



UNIVERSIDAD MICHOCÁNA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

TESIS

“EVALUACIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA DEL ÁRBOL *Persea americana* PARA EL DESARROLLO DE PANELES”

Para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta:

Ing. María José Garfías Cázares

Director:

Dr. Pablo López Albarrán

Morelia, Michoacán, febrero del 2026

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
PALABRAS CLAVE: PODA, AGUACATE, BIOADHESIVO, TABLERO DE PARTÍCULAS, LIGNINA.	4
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
ANTECEDENTES	7
MARCO TEORICO.....	10
1. TABLEROS DE MADERA.....	10
2. TIPO DE TABLEROS DE MADERA	11
2.1. Tablero de contrachapado o triplay.....	11
2.2. Tablero de fibra	12
2.3. Tablero de partícula.....	12
2.4. Tablero OSB	13
3. PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL TABLERO DE PARTÍCULA	13
4. PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL TABLERO DE OSB	14
5. RESINAS UTILIZADAS DEN LA PRODUCCIÓN DE TABLEROS	15
5.1. Generalidades de las resinas urea formaldehído.....	15
5.2. Generalidades de las resinas fenol formaldehído	16
6. MÉTODOS EXPERIMENTADOS PARA LA REDUCIR LA EMISIÓN DE FORMALDEHÍDO.....	17
7. INTERACCIÓN DEL ADHESIVO CON EL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	18
8. GENERALIDADES DE LA MADERA DE <i>PERSEA AMERICANA</i>	23
HIPÓTESIS.....	24
JUSTIFICACIÓN	24
OBJETIVOS	24
OBJETIVO GENERAL.....	24
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
MATERIALES Y METODOS	25
1. MATERIALES.....	25
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1. <i>Análisis anatómico de la madera de Persea americana</i>	26
2.2. <i>Preparación de la partícula</i>	27
2.3. <i>Preparación del adhesivo</i>	28
2.3.1. Preparación del fenol formaldehído	28
2.3.2. Preparación de la urea formaldehído	29
2.3.3. Preparación de lignina fenol	29
2.4. <i>Conformación de los tableros</i>	30
2.5. <i>Evaluación física-mecánica del tablero</i>	32
2.5.1. Determinación de la densidad normal.....	32
2.5.2. Determinación de absorción de agua	33
2.5.3. Determinación de hinchamiento de espesor	33
2.5.4. Ensayos de flexión para MOR y MOE	34
RESULTADOS	35
1. ANÁLISIS ANATÓMICO DEL MATERIAL CELULÓSICO <i>PERSEA AMERICANA</i>	35
1.1. <i>Características organolépticas</i>	35
1.2. <i>Características macroscópicas y microscópicas</i>	36
2. PRUEBAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL TABLERO	39
2.1. <i>Densidad</i>	39

2.2. Absorción e hinchamiento.....	40
2.3. MOR y MOE	42
3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	44
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES.....	50
REFERENCIAS	51
ANEXOS	57

