxicos y biodegradabilidad de residuos (Navas, 2013; González et al., 2015; Velásquez et al., 2019; Haug et al., 2019; Goncalves y Rocco, 2020).

El sector de muebles y madera es un importante renglón de la economía en la ciudad de Bogotá que agrupa una gran cantidad de establecimientos en un mercado altamente atomizado y competitivo, que reúne desde pequeños talleres de ebanistería y carpintería, hasta empresarios medianos parcialmente agremiados (DAMA, 2004). En Colombia la industria del mueble se constituye principalmente por microempresas atomizadas que fácilmente entran y salen del mercado, sin embargo, la pequeña empresa tiene un alto potencial para la generación de empleo (MinAmbiente, 2016b). Los empresarios deben implementar procesos para darle un valor agregado a la madera como el uso de biopreservantes. Esta forma de bajo impacto ambiental para la preservación de maderas, se presenta como una oportunidad para los comercios de economía popular que carecen de programas de gestión ambiental, así como para los empresarios involucrados en el sector, siendo Bogotá uno de los nodos de mayor importancia en el comercio y consumo de maderas (Riaño et al., 2014). También se vislumbra como una tecnología sostenible para Colombia.

Sugerir el uso de los biopreservantes de la madera como una solución práctica y posible dirigido a un público objetivo, propendiendo con los mercados verdes, es una contribución del estudio, y puede servir de guía para el trabajo de los grupos de investigación que traten con el tema en cuestión a nivel experimental o de innovación. El uso de biopreservantes está en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el ODS 12 que busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles para América Latina y el Caribe. Este ODS tratado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), también busca en una de sus metas, criterios de economía circular en el escenario de la creación de empleos en sectores de reprocesamiento de metales y madera, que compensaría la posible pérdida de los mismos en sectores de extracción de minerales u otras materias primas (CEPAL, 2019).

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Elaborar una revisión documental de los principales tipos de biopreservantes que han sido ensayados como inhibidores fúngicos, vislumbrando una alternativa tecnológica de bajo impacto ambiental en el inmunizado de maderas, con perspectiva para Bogotá, y por extensión para Colombia.

### **Objetivos Específicos**

Compilar información técnico-científica sobre biopreservantes inhibidores del crecimiento de los hongos asociados al deterioro de la madera.

Clasificar los biopreservantes que inhiben el crecimiento de hongos de la madera según las variables exploradas en el estudio.

Evaluar la evidencia publicada sobre la eficacia y sostenibilidad de los biopreservantes como productos sostenibles y promisorios para la inmunización de maderas.

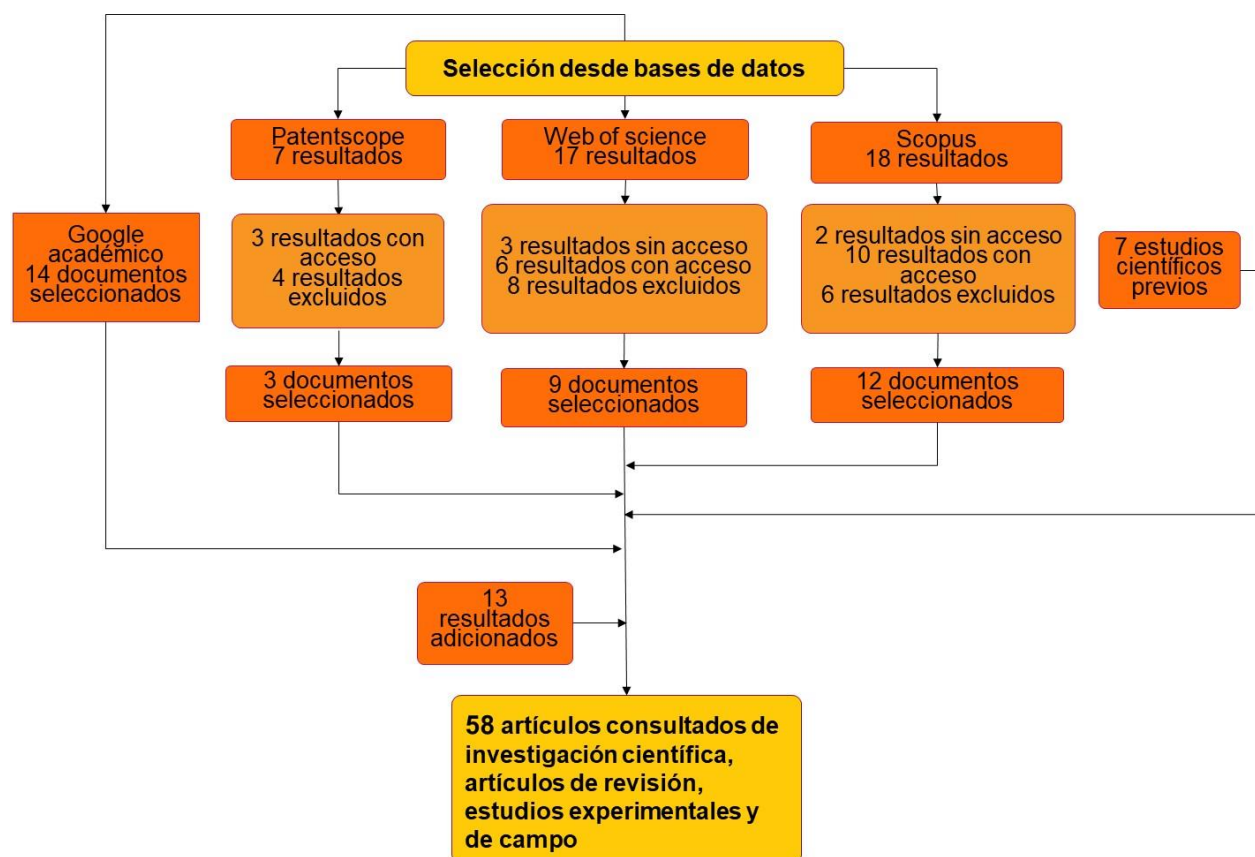
## Metodología

La metodología implementada obedece a la investigación documental de tipo descriptivo. Los criterios de inclusión comprendieron: información proveniente de artículos de investigación científica, artículos de revisión, estudios experimentales y de campo, indexados en las bases de datos Web of Science, Scopus, Patentscope y Google académico (Figura 1), sin considerar su lugar de procedencia, en un espacio de 10 años de antigüedad, limitado a los idiomas inglés, portugués y español. Los descriptores de búsqueda se hicieron en el idioma inglés: madera, biopreservantes, pudrición fúngica. Las variables exploradas fueron origen del biopreservante, método de obtención o extracción, ensayos de susceptibilidad in vitro utilizado sobre los patógenos, ensayos antifúngicos in situ, evaluación de ecotoxicidad de los compuestos e impregnación de los biopreservantes en distintas especies y tipos de maderas. Los criterios de exclusión fueron la duplicación de datos y títulos o contenidos que no cumplieran con los criterios de inclusión, contenidos que mencionan preservantes de maderas con químicos tradicionales, mejorados o sólo sintéticos y biopreservación de otros materiales distintos a la madera. En cuanto a la información institucional y de orden técnico, provino de documentos tanto electrónicos como impresos, en aspectos tales como el sector de la madera y tecnología de la madera, obtenida principalmente del centro de documentación de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, sin limitaciones temporales o espaciales, debido a que no hay actualización permanente de las publicaciones y documentos oficiales que reposan en la entidad reguladora del sector maderero. Se consultó además el centro de documentación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y otros documentos de orden técnico en bibliotecas públicas a nivel local. Al final se hace un análisis documental, integrando sistemáticamente presupuestos del marco

conceptual y teórico, con aspectos principalmente del nivel técnico y del medioambiente, con el fin de proyectar el uso de biopreservantes de madera en el contexto de estudio.

**Figura 1**

*Diagrama de Flujo de la Revisión Documental*



*Nota.* La figura 1 representa la búsqueda y selección de información en bases de datos. Cabe anotar que la base de datos Google académico también se utilizó para buscar bibliografía a partir de referencias de artículos seleccionados y se logró acceder a documentos no accedidos de las otras bases de datos. Adicionalmente se consultaron 29 documentos de información institucional, gubernamental y de orden técnico, desde distintas fuentes de información ya descritas, que consolidaron la revisión documental.

## Marco Teórico

### Mecanismos de Degradación Fúngica de la Madera

Los hongos de pudrición blanca, parda y blanda de la madera, presentan naturalmente roles muy importantes en los ecosistemas ya que contribuyen significativamente al ciclaje del carbono, al atacar y degradar las plantas leñosas. Los hongos xilófagos que causan pudrición blanca (Tabla 1), se caracterizan por degradar los carbohidratos y la lignina de las paredes celulares, resquebrajando la estructura de la madera. Las maderas “duras” son más susceptibles al ataque de hongos de pudrición blanca, por el ataque tanto la lignina como la celulosa de ese tipo de maderas, las especies del filum Basidiomycota causan este tipo de pudrición (Singh y Singh, 2014; Hassan et al., 2016; Mena et al., 2023). La pudrición blanca actúa en la madera con enzimas ligninolíticas entre las que se encuentra manganoso peroxidasa, peroxidasa versátil, lacasa y la lignina peroxidasa o también conocida como ligninasa (contiene hierro susceptible de oxidación o reducción); por ejemplo, el hongo de la pudrición blanca *Phanerochaete chrysosporium* Burds., despliega reacciones degradantes dependientes del peróxido de hidrógeno para incorporar oxígeno molecular en la reacción.

En la naturaleza los hongos de pudrición parda son más comunes en los bosques de coníferas y es el tipo de pudrición más común en los productos de madera (Singh y Singh, 2014; Pacini et al., 2019; Goodell et al., 2020). Los hongos del filum Basidiomycota son los principales causantes de esta pudrición, donde los carbohidratos son atacados preferentemente, despolimerizando los componentes celulolíticos de la madera (celulosa y hemicelulosa) y dejando una coloración marrón, lo que causa el desmenuzamiento de la madera en el sitio del ataque, pero la lignina se ve menos afectada o resulta modificada, hasta que la madera se fractura y queda la lignina como un residuo de las paredes celulares. Particularmente en las maderas

blandas vía la reacción de Fenton mediado por quelantes (CMF), el hongo de pudrición parda, usa un radical hidroxilo (OH) para hacer un ataque no enzimático y usa en la reacción los iones metálicos propios de la madera como hierro o cobre (Cruz de León, 2010; Hassan et al., 2016; Goodell et al., 2020). Los hongos xilófagos constituyen un tercer grupo, el de pudrición blanda de la madera, los agentes causales son principalmente los Ascomicetos. Tiene un efecto similar a la pudrición parda al atacar celulosa y hemicelulosa, pero la madera se torna blanda o esponjosa y las paredes celulares muestran tunelación hifal a lo largo de las microfibrillas de celulosa, con apariencia de pequeñas cavidades transversales y cuando se seca, se resquebraja formando cubos pequeños (Cepero de García et al., 2012; Tran-Ly et al., 2022).

Los hongos del manchado o azulado de la madera son generalmente del filum Ascomycota; entre estos el género *Ophiostoma sp.*, es transmitido por escarabajos que se alimentan de la corteza, su particularidad es atacar madera de albura, causando decoloración verdosa o grisácea en su superficie. *Aureobasidium pollulans*, se conoce como levadura negra de la madera, que se alimenta de la lignina superficial previamente deteriorada por foto-degradación, manchando la superficie de la madera (Teaca et al., 2019). La hifa de *Alternaria alternata* continen melanina, la cual causa distintas manchas y decoloraciones de color gris oscuro a las maderas que ataca y también a este hongo se le asocia con la pudrición blanda (Salem et al., 2016). Los hongos del azulado de la madera no causan una reducción considerable de las propiedades de resistencia mecánicas de la madera, sin embargo, según el grado de afectación, se puede dar un incremento de la permeabilidad desde la superficie de la madera hacia el interior.

En cuanto a los mohos de la madera, son incapaces de alimentarse de la lignina, por lo que no producen pérdidas significativas en la resistencia de la madera, sin embargo, crean

condiciones para que se establezcan hongos xilófagos y eventualmente el ataque de la celulosa o hemicelulosa (Cruz de León, 2010). Ciertas cepas de los hongos *Fusarium oxysporum*, *Trichoderma viride* y *Aspergillus niger*, producen las enzimas xilanasas o celulasas, siendo biodegradadores de especies de duramen como haya (*Fagus sylvatica* L.) con mayor contenido de hemicelulosas (glucano, xilano), en comparación con especies de albura como *Pinus sylvestris* L. y *Pinus rigida* Mill., aunado a que estas maderas contienen alcoholes dihidricos y resinas que ayudan a retardar la biodegradación. La albura en las maderas blandas podría ser menos susceptible al ataque de mohos de la madera debido a la más rápida lignificación de las paredes celulares, con respecto a la albura en las maderas duras (Salem et al., 2016). Sin embargo, *Trichoderma harzianum* es un hongo común que coloniza maderas de albura de especies para aserrío como el pino (Mansour y Salem, 2015). Los hongos de pudrición de la madera se desarrollan cuando el contenido de humedad de la madera supera el 20%, pudiendo evitar la aparición de éstos con protocolos de secado dentro de la tecnología de maderas, hasta alcanzar un contenido de humedad de equilibrio entre el 11 al 15% (Tuset y Duran, 1979; Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera [AITIM], 2014).

**Tabla 1***Hongos que Atacan la Madera*

Tipo de Afectación en la Madera	Filum	Especie o Género
Pudrición blanca	<i>Basidiomycota</i>	<i>Earliella scabrosa</i> (Pers.) Gilb. & Ryvarden, <i>Hexagonia hydroides</i> (Sw.) M.Fidalgo, <i>Trametes hirsuta</i> (Wulfen) Pilát, <i>Trametes versicolor</i> (L.) Lloyd, <i>Pycnoporus sanguineus</i> L. Murrill, <i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq.) P.Kumm, <i>Schizophyllum commune</i> Fr., <i>Irpex lacteus</i> (Fr.) Fr, <i>Ganoderma sp.</i> , <i>Pholiota sp.</i> , <i>Aleurodiscus sp.</i> , entre otros
Pudrición parda	<i>Basidiomycota</i>	<i>Laetiporus sulphureus</i> (Bull.) Murrill, <i>Rhodonía placenta</i> (Fr.) Niemelä, K.H.Larss. & Schigel, <i>Antrodia sp.</i> , <i>Fibroporia vaillantii</i> (DC.) Parmasto, <i>Poria monticola</i> Murrill., <i>Gloeophyllum trabeum</i> (Pers.) Murrill, <i>Coniophora puteana</i> (Schumach.) P.Karst., <i>Fomitopsis pinicola</i> ( Sw. ) P.Karst., <i>Serpula lacrymans</i> (Wulfen) J. Schröt., géneros <i>Piptoporus</i> , <i>Gloeophyllum</i> , <i>Coniophora</i> , entre otros
Pudrición blanda	<i>Ascomycota</i>	<i>Chaetomium globosum</i> Kunze, géneros <i>Chaetomium</i> , <i>Xylaria</i> , <i>Dalnia</i> , <i>Hypoxylon</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Coniothyrium</i> , <i>Ceratocystis</i> , entre otros
Manchado o azulado	<i>Ascomycota</i>	<i>Ophiostoma sp.</i> , <i>Aureobasidium pollulans</i> , <i>Alternaria alternata</i> , <i>Ceratostomella sp.</i> , <i>Ceratocystis sp.</i> , entre otros
Mohos de la madera	<i>Ascomycota</i>	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> , <i>Paecilomyces variotii</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Phoma violacea</i> , <i>Fusarium subglutinans</i> , entre otros

*Nota.* Cruz de León, (2010); Cepero de García et al. (2012); Navas, (2013); Zhang et al.; Salem et al.; Fidah et al. (2016); Hu et al. (2017); Kwaśniewska et al. (2018); Teaca et al. (2019); Vek et al. (2020); Gupta et al.; Simunková et al. (2021); Alorbu y Cai (2022); Mena et al.; Zikely et al. (2023).

## **Protección de la Madera de Agentes de Deterioro**

La madera al estar constituida por los biopolímeros celulosa, hemicelulosa y lignina, está expuesta al proceso de degradación oxidativa como foto-oxidación, oxidación química, descomposición térmica y reacciones fotolíticas (Gupta et al., 2021), la absorción directa de la radiación solar en la superficie de la madera, ocasiona reacciones fotoquímicas primarias como la división y entrecruzamiento de las cadenas de los polímeros que la conforman y en presencia de oxígeno ocurren procesos foto oxidativos de degradación (Teaca et al., 2019). En la infraestructura hecha con madera se requiere que los productos en uso tengan un intervalo de tiempo prolongado para el mantenimiento, en grandes construcciones el mantenimiento de la madera se hace a menudo un proceso difícil, el proteger los lados aserrados de la humedad es importante en el diseño constructivo (Jarvinen et al., 2022).

Los métodos de protección desarrollados contra agentes de deterioro bióticos y abióticos de la madera se pueden agrupar en cuatro grupos principales: el tratamiento térmico, la modificación química, la impregnación con repelentes de agua, y el cubrimiento de la madera con protectores (Peng et al., 2021; Wozniak, 2022). Según Teng et al. (2018), la protección de la madera se agrupa en sólo dos formas: la modificación química o térmica de la madera, y los tratamientos con preservantes de madera. En el primer grupo de técnicas, los componentes lignocelulósicos de la pared celular se modifican para mejorar las propiedades dimensionales y/o de resistencia biológica; estas son técnicas alternativas a los biocidas químicos convencionales para la preservación de la madera. La acetilación es un proceso para modificar químicamente la madera, al reemplazar los grupos hidrógenos e hidroxilos de los polímeros de la madera, con un grupo acetilo, para ello se hace reaccionar el anhídrido acético en una cámara de vacío para que impregne la madera (Blanco y Alfaro, 2013; Beck et al., 2018), lo que disminuye la capacidad de

ésta para absorber humedad y por ende reduce el riesgo de ataques de hongos e insectos. La modificación química a pesar de ser un método de bajo impacto para el medio ambiente, tiene la desventaja de ser un método costoso frente a otros para la protección de la madera, siendo más aplicado en los países industrializados. En el tratamiento térmico (calentamiento o torrefacción) la madera se somete a temperaturas de entre 160° y 260° C, en un sistema ausente de oxígeno para evitar la combustión del material, como consecuencia se reduce el daño producido por los agentes de deterioro atmosférico, y reduce la higroscopicidad de la madera haciéndola menos propensa a la humedad; sin embargo, las propiedades mecánicas y de resistencia de la misma se ven afectadas en mayor o menor grado dependiendo de la especie (Arpanaei et al., 2024). El segundo grupo de técnicas corresponde a los tratamientos con preservantes de madera, como los métodos de vacío-presión en un cilindro cerrado que profundizan la absorbancia de los productos en la estructura celular de la madera, y métodos sin presión como el asperjado con brocha o pistola, la inmersión en tanques y baño caliente-frío en soluciones acuosas con productos de preservación de la madera. Para Jarvinen et al. (2022), la madera impregnada con el método de presión se prefiere por el rendimiento en estructuras resistentes a la intemperie, no obstante, si la madera tiene un proceso de pre-pintura bajo condiciones controladas, esto aumenta el tiempo de vida útil en los productos aplicados superficialmente. La efectividad en la protección de la madera se mide por medio de pruebas de desgaste, lixiviación y deterioro, según estándares norteamericanos de American Wood Protection Association (AWPA) (Fang et al., 2021; Peng et al., 2021) o las normas europeas EN 113 para ensayos en laboratorio y EN 252 para ensayos en campo (Barbero et al., 2021; Hu et al., 2017). En Colombia se aplica la norma NTC 4603 emitida por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC, 2008).

## Preservantes de Madera de Uso Común

El uso de productos para la preservación de maderas no es un tema reciente y data desde civilizaciones tan antiguas como la egipcia o la griega, cuando el hombre dominó la técnica de construcción en maderas y masificó su uso para muchas actividades. Los primeros productos en ser usados como preservantes fueron los aceites naturales, resinas y sustancias bituminosas que se aplicaban a las maderas para prorrogar su vida útil (Cruz de León, 2010). Con la llegada de la revolución industrial se usaron productos más eficaces para la preservación de la madera como el cloruro de mercurio, el hexaclorociclohexano, el cianuro de hidrógeno, el bromometano y el óxido de etileno, todos estos compuestos muy tóxicos tanto para el ser humano como para el medio ambiente, y actualmente estos tienen usos estrictamente regulados o están prohibidos en los países de la Unión Europea (Martínez, 2017).

Dentro de los preservantes comúnmente utilizados en tecnología de maderas se tienen los compuestos orgánicos como las creosotas que son destilados de alquitrán de hulla producida a altas temperaturas por carbonización de la hulla bituminosa. El 90% de este compuesto es derivado de la serie aromática del benceno, naftaleno, el 5% ácidos de alquitrán como el antraceno y el restante 5% bases de alquitrán, presentando la creosota un fuerte olor y recomendada para aplicación en ambientes externos debido a la emisión de vapores orgánicos. Las creosotas presentan una composición química compleja, caracterizándose por su viscosidad, densidad y alquitranes presentes (Tuset y Duran, 1979; Cruz de León, 2010).

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (2002), hace referencia a la utilización como preservante de maderas al compuesto orgánico pentaclorofenol ( $C_6H_5Cl_5$ ), el cual se aplica generalmente en una solución al 0,1% en esencias minerales, combustóleo N° 2 o queroseno. Este es un preservante muy efectivo de amplio espectro que al aplicarlo se volatiliza

en la madera con un fuerte olor fenólico que en ambientes cerrados puede causar irritación de ojos, nariz y garganta, y su exposición prolongada causa problemas a los fetos. En los Estados Unidos, el uso de pentaclorofenol es permitido únicamente como pesticida para la preservación de maderas (EPA, 2002). En otros países desarrollados éste compuesto, así como la creosota ha sido prohibido o muy limitado a usos como traviesas para rieles de ferrocarril. A pesar de las regulaciones en cuanto a su uso, la creosota, el pentaclorofenol y las sales solubles en agua como el CCA, son de uso común para la inmunización de maderas, mientras el naftenato de cobre y los preservantes de azol como el ciproconazol, son disolventes orgánicos ligeros que traen riesgos para la salud debido a los componentes orgánicos volátiles (COV) (Arpanaei et al., 2024). En Colombia es prohibido el uso de pentaclorofenol, mediante la resolución No. 10255 del 9 de diciembre de 1993 del Ministerio de Salud, citado por ICONTEC (2002), no obstante, este compuesto aparece dentro de los productos utilizados para la preservación de maderas a nivel nacional o local (López et al., 1996; Gómez et al., 2006).

Dentro de los compuestos inorgánicos utilizados como preservantes se tiene la ventaja que no son combustibles siendo hidrosolubles, pero entre sus desventajas se cuenta la lixiviación del producto, por lo que no se recomienda para ambientes exteriores dependiendo también del método de aplicación (Gómez et al., 2006). Entre las múltiples sales, se encuentran las de cobre-cromo-arsenicales (CCA), donde el cobre actúa sobre los hongos, el cromo hace que el compuesto permanezca en la madera y el arsénico detiene el ataque de insectos; otras sales son las de cobre-cromo-bóricas (CCB) y de arsénico-cobre-amoniacaes (ACA). También como productos inorgánicos, se encuentran los compuestos de Boro como el ácido bórico y el bórax, y otras combinaciones de sales como cromo-zinc-cloro (CZC), cobre-cromo-flúor, flúor-cromo-arsénico-fenol (FCAP) y cobre-cromo-fósforo (Cruz de León, 2010). Varios de estos compuestos

al ser solubles en agua pueden ser absorbidos por la piel, causando irritaciones que pueden llegar a ser graves dependiendo el grado de exposición incluso después de la aplicación por el contacto directo, restringiéndose su uso a artículos de madera tales como juegos infantiles, pasamanos o mesas (Gómez et al., 2006). Los preservantes de segunda generación en forma de sales metálicas como sulfato de cobre o borato de zinc, catalogados como de baja toxicidad en mamíferos, poseen de todas formas impactos negativos en la salud de músicos que tocan instrumentos hechos de madera tratados con estas sales, debido al contacto directo (Tran-Ly et al., 2022).

## Marco Contextual

### Caracterización General del Sector de la Madera a Nivel Internacional

La madera es un recurso natural renovable de importancia en la economía a nivel global, el mercado de todos los productos forestales ya ocupa el tercer lugar después del petróleo y gas (Becerra y Silva, 2012), con un valor de las exportaciones mundiales de 295 mil millones de dólares en productos forestales para el año 2022 (FAO, 2024a). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), citado por Riaño et al. (2014), la industria de transformación de la madera ha sido liderada por Rusia, Canadá, Estados Unidos, Australia y Brasil, presentando estos países cerca del 52% de la superficie forestal a nivel global. China ha entrado a competir fuertemente en la industria de muebles de madera y transformación primaria, otros países de oriente como Malasia Indonesia, Nueva Zelanda y Filipinas emergen en ese mercado. Debido a la estrategia de integración vertical de procesos al interior de la cadena de la transformación primaria de la madera, China ha desarrollado mejores procesos productivos fabriles relacionados con la industria de muebles, mientras que países de América del sur como Brasil y Chile, han mejorado los procesos de obtención de pasta de celulosa (Riaño et al., 2014). El mismo autor cita que la FAO identificó a China y Estados Unidos como proveedores principales de tableros de madera tropical, chapados y contrachapados. El mercado de la madera se concentra en los países desarrollados tanto en producción como en consumo, la estructura de la oferta permitió la entrada de nuevos actores a nivel global y regional como México y Chile (Becerra y Silva, 2012). La Organización Internacional de Maderas Tropicales -OIMT, citado por Riaño et al. (2014), estableció que durante el año 2012, las maderas extraídas de especies coníferas como el pino, fueron producidas principalmente por Brasil. La obtención de rollos de madera no conífera se concentró en América del sur (42,7%) y Asia (42,3%) (Riaño et al, 2014).

En el año 2022, la extracción mundial de madera en rollo industrial se acercó a los 2040 millones de m<sup>3</sup> para producir madera aserrada, tableros a base de madera y pasta de madera (FAO, 2024a). Del total de *roundwood* o trozas para uso industrial, dos terceras partes son destinados para la elaboración de piezas para construcción, muebles y artículos decorativos, y una tercera parte se destina a la industria de papel y cartón, siendo los mayores productores de pasta o pulpa de celulosa Estados Unidos y Canadá seguidos de Brasil, Suecia y Finlandia. En el ranking mundial, Colombia se ubicó en la posición 32, de principales proveedores de este subproducto (Riaño et al., 2014). Para el año 2023, China ya se había posicionado a nivel mundial como el mayor productor y consumidor de papel y cartón, Estados Unidos pasó a una segunda posición, y se ha reconfigurando el mercado con nuevos actores como Japón, Alemania e India (FAO, 2024b).

La gran demanda mundial por la madera ha hecho que con el paso del tiempo, las maderas de elevada durabilidad natural como el cedro, la teca y otras, hayan disminuido ostensiblemente en los mercados habituales debido a su agotamiento desde los bosques naturales. La necesidad de la industria por esta materia prima hace que la oferta sea reemplazada por maderas provenientes de árboles de medio o rápido crecimiento, con propiedades mecánicas y/o estéticas deseadas según el uso (Gupta et al., 2021). Es tendencia mundial el aumento de las plantaciones forestales, principalmente con algunas especies de rápido crecimiento como eucalipto y pino, y a depender de dichas reforestaciones en mayor medida como fuente de madera industrial (DAMA, 2003; Dias y Barreiros, 2018), girando el comercio internacional de maderas más en torno a la actividad de reforestación (Becerra y Silva, 2012). Esta situación se ve reflejada en el auge de las plantaciones comerciales, calculadas en 264 millones de hectáreas según la FAO para el año 2012 y en 294 millones de hectáreas para el año 2020, donde China lidera en área plantada (Riaño et al., 2014; FAO, 2023).

Hoy en día se presta más atención a las preocupaciones por los problemas ambientales y se admite que las prácticas de ordenación forestal y de elaboración, distribución y utilización de los productos forestales presentan deficiencias en lo que respecta al medio ambiente. En las nuevas tendencias de implementar la producción limpia en los procesos productivos, la comunidad exige a las industrias procesos y productos menos tóxicos con el medio ambiente, en ese sentido una estrategia mundial son los mercados verdes, que ofrecen productos y servicios ambientalmente amigables, de aquellos derivados del aprovechamiento forestal sostenible del ambiente (DAMA, 2003). La producción continua y eficiente de madera debe ser realizada de manera sostenible cuidando de los recursos naturales y manteniendo la biodiversidad, sin degradación ambiental (Becerra, Silva, 2012). Un mecanismo de control es la certificación forestal, que permite identificar claramente el origen de un producto garantizando su calidad y el buen manejo que ha tenido en el proceso de producción. El mercado tiende hacia la demanda de productos de madera con certificaciones ambientales y de evaluación de la huella de carbono (DAMA, 2003; Jarvinen et al., 2022).

### **Contexto General en Colombia, y para la Ciudad de Bogotá**

Según WWF (2016), Colombia pese a que cuenta con gran variedad de especies de maderas, las que son más comercializadas recaen en unas cuantas especies como cedro (*Cedrela odorata* L.), roble (*Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC.) cativo (*Prioria copaifera* Griseb), caracolí (*Anacardium excelsum* (Bertero & Balb.) Skeels), canaleta (*Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don) y sande (*Brosimum utile* (Kunth) Oken), las cuales son más perseguidas en los bosques naturales para ser taladas, representando casi el 70% del mercado, agotando sistemáticamente el recurso y erosionando la base natural de dichas especies (WWF, 2016). No obstante, la anterior afirmación puede ser objeto de controversia debido al subregistro existente, en el sentido de que

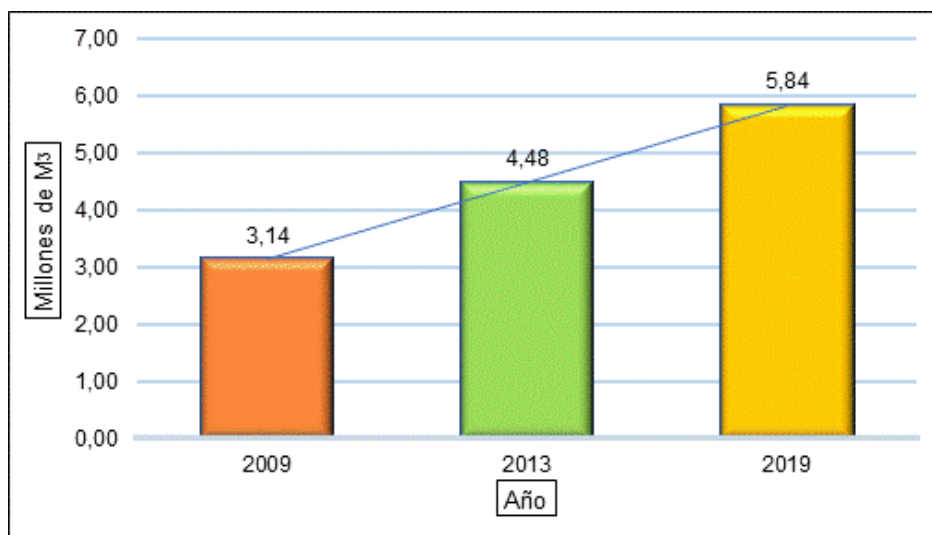
otras especies de maderas, al ser poco conocidas en el mercado, pueden estar haciéndose pasar por las más comercializadas, ya que en el país existe ilegalidad en el comercio de la madera (DAMA, 2003). De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016a), el porcentaje de madera aserrada comercializada para construcción, muebles y madera para otros usos que proviene de bosques naturales, es mucho menor a un hipotético 80%, debido a la falta de soportes estadísticos firmes. Las especies otobo y virolas (*Dialyanthera spp.*, *Irianthera sp.*, *Virola spp.*), el sande (*B. utile*), caracolí (*A. excelsum*), gualanday o chingalé (*Jacaranda spp.*), laurel común (varias familias *Lauraceae*), sajo (*Camptosperma panamensis* Standl), se mencionan como maderas ordinarias o de calidad media predominantes, y el cedro rosado o cedro caquetá (*Cedrela spp.*) y la ceiba tolúa (*Pachira quinata* (Jacq.) WS Alverson) como maderas finas, (MinAmbiente, 2016a).

MinAmbiente (2016b), en el estudio de descripción de la industria de transformación de la madera en Colombia, nombra a las principales especies consumidas por las empresas siendo el Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.), Abarco (*Cariniana pyriformis* Miers), Pino pátula (*Pinus patula* Schltdl. & Cham), Eucalipto pellita (*Eucalyptus pellita* F. Muell), pino (*Pinus spp.*), *Acacia melanoxylon* R.Br. y Melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm). Recientemente con un área plantada significativa, han entrado en el mercado las especies *Acacia mangium* Willd y *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden; la guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) tiene un volumen de movilización de alguna relevancia, siendo catalogada como flora no maderable (MADR, 2024). Se calcula un consumo de madera en Colombia de 3,14 millones de m<sup>3</sup> para el año 2009, para el año 2013 se calcula 4,48 millones de m<sup>3</sup> consumidos, se estima que el 33% de esta madera es proveniente de bosque natural. Se reporta que la demanda total de madera a nivel nacional para el año 2019 correspondió a 5,84 millones de m<sup>3</sup> (Figura 2), de los cuales el 58 % es para el

consumo de leña para los hogares; de los 2,45 millones de m<sup>3</sup> restantes, los sectores de transformación, fabricación de productos de madera y el sector de la construcción son los mayores consumidores de madera del país (MinAmbiente, 2015; MinAmbiente, 2023).