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Producción mundial de tableros de partículas durante 2022. Fuente: FAOSTAT.</i>	14
<i>Figura 2. Producción mundial de tableros OSB durante 2022. Fuente: FAOSTAT.</i>	15
<i>Figura 3. Mapa de localización del huerto "el cerrito de la joya". Fuente: (INEGI 2020).</i>	25
<i>Figura 4. Diagrama de las etapas realizadas en la metodología.</i>	26
<i>Figura 5. Cubos 2 x 2 x 2 Persea americana.</i>	27
<i>Figura 6. Ensayos para disociado.</i>	27
<i>Figura 7. Muestras anatómicas montadas.</i>	27
<i>Figura 8. Preparación de la partícula.</i>	28
<i>Figura 9. Preparación del adhesivo fenol formaldehído.</i>	29
<i>Figura 10. Conformación de los prototipos.</i>	31
<i>Figura 11. Corte transversal (A), corte radial (B) y corte tangencial (B).</i>	35
<i>Figura 12. Tabla de Munsell, identificación del color de la madera de Persea americana.</i>	36
<i>Figura 13. Muestra de madera de Persea americana</i>	36
<i>donde se observa el hilo entrecruzado.</i>	36
<i>Figura 15. Poro solitario a 40x.</i>	36
<i>Figura 14. Corte transversal, en el que se observa la porosidad difusa a 10x.</i>	36
<i>Figura 18. Sección parcial de vaso, puntuaciones areoladas en microscopio a 40x.</i>	37
<i>Figura 16. Elemento de vaso visto en microscopio a 10X.</i>	37
<i>Figura 17. vasos en corte tangencial en microscopio a 10X.</i>	37
<i>Figura 19. Corte tangencial, radios (A), vaso(B), a 10x.</i>	37
<i>Figura 20. Corte radial donde se observa campo de cruzamiento (A), elementos de vaso (B) y parénquima leñoso (C), a 10x.</i>	37
<i>Figura 21. Dimensiones de las fibras a 40x.</i>	38
<i>Figura 22. Fibras libriformes a 10x.</i>	38
<i>Figura 25. Célula oleífera (A). conducto gomífero (B) 10X.</i>	38
<i>Figura 24. Corte radial en el cual hay presencia de gomas a 10X.</i>	38
<i>Figura 23. Corte transversal donde se observan oleosas a 10X.</i>	38
<i>Figura 26. Comparación del porcentaje de absorción e hinchamiento en tableros evaluados según el tipo de adhesivo.</i>	41
<i>Figura 27. Comparación del MOR en los diferentes tableros evaluados.</i>	43
<i>Figura 28. Comparación del MOE en los diferentes tableros evaluados.</i>	43

LISTADO TABLAS

<i>Tabla 1. Especificaciones para elaborar los prototipos.</i>	30
<i>Tabla 2. Características de prensado</i>	31
<i>Tabla 3. Índices de calidad de pulpa para la especie Persea americana</i>	39
<i>Tabla 4. Densidad de tableros evaluados.</i>	39

Tabla 5. Porcentaje de absorción e hinchamiento de tableros evaluados.	40
Tabla 6. Valores de MOR y MOE de los tableros evaluados.	42
Tabla 7. ANOVA de un factor para las propiedades evaluadas (Media $\pm$ Desviación Estándar).	44
Tabla 8. Interpretación y proyección por cada propiedad evaluada.	46

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la biomasa lignocelulósica proveniente de las podas del árbol *Persea americana* para el desarrollo de tableros de partículas.

En México, particularmente en Michoacán, la expansión del cultivo de aguacate ha generado una cantidad significativa de residuos agroforestales derivados de la poda. Estos residuos, que actualmente presentan un bajo nivel de aprovechamiento, representan una fuente potencial de materia prima alternativa para la industria de tableros, contribuyendo a disminuir la presión sobre los recursos forestales tradicionales y promoviendo un enfoque de economía circular.

El estudio contempla el análisis anatómico de la madera, la preparación de partículas y la fabricación de prototipos utilizando diferentes formulaciones adhesivas: urea-formaldehído, fenol-formaldehído y una alternativa sustentable a base de lignina. Posteriormente, los tableros fueron evaluados mediante pruebas físico-mecánicas, determinando densidad, absorción de agua, hinchamiento en espesor, módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE).

Los resultados permiten comparar el desempeño de los adhesivos comerciales frente a una formulación sustentable, considerando no solo las propiedades mecánicas sino también la problemática ambiental asociada a la emisión de formaldehído. La hipótesis plantea que es factible desarrollar tableros con propiedades comparables a los comerciales empleando esta biomasa residual.

Esta investigación integra la perspectiva agrícola y forestal, proponiendo una alternativa tecnológica viable para el aprovechamiento de residuos de poda, fomentando el desarrollo de materiales de menor impacto ambiental y aportando conocimiento científico para la valorización de recursos lignocelulósicos en el estado de Michoacán.

Palabras clave: Poda, Aguacate, Bioadhesivo, Tablero de Partículas, Lignina.