## Figura 2

*Consumo Total de Madera en Colombia, Durante los Años 2009 a 2019*



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de MinAmbiente (2015) y MinAmbiente (2023).

En Colombia la industria de transformación de la madera engloba diferentes líneas de manufactura como aserrado, acepillado, producción de tableros e inmunizado, donde las microempresas representan cerca del 92% del total de establecimientos registrados ante cámaras de comercio a nivel nacional, indicando una producción atomizada. Esta industria se encuentra en Bogotá, Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Atlántico, Bolívar, Norte de Santander y Santander. El destino de los residuos de la industria de transformación de la madera se diferencia entre los generados por las grandes industrias y algunas medianas que han implementado diferentes procesos y actualización tecnológica con máquinas automáticas programables y se preocupan por la utilización de estos residuos disminuyendo el desperdicio hasta un 10% en

promedio. Mientras tanto, en algunos casos de las micro o pequeñas empresas consideran los residuos como un problema que aumenta los costos de producción, promediando un 24% de la madera empleada (MinAmbiente, 2016b).

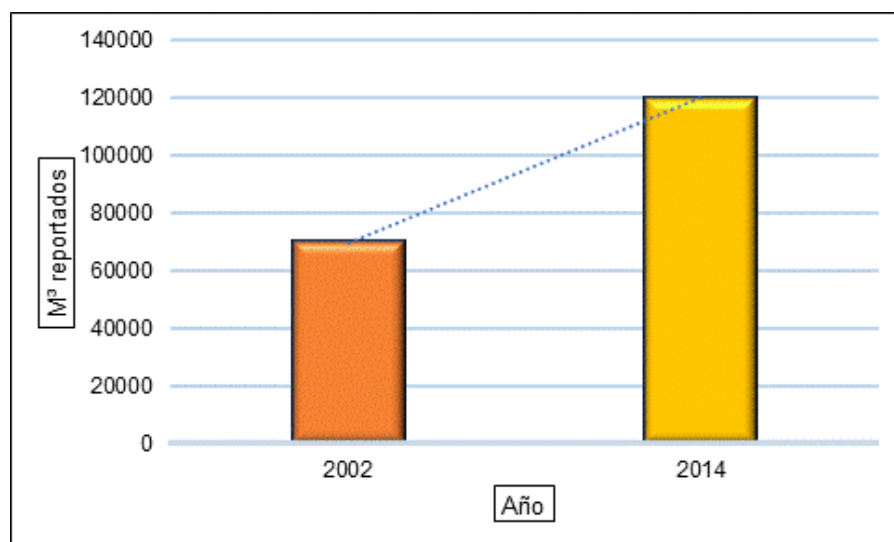
La madera maciza utilizada para construcción de vivienda en todas las fases, es de 40,32%, de este porcentaje gran parte proviene de bosques plantados como el eucalipto (*Eucalyptus sp.*) y el pino (*Pinus sp.*). En el orden nacional se usan principalmente tableros de partículas y de fibras de madera (71,8%), para la fase de acabados en la construcción, los productos más usados son tableros cubiertos con chapas, cubiertas melamínicas o fórmica (MinAmbiente, 2016a). Dentro de la cadena la industria del mueble de madera, el principal centro de producción es Bogotá seguido por Medellín, Cali, Popayán y Pasto, en último lugar la región de la Costa Atlántica (DAMA, 2004). En Colombia, la oferta de bienes perteneciente a la cadena madera-muebles que incluye tanto la producción como las importaciones, ascendió a 10,2 billones de pesos en 2012, de los cuales 59,6% fue fabricado por la industria nacional y 31,8% por otros países (Riaño et al., 2014). Las importaciones de la madera en Colombia han ido en aumento alcanzando la suma de USD 224 millones en el 2018, mientras que las exportaciones fueron de USD 66,2 millones, presentándose una balanza comercial deficitaria. Los mayores países de destino de las exportaciones fueron India, China, Panamá y Estados Unidos. Venezuela pasó de ser el principal destino en los años 2007 y 2008 a los menos importantes para el año 2015 (MinAmbiente, 2016; MinAmbiente, 2023). Para el año 2023 las importaciones de madera y sus manufacturas alcanzaron un valor de 252 millones de dólares, sumando 42 millones de la partida de muebles. Entretanto, las exportaciones de madera y sus manufacturas alcanzaron 27 millones de dólares, mas la partida de muebles que alcanzó un valor acumulado de 62 millones de dólares. Para el período 2023 los mayores países de destino de las exportaciones de Colombia

para estas partidas fueron Estados Unidos, Panamá y México, mientras que los países de los que más se importó fueron Ecuador, China, Brasil y Chile (MADR, 2024).

El sector de muebles de madera en Bogotá tiene una participación de 62,9%, mientras que las manufacturas de madera representan el 37,1 %, en el cual están incluidos la construcción (20,9%) y en actividades como el cepillado e impregnación de la madera (16,2%). No menos importante es el nivel de importaciones de madera que tiene el cual presenta el 17,3% del total de importaciones a nivel nacional de este sector productivo. La oferta local de Bogotá representó 20,3% de la oferta nacional de bienes y productos de esta cadena (Riaño et al., 2014). Según el Departamento Administrativo del Medio Ambiente, el consumo de madera en Bogotá se tasó para el año 2002, en 72000 m<sup>3</sup> de madera legal, estableciéndose como las especies de maderas mayormente comercializadas en su orden el sajo, el pino, el eucalipto, el cuángare, el sande, el perillo, el cedro, el chingalé, el pino pátula, el roble, el marfil, el algarrobo y el canaleta. Es de anotar que en Bogotá se estima un 50% de ilegalidad, en la madera que ingresa y se comercializa (DAMA, 2004). El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, hace un reporte para el año 2014 del promedio de maderas comercializado para el Distrito Capital, en 120 mil m<sup>3</sup> de madera legal, con un incremento en el consumo (Figura 3), donde el principal uso dado a las maderas que se transforman y comercializan son en su orden la industria del mueble, la industria de pisos, la industria de la construcción y la fabricación de artesanías (MinAmbiente, 2015).

**Figura 3**

*Consumo de Madera Legal en la Ciudad de Bogotá D.C.*



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de DAMA, 2004 y MinAmbiente, 2015.

En un documento del año 2010, la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá describe las maderas de frecuente comercialización en la jurisdicción, destacándose el Eucalipto (*E. globulus*), Pino patula (*P. patula*), Pino ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill), Eucalipto rosado (*E. grandis*), Pino radiata (*Pinus radiata* D. Don.), Roble o flormorado (*T. rosea*), Sajo (*C. panamensis*), Cedro (*C. odorata*), Nogal cafetero (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken), Teca (*Tectona grandis* L.f.), Sande (*B. utile*), Cuangare, virola u otobo (*Otoba gracilipes* (A.C. Smith) Gentry), Perillo (*Couma macrocarpa* Barb. Rodr.), Chingalé, gualanday o canaleta (*J. copaia*), Guadua, bambú (*G. angustifolia*), Caracolí (*A. excelsum*), Ceiba tolúa (*P. quinata*), Cativo (*P. copaiifera*), Marfil, simaruba (*Simarouba amara* Aubl.) y Algarrobo (*Hymenaea courbaril* L.), el documento destaca el uso y procedencia de noventa especies de maderas, así como las propiedades físicas y aspectos de trabajabilidad, secado y preservado (SDA, 2010).

En cuanto a las zonas de aglomeración de la cadena productiva de la madera en Bogotá, se han caracterizado tres subzonas al interior de esta aglomeración que corresponden a los polígonos del Doce de Octubre, Boyacá Real y las Ferias. En estos polígonos se presentan aserraderos en las que se procesa madera aserrada, cepillada y contrachapada, y depósitos de acopio de madera, los cuales se menciona que corresponde al 16,2 % del total de establecimientos mientras que el resto conciernen a fabricación de muebles en su mayoría para el hogar y en menor porcentaje muebles de oficina. El 91,8 % de las unidades productivas presentes, son microempresas con menos de diez trabajadores para las zonas de aglomeración de la cadena productiva de maderas, estando asentadas en un 80,7 % en locales arrendados o subarrendados, lo cual disminuye la utilidad de estos (Riaño et al., 2014).

### ***Nivel de Tecnología en la Industria de la Madera***

En el orden nacional, el nivel tecnológico no es de alta complejidad para la micro y pequeña industria, que posee equipos de hasta 30 años de antigüedad como sierra sin fin, circular, torno, planeadora, cepillos y herramienta manual; mientras que, las empresas grandes y algunas medianas tienen un nivel tecnológico mayor, con maquinaria automatizada como la de control numérico computarizado (CNC), seccionadoras automáticas, hiladoras y rover capaz de realizar el taladrado y pantografiado (MinAmbiente, 2016b). En pequeñas unidades productivas, se acostumbra realizar el secado al aire libre en patios, apilando las trozas durante largos periodos de tiempo, por ende, la rotación del producto es lenta, mientras el secado mecánico es usado en los productos aprovechados de las plantaciones comerciales, donde se logra estabilizar el nivel de humedad de la madera para un suministro acorde a la demanda, y facilitar un ulterior proceso de inmunización con ayuda de agentes químicos (Riaño et al., 2014). La industria de inmunización de maderas en Colombia se encuentra conformada aproximadamente por 15

inmunizadoras reconocidas (DAMA, 2003), que se caracteriza por ser una industria competitiva, ofreciendo productos de buena calidad y con baja competencia. El 80% de productos inmunizados, corresponde a madera proveniente de plantaciones y el 20% restante de maderas del bosque natural, comúnmente se utiliza la tecnología de inmunización por presión empleando una cabina de aire, presión hidrostática y vacío (proceso en autoclave).

## Resultados

### Preservantes Naturales y Biopreservantes

#### *Aceites Esenciales*

Los aceites esenciales son compuestos aromáticos hidrofóbicos, producidos por las plantas para efectos de enfrentar competidores, patógenos y predadores del medio en el que se desarrollan (Cai et al., 2020). Los metabolitos secundarios de las plantas albergan una variedad de moléculas como los terpenos, aldehídos, alcoholes, cetonas y fenoles, con actividades multi-propósito, entre estas la inhibición del crecimiento fúngico. Los compuestos que se encuentran en los aceites esenciales son sustancias menos tóxicas para la salud humana y el medioambiente que los químicos de síntesis (Zhang et al., 2016; Xie et al., 2017; Zikely et al., 2023). Los investigadores Tran-Ly et al., (2022) hallaron la posibilidad de tratar maderas utilizadas en la fabricación de instrumentos musicales, como aquellas que provienen del nogal (*Juglans regia* L.), con aceites esenciales provenientes del árbol del te (*Melaleuca alternifolia* (Maiden y Betche) Cheel), linaza (*Linum usitatissimum* L.) y eucalipto (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson). El uso de estos aceites esenciales como biopreservantes, resultan potenciados al aplicar de base melanina, un polímero bio-derivado de la especie *Armillaria cepistipes* Velen; estos aceites poseen propiedades antimicrobianas y antifúngicas además de actuar como agentes hidrofóbicos (Wozniac, 2022; Tran-Ly et al., 2022).

Se ha comprobado la acción antimicrobiana del aceite esencial de ricino (*Ricinus communis* L.), su aplicación en concentraciones adecuadas, inhibe el crecimiento de especies de hongos de los géneros *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium* y otros mohos (Momoh et al., 2012). El uso de aceite de neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) presenta actividad insecticida debido a un ingrediente activo principal la azadirachtina, ésta induce a la mortalidad de los insectos. El aceite

de ricino como un añadido al aceite de neem, funciona como un tensoactivo que mejora el campo de acción (Goncalves y Rocco, 2020). De acuerdo con Salem et al. (2016a) el aceite esencial extraído de hojas de la especie *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, puede inhibir el crecimiento del hongo *Chaetomium globosum* Kunze, y retarda el crecimiento de *A. alternata* en altas concentraciones (5000 ppm). Para ello, midieron las zonas de inhibición (ZI, mm) de los aceites esenciales alrededor de las maderas tratadas de *Pinus sylvestris*, *Pinus rigida* y *Fagus sylvatica*. La técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) y el porcentaje de área de pico utilizado para obtener datos cuantitativos con el CG con el software HPChemStation, identificó los principales compuestos químicos del extracto de eucalipto: eucalyptol (60,32%),  $\alpha$ -pineno (13,65%),  $\gamma$ -terpineno (17,57%) y terpineno-4-ol (4,24%) (Salem et al., 2016a). También se han hecho pruebas *in vitro* e *in vivo* con aceites esenciales de *Cupressus sempervirens* L., *Citrus limon* (L.) Osbeck, *Thuja occidentalis* L., *Schinus molle* L., *Artemisia monosperma* Delile y *Pelargonium graveolens* L'Hér, probando su acción biocida como biopreservantes de maderas, contra los hongos de pudrición blanca *Hexagonia apiaria* (Pers.) Fr. y *Ganoderma lucidum*, sin embargo, se requiere evaluar la efectividad a largo plazo y pruebas de toxicidad (Mohareb et al., 2013).

Zhang et al. (2016) investigaron la actividad antifúngica de 41 monoterpenos aislados de aceites esenciales (Tabla 2), en el ensayo se utilizó cajas de petri esterilizadas con el medio papa dextrosa agar (PDA), y adicionaron diferentes concentraciones de los compuestos, hallando la concentración inhibitoria media IC<sub>50</sub> para cada hongo evaluado. Los experimentos mostraron que el monoterpeno más tóxico contra los hongos de pudrición blanca *Trametes hirsuta* (Wulfen) Pilát, *Schizophyllum commune* Fr. y *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill es el carvacrol, seguido por el timol, el eugenol y el citral. Estos compuestos presentan un gran potencial como

fungicidas naturales (Zhang et al., 2016). Los investigadores Xie et al. (2017), identificaron y cuantificaron los compuestos que tiene los aceites esenciales extraídos de las plantas: orégano (*Origanum vulgare* L), limonaria (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf), tomillo (*Thymus vulgaris* L.), clavo (*Eugenia caryophyllata* Thunb), geranio (*P. graveolens*) y canelo común (*Cinnamomun zeylanicum* Ness); con la técnica CG-EM y comparando índices de retención relativos a n-alkanos, patrones de fragmentación de espectral de masas en la base de datos NIST11.LIB, e integrando el área del pico de CG de los cromatogramas. El estudio logró probar la actividad antifúngica de los aceites esenciales y componentes mayoritarios que tienen las plantas, por medio de ensayos contra los hongos de pudrición de la madera *T. hirsuta* y *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill (Xie et al., 2017).

De las maderas de durabilidad natural alta y resistentes al ataque de los hongos, se pueden obtener aceites esenciales. El cedro atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière) posee atlantonas como la quetona sesquiterpénica, alcoholes como el isocedranol y tropolonas como tujopsanona; la extracción del aceite esencial se hace desde serrines por la técnica de hidro-destilación. Ensayos de laboratorio permitieron hallar la concentración mínima inhibitoria (CIM) del aceite esencial de cedro atlas, contra los hongos de pudrición *Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murrill, *Oligoporus placenta* (Fr.) Gilb. & Ryvarden, *Coniophora puteana* (Schumach.) P.Karst. y *T. versicolor*. Probetas de la madera de cedro atlas se colocaron en botellas de sección cuadrada previamente inoculadas con los hongos objetivo, para evaluar la resistencia de la madera a estos hongos, arrojando un porcentaje de masa perdida inferior al 4,8%, siendo una madera catalogada como muy durable (Fidah et al., 2016). Otra madera de características de resistencia natural es el enebro (*Juniperus occidentalis* Hook), que contiene cedrol, widrol y otros terpenos en el material leñoso, incluso desde las ramas y follaje se obtiene un aceite

esencial extraído por destilación al vapor. Al sumergir fibras de madera y probetas de pino amarillo del sur y de enebro en aceite de enebro diluido al 10% (v/v) en etanol, se observó que en las probetas de pino impregnadas la pérdida de peso es de 26,2 %, frente al ataque del hongo de pudrición blanca *T. versicolor*, mientras la pérdida de peso en probetas de enebro es de sólo el 0,2%. El ensayo con fibras de madera impregnadas mostró variaciones en el porcentaje de pérdida de peso al formar tableros de fibra de pino, donde los hongos de pudrición parda y blanca resultan menos inhibidos en comparación a las probetas de madera (Pipíska et al., 2021). En la albura de madera seca de *Pinus pinaster* var *Atlantica* Ait, se aplicó el aceite esencial extraído por hidrodestilación de aserrines de madera de *C. atlantica* y de raíces de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast, mostrando una pérdida de masa media del 8% al exponerlos a hongos de pudrición parda. Según el estándar europeo EN 113 esta cifra debe ser inferior al 3% para mostrar suficiente protección para usos externos, sin embargo, han demostrado buena inhibición fúngica y su uso es promisor como biopreservante; los autores recomiendan en próximos ensayos usar una mayor concentración de aceites y un método de impregnación más efectivo (Salhi et al., 2020).

El grupo de aceites vegetales convencionales como el de linaza (*L. usitatissimum*), jojoba (*Simmondsia chinensis* (Lind) Schneider), soya (*Glycine max* (L.) Merr) y ricino (*R. communis*), presentan propiedades más para el acabado, limpieza y decoración de maderas que de preservación, siendo estos aceites de todas formas empleados en una u otra forma para la protección de las maderas (Goncalves y Rocco, 2020). Compuestos de origen animal como la cera de abejas y la quitina tienen propiedades como inhibidores fúngicos (Broda, 2020), la cera de abejas puede contribuir a la protección de la madera contra la humedad y la degradación

fotoquímica, ya que después de varias aplicaciones, va acumulando una capa con efecto hidrofóbico y propiedades biocidas (Teaca et al., 2019).

**Tabla 2**

*Recopilación de Experimentos con Aceites Esenciales Vegetales que Inhiben Hongos de la Madera*

Fuente Vegetal Extraída	Compuestos Mayoritarios del Derivado Vegetal	Especies Fúngicas Objetivo	Concentraci ón Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Hojas <i>E. camaldulensis</i>	Eucalyptol, $\alpha$ -pineno, $\Upsilon$ - terpineno y terpineno-4-ol	<i>C. globosum</i> , <i>A. alternata</i>	0,5 %* (v/v)	Evaporación/ <i>P. sylvestris</i> , <i>P. rigida</i>	Salem et al. (2016a)
Duramen <i>Pinus rigida</i>	$\alpha$ -terpineol, borneol, alcohol fenquílico, $\alpha$ -pineno y L-limoneno	<i>A. alternata</i> , <i>F. subglutinans</i> , <i>C. globosum</i> , <i>A. niger</i> , <i>T. viridae</i>	0,25 %* (v/v)	Evaporación/ <i>F. sylvatica</i>	id.
Hojas <i>A. monosperma</i>	1,2-dihidroacenaftileno, 2,4-pentadiinilbenceno, $\Upsilon$ - terpineno	<i>H. apiaria</i> - <i>G. lucidum</i>	IC <sub>50</sub> = 31 $\mu$ g/ml* 53 $\mu$ g/ml*	Vacío/ <i>P. sylvestris</i>	Mohareb et al. (2013)
Cáscaras <i>Citrus limon</i>	Dl-limoneno, $\beta$ -pineno, $\Upsilon$ - terpineno	<i>H. apiaria</i> - <i>G. lucidum</i>	98 $\mu$ g/ml* 262 $\mu$ g/ml*	id.	id.
Hojas <i>C. sempervirens</i>	$\alpha$ -pineno, $\delta$ -carena, $\alpha$ - terpinoleno	<i>H. apiaria</i> - <i>G. lucidum</i>	56 $\mu$ g/ml* 267 $\mu$ g/ml*	id.	id.
Hojas <i>P. graveolens</i>	$\beta$ -citronelol, trans- geraniol, formiato de citronelilo	<i>H. apiaria</i> - <i>G. lucidum</i>	113 $\mu$ g/ml* 123 $\mu$ g/ml*	id.	id.
Hojas <i>Schinus molle</i>	$\alpha$ -felandreno, $\beta$ - felandreno, elemol	<i>H. apiaria</i> - <i>G. lucidum</i>	96 $\mu$ g/ml* 252 $\mu$ g/ml*	id.	id.
Hojas <i>T. occidentalis</i>	$\alpha$ -pineno, $\beta$ -carena, $\alpha$ - cedrol	<i>H. apiaria</i> - <i>G. lucidum</i>	39 $\mu$ g/ml* 318 $\mu$ g/ml*	id.	id.
Polímeros de <i>A. cepistipes</i> , <i>M. alternifolia</i> ,	Base melanina + aceites naturales de plantas (O)	<i>C. globosum</i>	Melanina 250 $\mu$ g/ml*	vacío-inmersión/ <i>Juglans regia</i>	Tran-Ly et al. (2022)

Fuente Vegetal Extraída	Compuestos Mayoritarios del Derivado Vegetal	Especies Fúngicas Objetivo	Concentraci ón Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
<i>L. usitatissimum</i> , <i>E. citriodora</i>			Linaza-te (O) 9:1 (v/v)		
Plantas indeterminadas	Carvacrol	<i>T. hirsuta</i> - <i>S. commune</i> - <i>P. sanguineus</i>	IC <sub>50</sub> = 87,6 -53,6- 71,7µg/ml	No probado	Zhang et al. (2016)
id.	Timol	<i>T. hirsuta</i> - <i>S. commune</i> - <i>P. sanguineus</i>	139 -67,1 - 116,8 µg/ml	id.	id.
id.	Eugenol	<i>T. hirsuta</i> - <i>S. commune</i> - <i>P. sanguineus</i>	85,1 -122,2 - 137,7 µg/ml	id.	id.
<i>Origanum vulgare</i>	Carvacrol, p-cimeno, timol, γ-terpineno	<i>T. hirsuta</i> - <i>L. sulphureus</i>	IC <sub>50</sub> = 79,1 -36,9 µg/ml	No probado	Xie et al. (2017)
<i>C. citratus</i>	Citral, geraniol, longifoleno	<i>T. hirsuta</i> - <i>L. sulphureus</i>	88,5 -60,3 µg/ml	id.	id.
<i>C. zeylanicum</i>	Acetato de cinamilo, cinamaldehido, salicilaldehído	<i>T. hirsuta</i> - <i>L. sulphureus</i>	96,9 -69,2 µg/ml	id.	id.
<i>E. caryophyllata</i>	Eugenol, β-cariofileno, δ- cadineno	<i>T. hirsuta</i> - <i>L. sulphureus</i>	104,2 -77,5 µg/ml	id.	id.
<i>Thymus vulgaris</i>	Timol, p-cimeno, γ- terpineno	<i>T. hirsuta</i> - <i>L. sulphureus</i>	130,1 -59,2 µg/ml	id.	id.
Serrínes <i>Cedrus atlantica</i>	Quetonas sesquiterpénicas, isocedranol, tujopsanona	<i>G. trabeum</i> <i>O. placenta</i> <i>C. puteana</i> <i>T. versicolor</i>	CIM= 0,25%* (v/v)	–	Fidah et al. (2016)
Ramas y follaje <i>J. occidentalis</i>	Cedrol, widrol, otros terpenos	<i>T. versicolor</i>	10% (v/v)	Inmersión-vacío/ <i>Pinus sp.</i> , <i>Juniperus</i> <i>occidentalis</i>	Pipíska et al. (2021)

Fuente Vegetal Extraída	Compuestos Mayoritarios del Derivado Vegetal	Especies Fúngicas Objetivo	Concentraci ón Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Serrines de raíz <i>T. articulata</i>	Timol, 3-tera-butil-4- metoxifenol, cedrol, $\alpha$ - cedreno.	<i>G. trabeum</i>		Inmersión-presión/ <i>P. pinaster</i>	Salhi et al. (2020)
Serrínes <i>C. atlantica</i>	5-isocedranol, 9-iso- tujopsanona, cedranona, cedroxido	<i>R. placenta</i> <i>C. puteana</i>	0,4 % (v/v)		

*Nota.* \*Unidades de equivalencia

### ***Extractivos de Plantas***

Los extractivos de plantas usados para la preservación de maderas, vienen siendo una alternativa menos perjudicial al medioambiente porque atacan específicamente el agente deteriorador y reducen la afectación sobre los insectos y organismos benéficos y también su aplicación reduce los riesgos sobre la salud de los trabajadores de tratamiento de maderas (Rahman et al., 2019). Los extractivos son fitoquímicos que no están combinados con las moléculas estructurantes de la pared celular, y pueden ser removidos con solventes polares y no polares (Vek et al., 2020), la Tabla 3 relaciona los diferentes estudios que demuestran la bioactividad de los extractos vegetales sobre hongos degradadores de madera.

El extractivo metanólico y etanólico de hojas de neem (*A. indica*), resultan ser efectivas contra el ataque fúngico y termítico. Rahman et al. (2019), en ensayos de laboratorio, adicionan el 5 % de la extracción etanólica del neem a cajas de petri con el medio PDA, inhibiendo el crecimiento de varios hongos de pudrición de la madera. En pruebas *in situ* evalúan la efectividad del extractivo, impregnando por inmersión muestras de madera de la especie *Samanea saman* (Jacq.) Merr y puestas en el suelo por 8 semanas, observando que la pérdida de peso seco de la madera sólo correspondió al 12%, en comparación con el 74% de la madera no

tratada (Rahman et al., 2019). El extractivo metanólico obtenido de rizomas de *Acorus calamus* L., posee  $\beta$ -asarona como componente principal, esta planta monocotiledónea es de áreas inundables y pertenece a la familia Acoraceae. La especie *Pinus roxburghii* Sarg es de madera resinosa de la familia Pinnaceae y las especies latifoliadas *Celtis australis* L. y *Bombax ceiba* L., son de las familias Ulmaceae y Bombacaceae respectivamente; todas las anteriores especies son consideradas maderas de baja durabilidad natural. Al sumergir probetas de estas maderas en un medio con 2% (m/v) de concentración del stock del extractivo de *A. calamus*, y luego exponerlas ante el hongo de pudrición *Polyporus sp.*, se observa que para *C. australis* y *B. ceiba*, el hongo resulta inhibido en un 67% y para *P. roxburghii* logra un porcentaje de inhibición del 75% (Dhiman y Dutt, 2018). Otro extractivo metanólico es el obtenido de *Parthenium hysterophorus* L., de partes aéreas de la planta, en este se hallan fitoquímicos como saponinas y glucósidos, lactona, histerina, ambrosín, flavonoides y ácidos orgánicos, el extractivo sirve como preservante natural para hongos de pudrición parda y blanca, en una concentración del 2% (m/v), observando un porcentaje de inhibición cercano al 90%, en ensayos realizados con probetas de albura de pino (Meena y Dutt, 2024).

*Lannea coromandelica* (Houtt.) Merr de la familia anacardiaceae, es una especie maderable de crecimiento medio a rápido. Al aplicarle por inmersión el extractivo de especies de plantas de rápida proliferación o consideradas incluso malezas como *Lantana camara* L. y *Ageratum conyzoides* L., extraídas con éter de petróleo, resulta inhibido el hongo *L. sulphureus*, y la madera tratada pierde solo el 16% de masa, en comparación con más del 30% de pérdida sin la aplicación (Gupta et al., 2021). El tabaco contiene principalmente alcaloides como la nicotina y otros componentes como neofitadieno y 2,7,11-cembratrieno-4,6-diol, que son extraídos con soluciones de etanol. *Pinus yunnanensis* Franch y *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.)

Müll.Arg., son especies maderables de rápido crecimiento ampliamente plantadas en China y otras partes del mundo, probetas de estas especies se impregnaron con el extractivo de residuos de tabaco por medio de vacío-presión, inhibiendo el crecimiento de los hongos de pudrición de la madera, mostrando una pérdida de masa en promedio del 5 % para el pino y del 9% para el caucho. Se observó que la madera de caucho retiene mejor el extractivo con respecto a la madera de pino porque esta última contiene resinas, la primera tiene una densidad de 0,48 g/cm<sup>3</sup> y la segunda de 0,52 g/cm<sup>3</sup> (Liu et al., 2024).

**Tabla 3**

*Recopilación de Experimentos con Extractivos de Plantas que Inhiben Hongos de la Madera*

Fuente Vegetal Extraída	Compuestos Mayoritarios del Derivado Vegetal	Especies Fúngicas Objetivo	Concentración Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Rizomas de <i>Acorus calamus</i>	β-asarona	<i>Polyporus sp.</i>	2% (m/v)	Inmersión/ <i>P. roxburghii</i> <i>C. austalis</i> <i>B. ceiba</i>	Dhiman y Dutt (2018)
Partes aéreas <i>P. hysterophorus</i>	Saponinas, glucósidos, lactona, histerina, ambrosina, flavonoides, ácido fumárico, ácido vanílico, ácido caféico.	<i>G. striatum</i> <i>T. versicolor</i>	2% (m/v)	Inmersión/ <i>P. roxburghii</i>	Meena y Dutt (2024)
Rizomas <i>Acorus calamus</i>	Taninos, flavonoides, polifenoles, mucílago y glucósidos	id.	id.	id.	id.
Hojas <i>Azadirachta indica</i>	Fenoles y trazas de flavonoides	Indeterminados	5% (m/v)	Inmersión/ <i>S. saman</i>	Rahman et al. (2019)
<i>Lantana camara</i>	Acido propanoico, 2- hidroxi-etil- éster	<i>L. sulphureus</i>	2% (m/v)	Inmersión/ <i>L. coromandelica</i>	Gupta et al. (2021)
<i>A. conyzoides</i>	Precoceno II	id.	id.	id.	id.

Fuente Vegetal	Compuestos	Especies	Concentración	Método	Referencia
Extraída	Mayoritarios del Derivado Vegetal	Fúngicas Objetivo	Inhibitoria	Impregnación/ Especie de madera	
Residuos <i>Nicotiana tabacum</i>	Nicotina, neofitadieno y 2,7,11-cembratrieno-4,6- diol,	<i>G. trabeum</i> <i>T. versicolor</i>	4 x 10 <sup>4</sup> µg/ml*	Vacio-presión/ <i>H. brasiliensis</i> <i>P. yunnanensis</i>	Liu et al. (2024)

*Nota.* \*Unidades de equivalencia

### ***Extractivos de la Madera y Taninos***

La propiedad de quelación de metales de los extractos de madera, impacta considerablemente la actividad de los hongos para degradar la madera. Otra propiedad de estos extractos es poder eliminar formas reactivas de oxígeno, que son requeridas en los procesos enzimáticos u oxidativos para la degradación de la madera, por ejemplo, la medicarpina es una fitoalexina encontrada en el duramen de *Dalbergia congestiflora* Pittier, que inhibe la acción de la lacasa del hongo *T. versicolor*, porque reduce la vinculación directa de la proteína con los componentes de la lignina en el sitio T1, y evita la liberación de moléculas de agua y la reducción del O<sub>2</sub> (Valette et al., 2017).

Los biopreservantes derivados de extractos etanólicos obtenidos del duramen de especies de plantas resistentes a la acción antifúngica como *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O.Grose, resultan en la inhibición de hongos xilófagos a partir de la impregnación de estos compuestos en la madera de *Pinus caribaea* Morelet y pueden ser combinados con minerales para potenciar su acción antifúngica, al ser de origen biológico (Velásquez et al., 2019). Los extractivos fenólicos del duramen y los taninos hacen que la madera sea naturalmente durable, estos compuestos no solo están presentes en el duramen sino también en la corteza y otras partes de los árboles (Barbero et al., 2019), como los nudos en la madera de pino escocés (*P. sylvestris*) y duramen de

la acacia negra (*Robinia pseudoacacia* L.), que se desmenuzan para obtener un extractivo concentrado. Estas maderas consideradas ordinarias en el mercado, pueden ser utilizadas para la obtención de extractivos naturales, el pino escocés posee extractivos fenólicos como los estilbenos y lignanos, que muestran inhibición fúngica, mientras que en la acacia negra (*R. pseudoacacia*), se han identificado extractivos hidrofílicos como el flavanonol, robinetina y derivados del ácido hidroxicinámico con capacidad para eliminar radicales libres producidos por la reacción de Fenton (Vek et al., 2020).

Los científicos Salem et al. (2016b), hallaron alta inhibición en el crecimiento de mohos comunes de la madera (Tabla 4), al hacer reaccionar probetas de madera de especies de pino (*Pinus spp.*) y haya europea (*F. sylvatica*) con este tipo de hongos, previamente tratadas con el extracto metanólico del duramen de la especie *Pinus rigida*, en una concentración al 2% en condiciones de laboratorio. Se identificó los constituyentes químicos y los grupos funcionales de este extractivo, por medio de la técnica CG-EM y el análisis espectroscópico FTIR (Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier):  $\alpha$ -terpineol, borneol, hidrato de terpena, alcohol D-fenquílico y limoneno glicol, fueron los principales (Salem et al. 2016b). Los investigadores Mansour y Salem (2015), ensayaron en probetas de madera de *Acacia saligna* (Labill.) H.L.Wendl., la efectividad del extracto metanólico provenientes del duramen de *Morus alba* L., de *C. sempervirens* y de la corteza de *Maclura pomifera* (Raf.) C.K.Schneid, como biopreservante de madera, en combinación con resina acrílica Palaroid B-72 (consolidante). Al emplear la técnica de inmersión en diferentes concentraciones, impregnaron las probetas con el extracto natural, y se pudo comprobar la inhibición del crecimiento del moho *Trichoderma harzianum* a nivel de laboratorio, mas no se tuvo en cuenta todos los factores ecológicos (Mansour y Salem, 2015).