ABSTRACT

The present research aims to evaluate the lignocellulosic biomass obtained from

pruning residues of the tree *Persea americana* for the development of particleboards. In Mexico, particularly in Michoacán, the expansion of avocado cultivation has generated a significant amount of agroforestry residues derived from pruning activities. These residues, which currently have a low level of utilization, represent a potential alternative raw material source for the particleboard industry, contributing to reducing pressure on traditional forest resources and promoting a circular economy approach. The study includes the anatomical analysis of the wood, particle preparation, and the manufacture of prototypes using different adhesive formulations: urea-formaldehyde, phenol-formaldehyde, and a sustainable lignin-based alternative. Subsequently, the boards were evaluated through physical and mechanical tests, determining density, water absorption, thickness swelling, modulus of rupture (MOR), and modulus of elasticity (MOE). The results allow for comparison between the performance of commercial adhesives and a sustainable formulation, considering not only mechanical properties but also the environmental issues associated with formaldehyde emissions. The hypothesis proposes that it is feasible to develop boards with properties comparable to commercial products by using this residual biomass. This research integrates both agricultural and forestry perspectives, proposing a viable technological alternative for the utilization of pruning residues, fostering the development of lower environmental impact materials, and contributing scientific knowledge toward the valorization of lignocellulosic resources in the state of Michoacán.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo los recursos naturales son aprovechados por el ser humano para satisfacer sus necesidades de subsistencia, tales como alimentación, salud y economía, éstos se han convertido en una fuente de vida y desarrollo para la población (Ivars, 2013). Cuando el hombre usa estos recursos no solo obtiene beneficios personales, sino que ayuda a que la población obtenga un mejor desarrollo local, que ha ido creciendo con el tiempo.

Los recursos naturales pueden considerarse importantes generadores de ingresos para una población, pero el poco conocimiento de la riqueza de estos conlleva a un escaso nivel de valoración, y deficiente manejo para su uso, por lo que genera un

impacto negativo al medio ambiente y al desarrollo del lugar (SNIGF, 2020).

La madera como recurso natural renovable ha formado un papel importante en el desarrollo tecnológico a lo largo de la historia. Las propiedades y características de la madera como material de construcción, es muy particular y única en comparación a otros materiales utilizados por el ser humano. La madera es un recurso que puede servir para proveer o cubrir necesidades esenciales, por ejemplo, desde ser utilizada como material combustible, hasta ser parte estructural de una vivienda. Debido a la explotación irracional de las fuentes naturales de este recurso en la actualidad se complica el abastecimiento. Es por esta razón que se debe impulsar el estudio de este material para ser utilizado de una forma sustentable (Elékou, 2019).

Como consecuencia del mal manejo forestal y antecediendo beneficios propios, nuestro capital natural ha sido afectado drásticamente provocando la degradación total o parcialmente de nuestro bosque, dicha problemática se ha derivado por el cambio de uso de suelo. Estudiar la magnitud, dinámica y causalidad de los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo es una tarea prioritaria ya que nuestro país está entre los países con mayor deforestación a nivel mundial; México perdió 93 091 ha de bosque primario, ubicándose entre los 10 países con mayores pérdidas a nivel mundial. Además, el 60 % de la pérdida fue causada por incendios (Industry Intelligence Inc., 2024).

Asimismo, en el transcurso de la última década, se han identificado aproximadamente 28 327 hectáreas de superficie originalmente forestal en Michoacán y Jalisco que han sido degradadas y transformadas en áreas de cultivo de *Persea americana* (aguacate) (Climate Rights International & Guardian Forestal, 2024). El incremento de plantaciones de *Persea americana* se debe a la creciente demanda de su fruto, el cual se exporta a 26 países, que en conjunto consumen más de 1.7 mil millones de toneladas. Se estima que para el año 2030, la producción nacional de aguacate podría incrementarse de 1.89 a 3.16 mil millones de toneladas (SAGARPA, 2017), lo que evidencia la expansión de la superficie cultivada.