Los taninos están presentes en las hojas, el tallo y los frutos de una gran cantidad de especies arbóreas, presentando los taninos condensados, propiedades antifúngicas y con gran capacidad de formar otros compuestos con iones metálicos que aumentan su acción (Goncalves y Rocco, 2020). En ese sentido al hacer tratamientos conjuntos a maderas como impregnar con el método de vacío-presión el pino amarillo del sur (*Pinus spp.*) con ácido tánico ( $C_{76}H_{52}O_{46}$ ) para reducir la penetración de humedad e inhibir la colonización de hongos como *G. trabeum*, y posteriormente tratarla por el método de inmersión con aceite de tung (extraído del árbol *Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw), ayuda a reducir la lixiviación del compuesto lo que conlleva a una mayor durabilidad de la madera para ambientes exteriores. Particularmente la capa de ácido tánico es capaz de eliminar los radicales libres y absorber la radiación ultravioleta en el proceso de fotodegradación (Peng et al., 2021).

Los extractos del cedro rojo occidental (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) como el ácido plicático y  $\beta$ -tujaplicinol, han mostrado capacidad para inhibir hongos de pudrición blanca y parda de la madera. También los extractos de la corteza de la mimosa (*Acacia mollissima* hort. ex Willd.) y el quebracho (*Schinopsis lorentzii* (Griseb.) Engl), han mostrado resistencia antifúngica en hongos de pudrición, debido a los altos contenidos de taninos de estas especies, siendo efectivos cuando se aplican como preservantes de maderas en concentraciones de un 9 al 12 % en espacios interiores (González et al., 2015). El tanino Colatán GT10 a base del extracto de la corteza del quebracho colorado (*S. lorentzii*), puede ser considerado como un adecuado preservante según el estándar europeo EN 113, porque inhibió el hongo *C. puteana*, luego de someter probetas de la madera de pino a tratamientos de inmersión y vacío-presión, presentando una pérdida de masa por debajo del 3%. Es el tanino de quebracho una solución sostenible prometedora, siempre y cuando las investigaciones apunten a mejorar la fijación del producto en

la madera (Barbero *et al.*, 2021). El quebracho (*Schinopsis balansae* Engl) es el tanino condensado más comercializado después de la mimosa, posee gran contenido fenólico. Maderas de las especies picea (*Picea abies* (L.) H.Karst), pino (*Pinus sp.*), alamo (*Populus alba* L.), y haya (*F. sylvatica*), impregnadas por inmersión en una concentración desde el 5 al 20% (m/m), con la solución tanino de quebracho y hexamina como reticulante, permite mejorar la resistencia a la lixiviación y mejora las propiedades mecánicas de maderas poco densas como picea, alamo y pino. La madera de haya es una madera dura que aumenta su dureza al tratarse, debido a la acumulación del tanino y por la fácil impregnación en su superficie (Cesprini *et al.*, 2022).

**Tabla 4**

*Recopilación de Experimentos con Extractivos de la Madera y Taninos que Inhiben Hongos de la Madera*

Fuente Vegetal Extraída	Compuestos Mayoritarios del Derivado Vegetal	Especies Fúngicas Objetivo	Concentración Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Duramen <i>H. serratifolius</i> , <i>C. paraense</i> , <i>Tectona grandis</i>	Naftoquinonas, antraquinonas, tectoquinonas	<i>G. trabeum</i> <i>T. versicolor</i>	2% (m/v)	Presión-vacío Lowry/ <i>P. caribaea</i>	Velazquez et al. (2019)
Nudos <i>Pinus sylvestris</i> Duramen <i>R. pseudoacacia</i>	Estilbenos, lignanos Flavanonol, robinetina, ácido hidroxicinámico	<i>T. versicolor</i> <i>S. commune</i> <i>G. trabeum</i> <i>F. vaillantii</i>	5% (m/v)	Vacío-presión/ <i>P. sylvestris</i> <i>F. sylvatica</i>	Vek et al. (2020)
Duramen de <i>Pinus rigida</i>	$\alpha$ -terpineol, borneol, hidrato de terpina, alcohol D-fenquílico y limoneno glicol	<i>A. alternata</i> <i>F. subglutinans</i> <i>C. globosum</i> <i>A. niger</i> <i>T. viridae</i>	Extracto al 2%	Inmersión/ <i>P. sylvestris</i> <i>P. rigida</i> <i>F. sylvatica</i>	Salem et al. (2016b)

Fuente Vegetal Extraída	Compuestos Mayoritarios del Derivado Vegetal	Especies Fúngicas Objetivo	Concentración Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Duramen <i>Morus alba</i>	Taninos, saponinas, triterpenos, sitosteroles + Paraloid B72	<i>Trichoderma harzianum</i>	5% al 20%	Inmersión/ <i>A. saligna</i>	Mansour y Salem (2015)
Duramen <i>C. sempervirens</i>	Fenoles, flavonoides, taninos + Paraloid B72	id.	id.	id.	id.
Corteza <i>Maclura pomifera</i>	Fenoles, isoflavonoides prenilados + Paraloid B72	id.	id.	id.	id.
<i>Vernicia fordii</i>	Acido tánico (TA) + aceite de tung (TO): $\alpha$ - eleostearico, ácido oléico, ácido linoléico	<i>G. trabeum</i>	10% TA + TO puro	Vacío-presión/ <i>Pinus spp.</i> Inmersión/ <i>Pinus spp.</i>	Peng et al. (2021)
Corteza <i>S. lorenzii</i>	Colatán GT10: extracto de quebracho	<i>C. puteana</i>	5% (m/m)	Vacío-presión Bethel/ <i>P. sylvestris</i>	Barbero et al. (2021)
<i>S. balancae</i>	Tanino condensado quebracho, hexamina	Indeterminados	5% al 20% (m/m)	Vacío/ <i>Picea abies</i> <i>F. sylvestris</i> <i>Pinus sp.</i> <i>Populus alba</i>	Cesprini et al. (2022)

*Nota.* Concentración inhibitoria según cada referencia

### ***Biocompuestos y Química Verde***

Actualmente se investiga opciones donde las maderas no exuden los aceites vegetales luego de su aplicación, con ayuda de técnicas que promuevan la oxidación y polimerización y que a la vez la madera no absorba la humedad del medio ambiente (Cai et al., 2020; González et al., 2015). Diferentes combinaciones de preservantes naturales con otros compuestos como antioxidantes y metales quelantes, o con agentes co-impregnados por reticulación de los polímeros, forman materiales que pueden mejorar la eficacia y disminuir la lixiviación de un

producto por el agua. La incidencia en la adecuada penetración en las paredes celulares de la madera, depende del tipo de tratamiento de aplicación, no obstante, dichas emulsiones o aditivos específicos pueden llegar a ser costosos (Changotra et al., 2024). El quitosano es un biopolímero que previene el ataque de hongos en presencia de alta humedad relativa, al afectar la morfología de origen fúngico, porque altera la membrana plasmática y causa distorsión hifal y agregación citoplasmática. Teniendo su base de extracción en la quitina de insectos y crustáceos, el quitosano en concentraciones elevadas se convierte en tóxico para los hongos, puede ser utilizado como biopreservante de maderas. Con el fin de aminorar la lixiviación de este compuesto, Alorbu y Cai (2022) hicieron ensayos evaluando las propiedades antifúngicas del quitosano reticulado con genipina (GC), siendo la genipina un reticulante natural de baja toxicidad proveniente de *Genipa americana* L., y *Gardenia jasminoides* J.Ellis, observando inhibición en el crecimiento de los hongos de pudrición parda y hongos de pudrición blanca, en probetas de maderas de pino del sur y de álamo (Tabla 5).

El cinamaldehído (CA) es el constituyente mayoritario del aceite esencial de la canela, extraído de la corteza y hojas de árboles del género *Cinnamomun sp.* El CA presenta propiedades antifúngicas porque causa daño celular y pérdida del citoplasma en los hongos, al inhibir las ATPasas y enzimas involucradas en la biosíntesis de la pared celular como el b-(1,3) glucano (Valette et al., 2017). Los investigadores Fang et al. (2021), mezclando el CA en una emulsión acuosa con quitosano (CH), observaron que la capa formada por este último reduce la liberación del CA, extendiendo el efecto antifúngico del CA en piezas de madera de álamo (*Populus nigra* L.). Al impregnar con vacío-presión la emulsión de CA más solución de CH en cantidad 2 a 1, se obtuvo resistencia contra el hongo de pudrición parda *G. trabeum*, y con una combinación mayor

de CA con respecto al CH (3 a 1), se logra inhibir parcialmente el hongo *T. versicolor* (Fang et al., 2021).

Se denomina química verde al diseño de productos y procesos de laboratorio, que busquen reducir o eliminar la producción y el uso de sustancias peligrosas para el medio ambiente y la salud humana, y cuyo impacto a cualquiera de estas dimensiones, sea tenido en cuenta desde el inicio. A través de la adopción de doce principios, la química verde busca el no uso de sustancias auxiliares como los solventes de petróleo, la formación de productos biodegradables y de baja toxicidad, la economía atómica, la reducción del consumo de energía, entre otros (Haug et al., 2019; Barotto, 2021). Con ayuda de la química verde, se sintetizó cinamato de metilo que es un compuesto proveniente del aceite esencial de especies vegetales del género *Cinnamomun*, este es un producto fungitóxico, pero de baja toxicidad para organismos no blanco o diana y obtenido con procesos de bajo impacto ambiental. Los ensayos de inhibición fúngica *in vitro* con el hongo de pudrición parda *Gloeophyllum sepiarium*, hallaron una concentración mínima inhibitoria de 2000 ppm para el compuesto (Haug et al., 2019).

La encapsulación de aceites esenciales en metil  $\beta$ -ciclodextrina (M $\beta$ CD) mejora la fijación del preservante en las paredes celulares de la madera tratada. El complejo preservante M $\beta$ CD-EOs, fue probado en probetas de madera de pino del sur (*Pinus taeda* L.) por el tratamiento de inmersión - vacío, encontrando que reduce significativamente la pérdida por lixiviación de estos aceites, y ayudan a mantener la actividad antifúngica, debido a que el complejo se moviliza por el parénquima radial, fijándose en la pared celular. El tratamiento con el complejo M $\beta$ CD-eugenol fue el de mayor inhibición fúngica (Cai et al., 2020). La mezcla de agentes de curado con coberturas derivadas del eugenol, demuestra ser eficaz para proporcionar a la madera propiedades de anti inflamabilidad, el eugenol se proyecta como una fuente para la

síntesis de revestimientos de madera. Otros compuestos de base biológica como el quitosano y la gelatina de pescado, son promisorios retardantes del fuego, ya que el concepto de agente ignífugo es vital en estructuras de madera en pro de reducir el riesgo de flamabilidad del material (Calovi et al., 2024).

Los compuestos de boro son usados en la preservación de maderas por su eficiencia, pero tienen el inconveniente de ser fácilmente lixiviables debido a su alta solubilidad. Para aumentar la fijación del boro se han desarrollado soluciones con tanino proveniente de la mimosa (*Acacia mearnsii* De Wild), disuelta en una solución con ácido bórico y caprolactama, obteniendo copolímeros más elásticos. La solución tanino-boro resulta en un efectivo antifúngico contra los hongos de pudrición *C. puteana* y *Antrodia sp.*, al impregnarse en probetas de madera de pino, con una pérdida de masa por debajo del 3%, resultando ser también un efectivo biocida contra la termita *Reticulitermes flavipes* y el carcoma *Hylotrupes bajalus* (Hu et al., 2017).

Según Barbero et al. (2018), las sustancias químicas de línea verde pueden proteger las maderas del decaimiento y los patógenos, con bajo impacto ambiental, entre estos se encuentran los polifenoles como los taninos condensados, los estilbenos y alcaloides como la cafeína. La industria que manufactura el café instantáneo, de té y de bebidas cafeinadas, produce grandes volúmenes de residuos de café (SCGs), siendo prometedor usar una concentración al 5% (m/m) o superior de SCGs, para la inhibición del crecimiento de hongos de pudrición parda y blanca. El empleo de SCGs como biopreservante, implicará separar selectivamente con métodos de extracción alternativa (p. ej. química verde) los compuestos de inhibición antifúngica como la cafeína y derivados principales como el ácido caféico y el ácido p-hidroxicinámico, de compuestos volátiles y de otros que pueden favorecer el crecimiento fúngico como los azúcares (Barbero et al., 2018). La cafeína es un alcaloide (metilxantina) que puede utilizarse como

biopreservante de maderas, su acción como insecticida, larvicida e inhibidor de mohos, levaduras y bacterias la hace promisorio; como antifúngico induce alteraciones en la actividad de las quitinasas, esenciales en la integridad de la pared celular de hongos. Se probó solución acuosa de cafeína (25 mg/mL), impregnando madera de albura del pino (*P. sylvestris*), que inhibió los hongos de pudrición parda *Coniophora puteana*, *Rhodonia placenta*, *Gloeophyllum trabeum*, y de pudrición blanca *Trametes versicolor*, así como contra los mohos *Aspergillus terreus*, *Aspergillus versicolor*, *A. niger*, *C. globosum*, *Cladosporium herbarum* (Pers.) Link, *Paecilomyces variotii*, *Penicillium cyclopium*, *P. funiculosum*, *Phoma violácea*, y *T. viridae* (Kwaśniewska et al., 2018). Otro ensayo hizo pruebas de resistencia antifúngica con cafeína y una emulsión de organosilanos impregnada a probetas de madera de picea y de pino de escocia, contra el hongo *R. placenta* y mostrando que las pérdidas de masa fueron de sólo el 1,4 y 0,5 % respectivamente; también la cafeína resultó tóxica para termitas de la especie *R. flavipes*. Las condiciones de humedad del medioambiente hacen que la cafeína sea lixiviable, debiendo investigarse una matriz química que una la cafeína en la madera y evite la lixiviación por condiciones climáticas externas (Simunková et al., 2021), y teniendo en cuenta que las maderas de albura como el pino retienen la cafeína mejor que otras maderas como el haya o el abeto (Kwaśniewska et al., 2018).

**Tabla 5***Recopilación de Experimentos con Biocompuestos que Inhiben Hongos de la Madera*

Fuente Vegetal Extraída	Clase de Aditivo o Técnica de Extracción y Compuestos Mayoritarios	Especies Fúngicas Objetivo	Concentración Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Frutos <i>G. americana</i> , <i>G. jasminoides</i>	Solución red biopolimérica: Genipina (GC) + quitosano (C): $\beta$ -D- glucosamina y N-acetil-D- glucosamina	<i>G. trabeum</i> <i>R. placenta</i> <i>T. versicolor</i> <i>Irpex lacteus</i>	GC: 0,05% + C: 1% (m/v)	Vacío GC/ <i>P. sylvestris</i> <i>P. nigra</i>	Alorbu y Cai (2022)
Corteza y hojas <i>Cinnamomun sp.</i>	Emulsión acuosa: Cinamaldehído (CA) + polvo de quitosano (C)	<i>G. trabeum</i> <i>-T. versicolor</i>	Razón molar: 2 a 1: CA/C -3 a 1: CA/C	Vacío-presión/ <i>P. nigra</i>	Fang et al. (2021)
Aislados de EO plantas indeterminadas	Complejo aceites esenciales (EO) + M $\beta$ CD: Eugenol, trans- cinamaldehido, carvacrol, timol + metil $\beta$ -ciclodextrina	<i>Gloeophyllum</i> <i>trabeum</i> <i>Postia</i> <i>placenta</i>	50% (m/v)	Inmersión-vacío/ <i>Pinus taeda</i>	Cai et al. (2020)
EO <i>Ocimum sp.</i> , <i>Cinnamomun sp.</i>	Química verde cinamato de metilo: esterificación ácido cinámico y metanol	<i>G. sepiarium</i>	CIM= 0,2 %*	No probado	Haug et al. (2019)
Tanino <i>Acacia mearnsii</i>	Copolímeros: Ácido bórico + caprolactama + extracto de mimosa	<i>C. puteana</i> <i>Antrodia sp.</i>	8,1 % (m/m)	Vacío-presión/ <i>P. sylvestris</i>	Hu et al. (2017)
Residuos de café usado	Químicos de línea verde: Cafeína, ácido caféico, p- hidroxicinámico, clorogénico, felúrico y protocatequico	<i>C. puteana</i> <i>G. trabeum</i> <i>R. placenta</i> <i>T. versicolor</i>	5 % (m/m)	No probado	Barbero et al. (2018)
<i>Coffea arabica</i> y otras plantas	Solución acuosa: Polvo de cafeína pura (1,3,7- trimetilxantina)	Hongos de pudrición	CIM= 2,5 x 10 <sup>4</sup> $\mu$ g/ml*	Vacío/ <i>P. sylvestris</i>	Kwaśniewsk a et al. (2018)

Fuente Vegetal Extraída	Clase de Aditivo o Técnica de Extracción y Compuestos Mayoritarios	Especies Fúngicas Objetivo	Concentración Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
		blanca, parda y mohos			
<i>Coffea arabica</i> y otras plantas	Solución acuosa: Cafeína (metilxantina) + organosilanos	<i>Rhodonia placenta</i>	Solución al 2%	Inmersión/ <i>Picea abies</i> <i>P. sylvestris</i>	Simunková et al. (2021)

*Nota.* \*Unidades de equivalencia

### ***Compuestos de Base Biológica y Combinación Tecnológica***

La pirólisis lenta es un tratamiento térmico por encima de los 275 °C, que degrada sólidos como la madera y los convierte en destilados líquidos con gran número de bio-compuestos químicos con propiedades antifúngicas. Al aplicar pirólisis lenta (350 °C) a maderas de abedul plateado (*Betula pendula* Roth), picea noruego (*P. abies*) y fibra de cáñamo (*Cannabis sativa* L.), se obtienen destilados químicos tales como ácido propinoico, ácido acético, ácido fórmico, metanol, hidroximetilfurfural y furfural que inhibe con efectividad el crecimiento de los hongos *C. puteana*, *R. placenta* y *G. trabeum* (Barbero et al., 2019) (Tabla 6). El alquitrán de coníferas ha sido usado en combinación con alquitrán de carbón y creosota para la preservación de las maderas. Este puede llegar a ser un efectivo fungicida, proyectándose como fuente de sustitución parcial o total de los preservantes oleosolubles como la creosota, siempre y cuando resulte más barata su obtención para lo cual deben adaptarse tecnologías y dependiendo de la disponibilidad de extracción de alquitranes piroleñosos en un sitio determinado (Navas, 2013).

Los bioaceites obtenidos al aplicar la pirólisis rápida en residuos de madera de la industria de la pasta y pulpa de madera, presenta propiedades contra el deterioro de la madera de los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* y de pudrición parda *G. trabeum*, y el cubrimiento

con este compuesto reduce la capacidad de absorción de humedad de la madera. En las moléculas fenólicas derivadas de la lignina y furanos derivados de los carbohidratos, el guaiacol y eugenol del bio-aceite presentan actividad antioxidante y se atribuye a los fenoles las propiedades biocidas (Lourencon et al., 2016). En otra investigación, Hassan et al. (2016) realizó pirólisis a maderas y cortezas de roble y de pino a temperaturas entre 450 °C- 550 °C, y posteriormente la destilación de fracciones fenólicas de los bio-aceites obtenidos (temperaturas entre 220 °C-270 °C), potencian la actividad antioxidativa de los productos, vía mecanismo de eliminación de radicales libres. Utilizando la técnica CG/EM caracterizan los componentes químicos de las fracciones fenólicas destiladas, hallaron que el fenol, o-guaiacol y sus derivados, y el eugenol, presentan gran actividad antioxidante (Hassan et al., 2016).

La búsqueda de información en la base de datos Patentscope, dio como resultado tres patentes seleccionadas. Las dos patentes de los autores Freel y Graham, una del año 2000 y otra del año 2008, reivindican un bio-aceite como preservativo de madera, obtenido por pirólisis rápida de maderas duras o blandas, preferiblemente de maderas desechadas que ha sido tratadas con creosota o pentaclorofenol, para lo cual se utiliza un reactor, comprendido entre temperaturas de 520 y 1200 °C, en presencia de un portador térmico particulado. El reactor es capaz de producir altos rendimientos de bio-aceite desde la materia prima (60%-80%), que comprende la lignina despolimerizada, alcoholes, ácidos orgánicos naturales y carbonilos. El líquido oleoso a temperatura ambiente es capaz de formar una película protectora en la madera que impide la entrada de agua y es mayormente tóxico para hongos de pudrición blanca, también puede usarse como portador de otro preservante con características miscibles para formar una emulsión que mejora la resistencia de la madera tratada (Freel y Graham, 2000; Freel y Graham, 2008). La patente de Heeres y Swager (2022), menciona que por pirólisis rápida de aserrines de maderas o

biomasa leñosa, en el rango de 250 °C a 700 °C, con un tiempo de calentamiento muy corto, reivindican el PBO (pyrolysis bio-oil), considerado una mezcla compleja de componentes derivado de la despolimerización de la celulosa, hemicelulosa y lignina. El líquido obtenido, es menos nocivo con el medio ambiente y con unos aditivos específicos, sirve para la preservación de madera maciza, tableros u otros materiales a base de celulosa, preferiblemente con el sistema de impregnación vacío/presión a temperatura ambiente bajo ciertos parámetros, acompañado de procesos de secado y curado, que garantiza la protección de los productos de agentes de deterioro biológicos y del medioambiente (Heeres y Swager, 2022).

El licor negro es un subproducto del proceso para la obtención del papel Kraft y pasta de celulosa, de este se extrae el *Tall oil*, un aceite de fuente renovable de bajo costo, compuesto por una complejidad de ácidos grasos, alcoholes grasos, ácidos resínicos, esteroides insaponificables, esteroides y otros derivados de hidrocarburos alquílicos. Este aceite generado industrialmente, puede ser utilizado como preservante para la madera, presentando efecto hidrofóbico al reducir la absorción de agua en la albura de pino, y para mejorar la acción se mezcla con aceite de linaza (Teaca et al., 2019). Según los autores Temiz et al. (2008), citados por Dias y Barreiros (2018), la combinación de ácido bórico en una proporción de 2% con derivativo *Tall oil* al 90%, tiene el efecto de repeler el agua y como fungicida presenta un mejor desempeño frente a la pudrición parda. Se ha indagado por el efecto en el medioambiente de la mezcla de este bio-aceite, al probar el efecto en aguas subterráneas preliminarmente mostró no ser tóxico resultado de la moderada biodegradabilidad (Dias y Barreiros, 2018).

Las cañas de guadua y de bambú son utilizadas principalmente como material de construcción conformando estructuras diversas. El hongo de pudrición parda *O. placenta* y de pudrición blanca *T. versicolor*, así como bacterias y termitas subterráneas, deterioran los culmos

sin tratamiento, en un lapso de dos a cinco años. Tratamientos recientes que han demostrado mejores resultados para este tipo de material, van desde los tratamientos con bioaceites derivados de la pirólisis de maderas, efluentes obtenidos de la industria del papel (*Tall oil*), la impregnación con ceras, el uso de ácidos orgánicos, la impregnación con hidrogel, el uso de complejos que reducen la lixiviación del boro, hasta la impregnación con nanopartículas (Kaur et al., 2016).

La nanotecnología desarrollada es capaz de proveer protección la madera contra los agentes de deterioro, al mismo tiempo que protección como retardante del fuego, al fijarse elementos o compuestos ignífugantes en el material leñoso. Las nanopartículas de cobre pueden ser sintetizadas usando los extractivos desde las hojas de neem (*A. indica*), pongamia (*Pongamia pinnata* (L.) Pierre) y lantana (*L. camara*), para formar nanopartículas de óxido de cobre (CuO-NPs) aplicadas a la preservación de la madera (Arpanaei et al., 2024). La síntesis de nanopartículas (<50 nm) de óxido de cobre (CuO) sintetizadas, utilizando el extractivo de las hojas de *L. camara*, forman una eficaz sinergia que sirve como preservante de madera, esta solución se probó *in vitro* como inhibidor fúngico resultando en una inhibición del 100% del hongo *T. hirsuta*, y de cerca del 35% en *O. placenta*, en una concentración del 10% en el medio (Shiny et al., 2019). Un método innovador es la aplicación de nanomateriales como coberturas o como portadoras de bioactivos, los aceites esenciales de varias clases de tomillo (*Thymus capitatus* L., *Thymus serpyllum* L. y *T. vulgaris*) encapsuladas en nanopartículas de lignina (LNPs), provenientes de una solución orgánica de madera de haya, sirvieron de aditivos antifúngicos, contra los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* y *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P.Kumm., y de pudrición parda *G. trabeum* y *Poria monticola* Murill. La preparación de los aceites esenciales osciló en una concentración de 5 – 17,3 mg/mL encapsulados en LNPs de 100 a 200 nm, estableciendo la CIM en 0,3 mg/mL (Zikeli et al., 2023).

**Tabla 6**

*Recopilación de Experimentos con Compuestos de Base Biológica que Inhiben Hongos de la Madera*

Fuente Vegetal Extraída	Tipo de Tecnología y Compuestos Mayoritarios	Especies Fúngicas Objetivo	Concentración Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Residuos celulósicos <i>Eucalyptus sp.</i>	Bioaceite pirólisis rápida: Siringilo, catecol, guayacol, eugenol (aldehídos, acetonas, hidroxilo)	<i>T. versicolor</i> <i>G. trabeum</i>	Carga al 50%	Vacío/ <i>Pinus taeda</i>	Lourencon et al. (2016)
Residuos maderas tratadas con creosota o pentaclorofenol	Bioaceite pirólisis rápida: 2-metoxi 4-metilfenol, ácido 3,4-dimetoxibenzoico, otros	<i>T. versicolor</i> <i>G. trabeum</i>	Fórmulas patentes	Vacío/ <i>Pinus sp.</i> <i>Populus sp.</i>	Freel y Graham (2002; 2008)
Aserrines de maderas o biomasa leñosa	Bioaceite pirólisis rápida: PBO + orgánico soluble en agua catalítica + acido o sal a base de minerales o sulfónicos	<i>C. puteana</i> , <i>C. versicolor</i> , <i>Poria placenta</i>	Fórmula patente FPBO	Vacío-presión Bethell/ <i>Pinus sp.</i> , tableros de <i>P. radiata</i>	Heeres y Swagger (2022)
Corteza <i>Betula pendula</i> , <i>Picea abies</i> Cañamo <i>Cannabis sativa</i>	Destilados químicos de pirólisis lenta: Acido propinoico, acido acético, ácido fórmico, metanol, hidroximetilfurfural, furfural	<i>C. puteana</i> <i>R. placenta</i> <i>G. trabeum</i>	1% (m/m)	No probado	Barbero et al. (2019)
Pilón, sietecueros, yema de huevo, <i>Cordia allidora</i>	Líquido piroleñoso: Alcoholes, acidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, alquitrán de madera,	<i>C. polyzona</i> <i>F. supina</i> <i>P. sanguineus</i> <i>Trametes villosa</i>	4,5% (v/v)	No probado	Navas (2013)
<i>Populus tremula</i>	Líquido piroleñoso: Ácido acético, propiónico y fórmico	<i>C. puteana</i>	5% (m/m)	No probado	Barbero et al. (2021)

Fuente Vegetal Extraída	Tipo de Tecnología y Compuestos Mayoritarios	Especies Fúngicas Objetivo	Concentración Inhibitoria	Método Impregnación/ Especie de madera	Referencia
Hojas de <i>Lantana camara</i>	Nanopartículas de óxido de Cobre + extractivo natural	<i>T. versicolor</i> <i>O. placenta</i>	CIM= 10%	No probado	Shiny et al. (2019)
Bioactivos de: <i>Thymus vulgaris</i> <i>T. serpyllum</i> <i>T. capitatus</i>	Nanopartículas de lignina + aceites esenciales de tomillo: carvacrol, timol, p- cimeno	<i>T. versicolor</i> <i>P. ostreatus</i> <i>G. trabeum</i> <i>Poria monticola</i>	CIM= 300 µg/ml*	No probado	Zikeli et al. (2023)

*Nota.* \*Unidades de equivalencia

### **Análisis de Caso: los Biopreservantes como Alternativa Sostenible en el Inmunizado de Maderas**

Con base en los estudios científicos y documentos de información institucional y técnica, en esta sección se desarrollan ejemplos principalmente de variables técnico-ambientales a tener en cuenta, con miras al uso de biopreservantes para madera en la ciudad de Bogotá, y por extensión para Colombia (Figura 4). Esto aunado a que existe una evaluación de alternativas de producción más limpia a implementar en el subsector de inmunizado de maderas para mitigar el impacto de los insumos y residuos peligrosos. La primera alternativa considerada la más idónea según el contexto presentado, es el cambio de inmunizantes por otros menos tóxicos, conllevaría a criterios de inversión y capacitación de mediano impacto económico, con un riesgo tecnológico medio en donde las medidas están en fase de estudio o investigación y con un potencial de mitigación alto, que reduce notablemente los impactos generados. Mientras tanto, una segunda alternativa, corresponde al cambio de técnica de inmunización o un cambio tecnológico en la protección de la madera (p. ej. modificación química o térmica), que traería altos costos económicos, necesidad de capacitación de mediano impacto, riesgo tecnológico puntual con

algún riesgo técnico y un potencial de mitigación medio, que reduce moderadamente los impactos ambientales generados (DAMA, 2003).

Los desperdicios del aprovechamiento de la madera que quedan del apeo y aserrado, y de la industria de la madera, son considerados residuos forestales como cortezas, astillas, recortes, nudos, bolillos (duramen de trozas para chapas) e incluso las ramas, que si se reaprovechan pueden ser fuente de extractivos naturales para elaboración de biopreservantes (Barbero et al., 2019; Vek et al., 2021; Pipíska et al., 2021). Otra fuente de biopreservantes son los productos forestales no maderables (PFNM) como gomas, resinas, aceites esenciales, latex, oleorresinas, entre otros. Estos productos han sido considerados de interés mundial, debido a la preocupación generalizada en torno al medioambiente, siendo importantes en proyectos de conservación y desarrollo para las comunidades aledañas, proviniendo no sólo de bosques naturales, sino de otras áreas forestales y de árboles aislados (López, 2008). Los productos forestales no maderables tienen gran potencial para innovaciones debido a su diversidad, además ofrecen oportunidades de aprovechamiento en el contexto de la bioeconomía (FAO, 2024). El uso de biopreservantes no ha sido suficientemente promocionado por el mercado y la aplicación generalizada aún es incipiente en el subsector de preservación de la madera, entonces se necesitan más esfuerzos para viabilizar el comercio de esta clase de preservantes de madera (Changotra et al., 2024). La asociación con otras áreas interesadas en las propiedades antifúngicas de los compuestos derivados de las plantas como la alimentaria, agrícola o la medicina, podrían bajar los costos de producción y hacer atractiva la producción de biopreservantes en el mercado (Broda, 2020).

Son pocas las investigaciones consultadas que hacen pruebas de ecotoxicidad aguda, Barbero et al. (2021) hicieron estas pruebas a los preservantes y los lixiviados de madera según

el estándar ISO 21338:2010. El tanino Colatán GT10 analizado, presentó baja toxicidad si se compara con un preservante convencional a base de Cu, sin embargo, el lixiviado de la madera tiene trazas de metales como el Pb, Sr y Ba, mientras los líquidos piroleñosos tuvieron menores niveles de metales convencionales y los ácidos orgánicos presentaron la menor toxicidad en las pruebas. Liu et al. (2024) realizaron la prueba de ecotoxicidad aguda utilizando el valor de concentración efectiva media ( $EC_{50}$ ) de la prueba de algas, al extractivo de los residuos de tabaco clasificándolo como no dañino. Siguiendo el estándar ISO 11348-3:2007 se evaluó el efecto inhibitorio de los extractos de residuos de tabaco sobre la emisión de bioluminiscencia de *Aliivibrio fischeri*. El grupo de control empleó un preservante comercial a base de cobre, hayando que el compuesto ensayado tiene una tasa significativamente menor de ecotoxicidad. Ambas investigaciones coinciden en afirmar que no es posible por medio de la prueba de ecotoxicidad hecha en el laboratorio, demostrar todos los efectos ambientales de un compuesto, como las posibles sinergias con otros químicos al estar en el medioambiente, sin embargo, parte del avance para una sostenibilidad ambiental de estos productos radica en examinar los compuestos (Barbero et al., 2021; Liu et al., 2024). Entre los riesgos que entraña el uso de nanomateriales sobre todo las nanopartículas metálicas, está su acumulación en el suelo como sedimento cuando las maderas son dispuestas en el medio ambiente y riesgos en la salud humana por la posibilidad de aspirar estas nanopartículas por parte de los consumidores de maderas tratadas; la nanotecnología necesita de regulaciones y fundamentos científicos para ser segura en el ambiente y para la salud humana ya que los nanomateriales pueden penetrar barreras biológicas fácilmente e interactuar con biomoléculas, causando cambios funcionales o estructurales perjudiciales (Teng et al., 2018; Arpanaei et al., 2024; Calovi et al., 2024).

Las diferencias entre las pruebas de laboratorio y el desempeño en campo de un determinado producto ensayado por sus cualidades como biopreservante, hace que se requiera establecer estándares para definir la composición y modo de aplicación del producto (Teaca et al.; 2019 Broda, 2020). Por ejemplo Vek et al. (2020) no mostraron resultados de inhibición positivos al ensayar pruebas *in vitro* para los extractos de acacia negra (*R. pseudoacacia*) cuando evaluaron la inhibición del crecimiento de los hongos de pudrición, mientras que al hacer pruebas de resistencia a la pudrición en probetas de madera de las especies pino y haya, impregnadas con los extractivos de acacia negra y de pino de escocia, resultó en compuestos capaces de reducir desde del 8%, al 6% en promedio la pérdida de masa por la pudrición blanca y siendo más significativa la reducción en la pudrición parda, al pasar del 16% al 3% en promedio. Un desafío en el uso de biopreservantes como extractivos vegetales o aceites esenciales es la limitación, debido a que son fácilmente lixiviables y solubilizados por el agua, para ello la combinación de varios materiales y técnicas puede desarrollar coberturas con multifuncionalidad que actúen sinérgicamente en la preservación de la madera (Cai et al., 2020). Las tecnologías integradas se hacen necesarias para que un biopreservante sea durable en el tiempo en aspectos como resistir la variación volumétrica natural de la madera sin que se cuartee y baja tasa de degradación cuando hay exposición prolongada a los rayos UV (Goodell et al., 2020).

El grado de impregnación de un determinado biopreservante en las maderas es un aspecto crucial para propender por su uso, depende del tipo de madera y la especie botánica. Existen diferencias entre las coníferas o softwoods que son en general maderas de fibra larga y no porosas, y las latifoliadas (conocidas generalmente como hardwoods) donde el parénquima presenta fibras cortas y más porosidad (Martínez, 2009; Pacini et al. 2019). La absorción de un

producto depende si se aplica en la albura o en el duramen de la madera, es en este último donde se acumulan los extractivos y componentes fenólicos y presenta células inertes que dificultan la impregnación; mientras que en la albura al haber desplazamiento de líquidos y ser la parte viva de la madera, la hace más susceptible al ataque fúngico (Dhiman y Dutt, 2018), pero a la vez de más fácil impregnación. También los tamaños de los poros en la madera son distintos dependiendo la especie, por ejemplo, Cesprini et al. (2022) observaron que la conducción de elementos en las maderas duras como el haya, permiten la conducción longitudinal en las células de los vasos al tener forma de tubos; mientras que las traqueidas de las maderas blandas como picea están conectadas solo por punteaduras. En el haya los poros son de alrededor 50 micras ( $\mu\text{m}$ ) de diámetro y en picea el diámetro medio de las traqueidas es de 30  $\mu\text{m}$ . Vek et al. (2020) observaron que la albura es la parte de la madera que más retiene los extractivos, usando el método de vacío-presión. El pino de escocia es una madera blanda que presentó mejor absorción al cubrir las paredes de traqueidas y parénquima. El haya es una latifoliada de madera semidura, donde el extractivo cubrió las paredes celulares de los vasos, fibras y parénquima. Los investigadores Simunková et al. (2021) catalogaron a la madera de *Picea abies* como de buena relación resistencia-densidad, al usarse ampliamente el duramen con propósitos estructurales y probaron que fue de difícil impregnación con el preparado de cafeína, mientras el pino de escocia fue más fácilmente impregnable. Tran-Ly et al. (2022) compararon la eficacia de absorción al tratar la madera de nogal con el aceite esenciales de linaza, observando que la tasa de absorción es equiparable con la madera de haya y algo menor con respecto a las maderas de pino y picea, esto debido a que las primeras son maderas de duramen de densidad mayor, mientras que las coníferas son maderas de albura.

Dentro de las propiedades físicas de la madera, los grupos hidroxilo son los responsables de darle la propiedad de higroscopicidad a la pared celular. La madera al secarse y quedar estabilizada, elimina el agua libre alcanzando la humedad de equilibrio higroscópico con el ambiente en que se encuentra. En cuanto a las propiedades mecánicas de la madera seca, un incremento en el contenido de humedad hace que la resistencia disminuya y aumente las deformaciones de largo plazo (Martínez, 2009; Pacini et al. 2019). Investigadores como Cai et al. (2020) expusieron probetas de madera de *P. taeda* a hongos de pudrición siguiendo el estándar AWWA E10-16, e incrementaron la concentración del biopreservante a 50% (m/v) para alcanzar parcialmente la inhibición fúngica, resultando en pérdida de resistencia a la compresión radial entre el 30 y 50%. No obstante, Simunková et al. (2021) mostraron que las probetas de picea y pino no tuvieron pérdidas significativas de resistencia a la compresión longitudinal ni del color de la madera, cuando se demostró el efecto de un preparado de cafeína por inmersión, en la obtención de inhibición fúngica y también de toxicidad en termitas. Cesprini et al. (2022) al aplicar taninos en maderas de haya y picea, observaron que el desempeño de las propiedades mecánicas de la madera no se afecta significativamente, por el contrario mejoran, en el módulo de ruptura al aumentar la resistencia a la compresión y volverse la madera de picea más rígida, mientras en la madera de haya, el módulo de elasticidad extiende la región elástica y por ende la carga máxima, siendo una madera densa menos elástica que una madera liviana. El coeficiente de estabilidad dimensional de una madera está dado por la contracción tangencial-radial, entre más alto sea el coeficiente, la madera es menos estable, en esto Gupta et al. (2021) demostraron que la aplicación de extractivos de plantas, mejora la estabilidad dimensional (tangencial y radial) de la madera tratada con extractivo en éter de petróleo de especies de plantas de rápida proliferación, en probetas de madera seca de *L. coromandelica*. La madera puede aumentar la

densidad al tratarla con biopreservantes, por ejemplo, Lourencon et al. (2016) al aplicar bioaceite a la madera de pino, permitió el aumento de la densidad de la madera hasta un 78%, porque se impregnó la superficie interna de las traqueidas, cubriendo las punteaduras de la madera, sin alterar su estructura, y con el efecto de decrecimiento de la absorción de humedad.

La madera recién cortada tiene un contenido de humedad alto de más del 30% e incluso mayor a 100%, por lo tanto, los tratamientos previos a la madera tras el aprovechamiento de los árboles y el aserrado no deben superar las dos semanas, con el fin de evitar la aparición de hongos cromógenos del azulado de la madera como los del género *Ceratostomella* u otros, e insectos xilófagos que prosperan en ese rango de humedad. Los tratamientos a la madera verde incluyen el método de desplazamiento de savia (método Boucherie), el cual utiliza presión hidrostática recomendada para madera rolliza y se hace normalmente con compuesto de boro o cobre, o los métodos de difusión, de aspersion o pincelado (Martínez, 2009; Teng et al., 2018). Estos métodos al ser protecciones preventivas temporales y no requerir equipos especializados, pueden ser realizados en aserraderos y centros de acopio, apropiando equipos y utilizando biopreservantes en reemplazo de los compuestos tradicionales.

**Figura 4***Etapas en el Desarrollo de Biopreservantes para Madera*

*Nota.* Elaboración propia. La figura 4 representa, arriba los procesos involucrados encontrados en el estudio y abajo los aspectos a tener en cuenta como guías para el desarrollo de biopreservantes de la madera.

## Conclusiones

Los biopreservantes son productos promisorios para la protección de la madera, surgen debido a la necesidad de generar el reemplazo de los inmunizantes comúnmente utilizados dentro de la actividad de preservado de maderas y de reducir ostensiblemente la contaminación ambiental y el riesgo en la salud humana. Existen diferentes grados de desarrollo en las técnicas y métodos para la obtención de biopreservantes que van desde los aceites esenciales, extractos de plantas y extractivos de la madera, hasta la combinación de esas fuentes vegetales con otros compuestos obtenidos por medio de tecnologías recientes y que en general se caracterizan por tener menores impactos ambientales que los inmunizantes convencionales. La combinación de compuestos son formas prometedoras para disminuir la lixiviación de los bioproductos impregnados en la madera y aumentar la efectividad como preservantes.

Las investigaciones indagadas tuvieron en común que la mayoría de compuestos obtenidos son de origen vegetal y que fueron probados con el fin de inhibir los hongos, al ser estos organismos uno de los principales agentes biológicos que deterioran la madera. En este aspecto se observa que la mayoría de los biopreservantes presentan significativos avances según los resultados del laboratorio y algunos compuestos también han sido probados en campo con importantes resultados. No obstante, se observó que pocas de las investigaciones consultadas, hicieron pruebas de ecotoxicidad aguda de los compuestos extraídos.

En la revisión documental se encontró solo tres especies maderables objeto de ensayos con biopreservantes, que son de frecuente comercialización en Colombia. Corresponden a la madera de *Pinus caribaea* sometida al tratamiento de vacío-presión con extractivos del duramen de *H. serratifolius*, *C. paraense* y *T. grandis*, a la madera de la especie *Hevea brasiliensis* sometida a vacío-presión con un bioproducto extraído de residuos de tabaco, y a tableros de

*Pinus radiata* tratados con un bioaceite extraído por pirólisis rápida. También el estudio describió pruebas que investigadores hicieron a especies maderables que no obstante, siendo de poco comercio en el contexto local o nacional, su madera es utilizada de una u otra forma. Entre estas el samán (*Samanea saman*), impregnada con el extracto metanólico de hojas de neem (*Azadirachta indica*), probetas de *Acacia saligna* tratadas con el extractivo metanólico del duramen y corteza de tres especies leñosas, y la madera de la especie *Bombax ceiba* tratada con el extractivo de *Acorus calamus*. Por otro lado, las especies *Pinus sylvestris*, *Pinus rigida*, *Fagus sylvatica* y algunas otras maderas, son modelos recurrentes en las pruebas de laboratorio o de campo que se hace a un producto ensayado como biopreservante, siguiendo estándares europeos o norteamericanos. Estas especies son muy poco comercializadas a nivel nacional, y a pesar de que no se puede descartar que algún bioproducto ensayado como inhibidor fúngico, tenga un efecto similar en otra madera, es aconsejable hacer las pruebas correspondientes, debido a que cada especie maderable tiene propiedades particulares.

La industria de la madera en Bogotá y Colombia está utilizando gran porcentaje de madera de pino y eucalipto e importando tableros de madera. El país también cuenta con plantaciones comerciales de varias especies y además aún posee amplias áreas de bosque tropical con gran diversidad de maderas que asimismo son utilizadas por la industria. Aunado a lo anterior existe riqueza de productos forestales no maderables (PFNM) como potenciales fuentes de bioinsumos. Las anteriores ventajas son factores que deberían ser conducentes para que se dé el desarrollo de biopreservantes de madera, con la propensión de los actores involucrados en el sector maderero y cadena forestal.

## Recomendaciones

Al ser la madera un material de origen biológico que está expuesto a condiciones y variables de uso en múltiples desarrollos y actividades, y debido al viraje que la industria está presentando al utilizar maderas de medio y rápido crecimiento y maderas transformadas, se necesita de una protección eficiente y duradera para este tipo de material, requiriendo que los productos utilizados para su preservación se inserten en la bioeconomía.

El uso generalizado de los biopresevantes de madera se encuentra en progreso a nivel global, para que su implementación pueda llevarse a cabo, las líneas de investigación deben fortalecerse para investigar ventajas y desventajas de los diferentes productos y de su aplicación en las maderas, que den pautas de diferenciación para la eventual adopción por la industria de la madera y siempre y cuando los ensayos cobijen también maderas de frecuente comercialización en zonas tropicales, preferiblemente integrando estudios con variables como la consecución de fuentes físicas del bioproducto o insumos biológicos disponibles en el mercado.

Se observa que los biopreservantes si bien presentan aún dificultades para su implementación, Colombia al contar con una actividad económica importante en la industria de la madera y más allá del nivel tecnológico que posee el subsector de preservación de maderas, debe abogar por la utilización de los biopreservantes e ir en sintonía con la necesidad a nivel mundial de conservar eficazmente los recursos naturales reemplazando productos y procesos contaminantes.

### Referencias Bibliográficas

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2002). *Capítulo X Pentaclorofenol*. En: *Reconocimiento y Manejo de los Envenenamientos por Pesticidas*. (pp. 112-117).  
<https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/es-static/files/2015-09/documents/spch10.pdf>
- Alorbu C., Cai L. (2022). Fungal resistance and lechability of genipin-crosslinked chitosan treated wood. *Elsevier- International Biodeterioration & Biodegradation* 169, 105378.  
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105378>
- Arpanaei A., Fu Q., Singh T. (2024). Nanotechnology approaches towards biodeterioration-resistant wood: A review. *Elsevier. Journal of Bioresources and Bioproducts*, 9, 3-26.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.09.001>
- Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera. (2014). *Tratamientos curativos de la madera. Métodos de Tratamiento*. AITIM. España.  
[https://www.cscae.com/area\\_tecnica/aitim/enlaces/documentos/AITIM\\_Proteccion\\_curativa\\_madera\\_01.09.14.pdf](https://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/enlaces/documentos/AITIM_Proteccion_curativa_madera_01.09.14.pdf)
- Barbero L. A., Ochoa R. A., López G. Y., Vilppo T., Venalainen M., Lavola A., Julkunen T. R., Haalapa A. (2018). Activity of Spent Coffe Ground Cinnamates against Wood-decaying Fungi in vitro. *BioResources* 13 (3): 6555-6564. DOI: 10.15376/biores.13.3.6555-6564
- Barbero L. A., Chibily S., Tomppo L., Salami A., Ancin M. F. J., Venalainen M., Lappalainen R., Haapala A. (2019). Pyrolysis distillates from tree bark and fibre hemp inhibit the growth of wood decay fungi. *Elsevier- Industrial Crops & Products* 129, 604-610.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.049>

- Barbero L. A., Akkanen J., Lappalainen R., Peraniemi S., Haapala A. (2021). Bio-based wood preservatives: Their efficiency, leaching and ecotoxicity compared to a commercial wood preservative. *Elsevier. Science of the Total Environment. Volume 753, 20 Jan. 142013*.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142013>
- Barotto A. J. (2021). Extracción verde de aceites esenciales. *Revista Electrónica Investigación Joven 8 (2)*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/140964>
- Blanco E., Alfaro J. (2014). Chemical Modification of *Calophyllum brasiliense* Cambess. Aan *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. Wood. *Colombia Forestal, Vol. 17 (1)*. 125-132. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/4905/8768>
- Becerra J. E., Silva L. J. (2012). *Silvicultura de plantaciones forestales y mejoramiento genético*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. ISBN: 978-958-8723-60-0.
- Beck G., Hegnar O.A., Fossdal C.G., Alfredsen G. (2018). Acetylation of *Pinus radiata* delays hydrolytic depolymerisation by the brown-rot fungus *Rhodonia placenta*. *Elsevier-International Biodeterioration & Biodegradation 135*, 39-52.  
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.09.003>
- Briceño A., Encinas O., Mohali C., Mora N., Molina Y. (2010). Biopreservantes contra el manchado azul de la madera de pino caribe. *Revista Forestal Venezolana, Año XLII, Volumen 52(2) Julio-Diciembre*, pp. 143-148.  
<http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/30280>
- Broda M. (2020). Natural Compounds for Wood Protection against Fungi—A Review. *Molecules, 25*, 3538. doi:10.3390/molecules25153538
- Cai L., Lim H., Nicholas D. D., Kim Y. (2020). Bio-based preservative using methyl- $\beta$ -cyclodextrin - essential oil complexes for wood protection. *Elsevier. International*

- Journal of Biological Macromolecules*. Volume 147, 15 Mar. Pages 420-427.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813019381061>
- Calovi M., Zanardi A., Rossi S. (2024). Recent Advances in Bio-Based Wood Protective Systems: A Comprehensive Review. *Applied Sciences* 14, 736.  
<https://doi.org/10.3390/app14020736>
- Cepero de García, M., Restrepo S., Franco A., Cárdenas M., Vargas N. (2012). *Biología de Hongos*. Bogotá, D.C., Colombia: Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias.  
<https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/ereader/unad/69414>
- Cesprini E., Baccini R., Urso T., Zanetti M., Tondi G. (2022). Quebracho-Based Wood Preservatives: Effect of Concentration and Hardener on Timber Properties. *Coatings* 12, 568. <https://doi.org/10.3390/coatings12050568>
- Changotra R., Rajput H., Liu B., Murray G., He Q. S. (2024). Occurrence, fate and potential impacts of wood preservatives in the environment: Challenges and environmentally friendly solutions. *Elsevier- Chemosphere* 352, 141291.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141291>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe -CEPAL. (2019). *ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles en América Latina y el Caribe*. Tercera reunión del Foro de los países de América Latina y el Caribe sobre el Desarrollo Sostenible. Santiago 24 al 26 de abril de 2019.  
[https://www.cepal.org/sites/default/files/static/files/ods12\\_c1900731\\_press.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/static/files/ods12_c1900731_press.pdf)
- Cruz de León, J. (2010). *Manual para la protección contra el deterioro de la madera*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Mexico.  
<https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Proteccion-Madera.pdf>

Departamento Administrativo del Medio Ambiente DAMA. (2003). *Formulación de Estrategias de Producción Más Limpia para el Manejo de la Problemática Ambiental del Sector Industrias Forestales en Jurisdicción (DAMA) Hoy SDA*. Centro de documentación Secretaría Distrital de Ambiente-SDA.

Departamento Administrativo del Medio Ambiente DAMA. (2004). *Guía ambiental para el sector de muebles de madera*. Centro de documentación Secretaría Distrital de Ambiente-SDA.

Dias B. K., Barreiros M. R. (2018). Preservantes para madeiras de rápido crescimento -Uma Revisao. *Periódico Tche Química Vol. 15 No. 30*.  
[https://www.academia.edu/download/85407737/244\\_Periodico30.pdf](https://www.academia.edu/download/85407737/244_Periodico30.pdf)

Dhiman B., Dutt B. (2018). Evaluation of *Acorus calamus L.* rhizome extract as a bio preservative against wood fungal decay. *Journal of Applied and Natural Science 10 (1): 37-40*. ISSN: 0974-9411 (Print), 2231-5209 (Online) | [journals.ansfoundation.org](http://journals.ansfoundation.org)

Fang S., Feng X., Lei Y., Chen Z., Yan L. (2021). Improvement of wood decay resistance with cinnamaldehyde chitosan emulsion. *Elsevier- Industrial Crops & Products 160, 113118*.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113118>

FAO. (2023). *Towards more resilient and diverse planted forests*. Unasylva, No. 254 – Vol. 74 2023/1. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc8584en>

FAO. (2024a). *El estado de los bosques del mundo 2024: Innovaciones en el sector forestal para lograr un futuro más sostenible*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cd1211es>

FAO. (2024b). *Global forest products facts and figures 2023*. Rome.  
<https://doi.org/10.4060/cd3650en>

- Fidah A., Salhi N., Rahouti M., Kabouchi B., Ziani M., Aberchane M., Famiri A. (2016). Natural Durability of *Cedrus atlantica* Wood Related to the Bioactivity of its Essential Oil Against Wood Decaying Fungi. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 18 (4): 567- 576. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000049
- Freel B., Graham R. G. (2000). *Bio-oil preservatives*. (International patent No. WO 00/25996). World Intellectual Property Organization. International Bureau.  
<https://patentscope.wipo.int/search/docs2/pct/WO2000025996/>
- Freel B., Graham R. G. (2008). *Bio-aceites utilizados como preservativos*. (Patente España No. ES 2 289 827 T3). Oficina Española de Patentes y Marcas.  
[https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=ES5719864&\\_cid=P21-M8S4ZI-09707-1](https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=ES5719864&_cid=P21-M8S4ZI-09707-1)
- González L. R., Rosales C. M., Rocha G. N., Gallegos I. J., Moreno J. M., Karchesy J. (2015). Wood preservation using natural products. *Madera y Bosques*. Vol. 21, num. especial: 63-73 <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21nspe/v21nspea5.pdf>
- Gómez L. H, González U., Yepes F. A, García G. A. (2006). *Aplicación de aditivos, químicos e inmunizantes para el tratamiento de partes y elementos*. SENA, Centro de industria y Construcción.[https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/1146/aplicacion\\_aditivos.pdf?sequence=1](https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/1146/aplicacion_aditivos.pdf?sequence=1)
- Goncalves D., Rocco, F. A. (2020). Bosque (Valdivia), SciELO-Chile. Deterioro y preservación de maderas mediante el uso de preservadores naturales de potencial interés en Brasil. *BOSQUE* 41(3), 213-220.  
[https://www.researchgate.net/publication/347859111\\_Deterioro\\_y\\_preservacion\\_de\\_maderas\\_mediante\\_el\\_uso\\_de\\_preservadores\\_naturales\\_de\\_potencial\\_interes\\_en\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/347859111_Deterioro_y_preservacion_de_maderas_mediante_el_uso_de_preservadores_naturales_de_potencial_interes_en_Brasil)

- Goodell B., Winandy J. E., Morrell J. J. (2020). Fungal Degradation of Wood: Emerging Data, New Insights and Changing Perceptions. *Coatings*, 10, 1210.  
doi:10.3390/coatings10121210
- Gupta H., Sharma K. R., Sharma J. N. (2021). Economically Feasible Wood Biopreservation Platform in *Lannea coromandelica* (Houtt.) Merr. Against Wood Rotting Fungus Through Bio-Prospecting Weed Extracts. *Frontiers in Plant Science*, volume 12, article 696747.  
doi: 10.3389/fpls.2021.696747
- Hassan E. B., El-Giar E. M., Steele P. (2016). Evaluation of the antioxidant activities of different bio-oils and their phenolic distilled fractions for wood preservation. *Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation. Volume 110, May*. Pages 121-128.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830516300841>
- Haug E., Ruiz D., Raffaelli N., Saparrat M., Romanelli G. (2019). Síntesis de cinamato de metilo, a través de un procedimiento de bajo impacto ambiental, y evaluación de su actividad antifúngica como potencial preservante de maderas. *Ciencia en Desarrollo, Vol. 10 No. 2*.  
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=142450032&lang=es&site=ehost-live>
- Heeres H., Swager H. J. (2022). *Pyrolysis Bio-oil in Preservative Formulations for Wood or Wood Derived Materials*. (International Patent No. WO 2022/268329 A1). World Intellectual Property Organization. International Bureau.  
<https://patentscope.wipo.int/search/docs2/pct/WO2022268329/>
- Hu J., Thevenon M. F., Palanti S., Tondi G. (2017). Tannin-caprolactam and Tannin-PEG formulations as outdoor wood preservatives: biological properties. *Annals of Forest Science* 74: 18. DOI 10.1007/s13595-016-0606-x

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2008). *Norma técnica colombiana NTC 4603*. Madera: Método de ensayo para la detección y estimación de la retención de preservativos de madera por bioensayos con *Aspergillus*. I.C.S.:71.100.50
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2002). *Norma técnica colombiana NTC 1149* (Primera actualización). Preservación de maderas. Terminología. I.C.S.:01.040.79; 79.020
- Jarvinen J., Ilgin H. E., Karjalainen M. (2022). Wood Preservation Practices and Future Outlook: Perspectives of Experts from Finland. *Forest*, 2022, 13, 1044.  
<https://doi.org/10.3390/f13071044>
- Kaur P. J., Satya S., Pant K. K., Naik S. N. (2016). Eco-Friendly Preservation of Bamboo species: Traditional to Modern Techniques. *BioResources*, 11 (4) 10604-10624.  
DOI:10.15376/biores.11.4.Kaur
- Kwaśniewska S. P., Cofta G., Nowak P. B. (2018). Resistance of fungal growth on Scots pine treated with caffeine. *Elsevier- International Biodeterioration & Biodegradation* 132, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.007>
- Liu L., Tian J., Zhou Z., Yang C., Yang S., Zhang K., Yang Y., Qiu J. (2024). Evaluation of the Potentials of Tobacco Waste Extract as Wood Preservatives against Wood Decay Fungi. *Forests* 15, 1274. <https://doi.org/10.3390/f15071274>
- Lourencon T.V., Mattos B.D., Cademartori P.G.H., Magalhaes W.L.E. (2016). Bio-oil from from a fast pyrolysis pilot plant as antifungal and hydrophobic agent for wood preservation. *Elsevier- Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 122, 1-6.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2016.11.004>

- López G. M., Suarez, M.P., Sarmiento, S. G., Fonseca, J., Suarez, S. F., Ospitia, M. A., Rojas M. J. (1996). *Valoración del impacto Ambiental de la pequeña y mediana industria*. Departamento Administrativo del Medio Ambiente DAMA. Corporación para la investigación socioeconómica y tecnológica de Colombia-CINSET.
- López C. R. (2008). Productos forestales no maderables: Importancia e impacto de su aprovechamiento. *Colombia Forestal, V.11 No. 1. Nueva Época*, 215-231.  
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3029/4383>
- Mansour M.M.A., Salem M.Z.M. (2015). Evaluation of wood treated with some natural extracts and Paraloid B-72 against the fungus *Trichoderma harzianum*: Wood elemental composition, in-vitro and application evidence. *Elsevier- International Biodeterioration & Biodegradation 100*, 62-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.02.009>
- Martinez, M. U. (2017). *Preservación de la madera a través de la historia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Mexico. Tesis de grado.  
[http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMICH/7918/FITECMA-L-2017-0253.pdf?sequence=1](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/7918/FITECMA-L-2017-0253.pdf?sequence=1)
- Martínez René. P. (2009). *Protección y conservación de la madera*. Andavira Editora S. L. ISBN: 978-84-8408-534-8
- Meena R. K., Dutt B. (2024). Antifungal activities of plant extracts from *Acorus calamus* and *Parthenium hysterophorus* against decay fungi of wood. *Indian Phytopathology 77*, 475-482. <https://doi.org/10.1007/s42360-024-00744-y>
- Mena M. C., Morales R. C., Vargas V. I., Villalobos Q. B., Víquez M. V. (2023). Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos:

- pudrición parda y blanca. *Tecnología en marcha Vol 36, No. 1. Enero-marzo.*  
<https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5997>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR. (2024). *Boletín Estadístico Forestal Marzo 2024*. MinAgricultura. Bogotá D.C. <https://fedemaderas.org.co/boletin-estadistico-forestal-marzo-de-2024/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2015). *Uso y legalidad de la madera en Colombia- Análisis parcial*. MinAmbiente. ONF Andina. Bogotá D.C. ISBN: 978-958-8901-09-1
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016a). *Estudio de estimación y caracterización del consumo de madera en los sectores de vivienda y grandes obras de infraestructura*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente. ONF Andina. Bogotá D.C. ISBN: 978-958-8901-19-0
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016b). *Estimación y caracterización del consumo de madera en la industria del mueble y descripción de la industria de transformación de madera en Colombia*. ONF Andina. ISBN: 978-958-57238-1-8
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Guía para la compra responsable de madera en el sector de la construcción*. GGGI, CAMACOL, CCCS. ISBN: 978-628-7598-13-3
- Mohareb A. S. O., Badawy M. E. I., Abdelgaleil S. A. M. (2013). Antifungal activity of essential oils isolated from Egyptian plants against wood decay fungi. *J Wood Sci* 59: 499-505 18. DOI 10.1007/s10086-013-1361-3
- Momoh A., Oladunmoye M., Adebolu T. (2012). Evaluation of the Antimicrobial and Phytochemical Properties of Oil from Castor Seeds (*Ricinus communis* L.). *Bull. Environ.*

- Pharmacol. Life Sci.; Volume 1 [10].*  
<http://repository.elizadeuniversity.edu.ng/handle/20.500.12398/307>
- Navas, O., S. (2013). Evaluación fungicida y antitermítica preliminar del líquido piroleñoso. *Revista Tecnología En Marcha*, 16(3), pág. 12-30.  
[https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/1464](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1464)
- Ortega, S. E., Galván, L. S., García, F. I., Castrejón, P. G., Cano, L. E. (2019). *PREM de Medicina Interna*. Capacitación para el ENARM. <https://hdl.handle.net/11285/637370>
- Pacini J. C., Wainstein G., Iriso A. (2019). *Estructuras de madera*. Ediciones de la U. ISBN: 978-958-762-956-9
- Peng Y., Wang Y., Zhang R., Wang W., Cao J. (2021). Improvement of wood against UV weathering and decay by using plant origin substances: Tannin acid and tung oil. *Elsevier- Industrial Crops & Products* 168, 113606.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113606>
- Pipiska T., Cappellazzi J., Leavengood S., Kamke F. A., Presley G., Decký D. (2021). Utilization of the Western Juniper (*Juniperus occidentalis*) in Strandboards to Improve the Decay Resistance. *BioResources* 16 (2), 3886- 3894. DOI: 10.15376/biores.16.2.3886-3894
- Rahman M. A., Chowdhury M. H., Salam A., Ashaduzzaman S. Md. (2019). Development of eco-friendly wood preservative through neem leaves extract against wood decay fungus. *International Journal of Nature Sciences* 9 (2): 01-04.
- Riaño, M., Martínez, J. S., Sanchez, N. M., Acuña, K. (2014). *Boyacá Real La cadena productiva de la transformación de la madera y elaboración de muebles*. Alcaldía Mayor de Bogotá- Secretaría Distrital de Desarrollo Económico.

<https://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/industria/boyaca-real-la-cadena-productiva-de-la-transformacion-de-la-madera-y-la-elaboracion-de>

Salem M.Z.M., Zidan Y.E., Mansour M.M.A., El Hadidi N.M., Abo-Elgat W.A.A. (2016a).

Antifungal activities of two essential oils used in treatment of three commercial woods deteriorated by five common mold fungi. *Elsevier- International Biodeterioration & Biodegradation* 106, 88-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.0>

Salem M.Z.M., Zidan Y.E., El Hadidi N.M., Mansour M.M.A., Abo-Elgat W.A.A. (2016b).

Evaluation of usage three natural extracts applied to three commercial wood species against five common molds. *Elsevier- International Biodeterioration & Biodegradation* 110, 206-226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.028>

Salhi N., Fidah A., Rahouti M., Ismaili M. R., Kabouchi B., Famiri A. (2020). Preservative effect

of *Tetraclinis articulata* and *Cedrus atlantica* wood extractives against fungal decay. *Madera y Bosques Vol. 26, No. 3.* e2632093. doi: 10.21829/myb.2020.2632093

Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá. (2010). *Fichas técnicas de las maderas de frecuente comercialización en la jurisdicción de la Secretaría Distrital de Ambiente.* Centro de documentación -SDA. 222 p.

Shiny K. S., Sundararaj R., Mamatha N., Lingappa B. (2019). A New Approach to Wood

Protection: Preliminary Study of Biologically Synthesized Copper Oxide Nanoparticle Formulation as an Environmental Friendly Wood Protectant Against Decay Fungi and Termites. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 21 (3): 347-356. DOI: 10.4067/S0718-221X2019005000307

Simunková. K., Reinprecht L., Nabelková J., Hysek S., Kindl J., Boruvka V., Lisková T.,

Sobotník J., Pánek M. (2021). Caffeine - Perspective natural biocide for wood protection

- against decaying fungi and termites. *Elsevier: Journal of Cleaner Production* 304. 127110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127110>
- Singh A. P., Singh T. (2014). Biotechnological applications of wood-rotting fungi: A review. *Elsevier: Biomass and Bioenergy. Volume 62*. Pages 198 - 206. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.013>
- Teaca C.A., Rosu D., Mustata F., Rusu T., Rosu L., Rosca I., Varganici C. D. (2019). Natural Bio-Based Products for Wood Coating and Protection Against Degradation: A Review. *BioResources* 14(2) <https://www.researchgate.net/profile/Liliana-Rosu/publication/331035401>
- Teng T. J., Mat A. M. N., Sudesh K., Nemoikina A., Jalaludin Z., Ng E. P., Lee H. L. (2018). Conventional Technology and Nanotechnology in Wood Preservation: A Review. *BioResources* 13 (4), 9220-9252. DOI: 10.15376/biores.13.4.Teng
- Tran-Ly A. N., Heeb M., Kalac T., Schwarze F. W. M. R. (2022). Antimicrobial effect of fungal melanin in combination with plant oils for the treatment of wood. *Frontiers in Materials*. 9:915607. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.915607>
- Tuset, R., Duran, F. (1979). *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización (Aserrado, secado, preservación, descortezado, partículas)*. Editorial Hemisferio Sur.
- Valette N., Perrot T., Sormani R., Helhaye E., Morel-Rouhier M. (2017). Antifungal activities of Wood extractives. *Elsevier- Fungal Biology Reviews* 31, 113-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbr.2017.01.002>
- Vek V., Balzano A., Poljansek I., Humar M., Oven P. (2020). Improving Fungal Decay Resistance of Less Durable Sapwood by Impregnation with Scots Pine Knotwood and

- Black Locust Heartwood Hydrophilic Extractives with Antifungal or Antioxidant Properties. *Forest* 11, 1024. doi:10.3390/f11091024
- Velásquez, J., Rojas, L., Encinas, O. (2019). Extractivos del duramen de especies latifoliadas como preservantes en la madera de *Pinus caribaea* Morelet. *Colombia Forestal*, 22(2), 44-54. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/14115/14903>
- WWF Colombia. (2016). *Maderas de Colombia*. Red Global de Comercio Forestal-GFTN. <https://www.wwf.org.co/?213040/Maderas-de-Colombia>
- Wozniak M. (2022). Antifungal Agents in Wood Protection—A Review. *Molecules* 27, 6392. <https://doi.org/10.3390/molecules27196392>
- Xie Y., Wang Z., Huang Q., Zhang D. (2017). Antifungal activity of several essential oils and major components against wood-rot fungi. *Elsevier- Industrial Crops & Products* 108, 278-285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.041>
- Zhang Z., Yang T., Mi N., Wang Y., Li G., Wang L., Xie Y. (2016). Antifungal activity of monoterpenes against wood white-rot fungi. *Elsevier- International Biodeterioration & Biodegradation* 106, 157-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.018>
- Zikeli F., Vettraino A. M., Biscontri M., Bergamasco S., Palocci C., Humar M., Romagnoli M. (2023). Lignin Nanoparticles with Entrapped Thymus spp. Essential Oils for the Control of Wood-Rot Fungi. *Polymers*, 15, 2713. <https://doi.org/10.3390/polym15122713>