En huertos de aguacate, particularmente de Michoacán, la poda es una práctica indispensable para el manejo del cultivo, la cual genera residuos leñosos con potencial de aprovechamiento. Considerando que la poda representa

aproximadamente un 10 % del crecimiento anual, se estima una generación de 4.75 a 7.36 m³ de material lignocelulósico por hectárea y por año, considerando una densidad aproximada de 125 a 175 árboles por hectárea (Tauro et al., 2024).

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el estado de Michoacán se encuentran registradas 186,713.13 hectáreas cultivadas con aguacate. Con base en esta superficie, el volumen anual potencial de material de poda se estima entre 0.89 y 1.37 millones de m³, lo que evidencia la disponibilidad significativa de biomasa residual y justifica su aprovechamiento como alternativa sostenible frente al uso de madera forestal convencional.

Por tal motivo, se propone desarrollar un tablero de partícula de *Persea americana*, con el objetivo de evaluar sus propiedades físico-mecánicas y determinar si los resultados obtenidos son significativos para así poder potencializar su uso en el ámbito de la carpintería, construcción y otros ámbitos. Este tablero se plantea considerando tanto la perspectiva forestal como la agrícola, ya que la integración de ambas lías permite lograr una compensación significativa en términos de manejo de recursos y aprovechamiento de la biomasa.

ANTECEDENTES

De acuerdo con la investigación documental realizada, se identificó una disponibilidad limitada de información relacionada con el uso de la especie en la fabricación de tableros. Sin embargo, hay estudios físicos-químicos de la madera, los que nos permiten conocer el comportamiento de nuestra materia prima. Respecto a las propiedades tecnológicas de la madera de aguacate, Rogel (1982) reporta un estudio sobre las características anatómicas de la madera de *Persea americana* y señala algunos usos potenciales de la madera.

Por su parte, Martínez-Pinillos y Martínez (1996) también la incluyen en su estudio de comportamiento al cepillado y lijado de 33 especies, reportando su comportamiento como excelente al cepillado con un ángulo de navajas de 30°, regular a 25° y bueno a 20°. Su comportamiento al lijado lo califican como excelente con lija de grano 100 y muy pobre para los granos de 80 y 60. A su vez, se presenta un estudio sobre el comportamiento higroscópico, calificándola como moderadamente estable de acuerdo con la anisotropía de la contracción y de una

densidad anhidra promedio de 0.527 g/cm³.

Tamarit (1996) la incluye dentro de la evaluación de índices de calidad de pulpa de 132 especies de madera, clasificándola de acuerdo con la relación de Runkel como excelente.

Fuentes-Talavera et al. (1998) presentan un estudio sobre el comportamiento higroscópico, calificándola como moderadamente estable de acuerdo con la anisotropía de la contracción y de una densidad anhidra promedio de 0.52cm³.

Pennington y Sarukhan (1998) hicieron la descripción de las características anatómicas microscópicas de *Persea americana*.

Guzmán et al. (1999) mencionan que la madera sólida puede ser utilizada para elaborar artesanías y artículos diversos de cortas dimensiones, que no estén sujetos a grandes esfuerzos de resistencia mecánica. A partir de sus relaciones morfológicas de las fibras de la madera de *Persea americana* provenientes de huertas, y en especial a la relación de Runkel, la calidad de pulpa resultante se ubica en la categoría de buena en general, pero con baja resistencia al rasgado.

Talavera et al. (2002) señala que la contracción total por secado (radial = 2.56 %, tangencial = 5.75 %) se ubica en muy pequeña para la dirección radial, y pequeña para la dirección tangencial.

Anzaldo et al. (2004) mencionan en un artículo publicado que la madera de aguacate *Persea americana* se utilice como materia prima para la fabricación de papel corrugado, dando a conocer un análisis químico de dicha madera.

Fuentes-Talavera et al. (2011) investigaron la resistencia y durabilidad de la madera de ramas de *Persea americana* (aguacate), la cual proviene de podas, mencionado que posee propiedades de resistencia en el rango bajo a medio, lo que limita en gran medida su utilización a aplicaciones no estructurales. También es altamente susceptible a la degradación biológica por hongos de descomposición y, por lo tanto, debe usarse solo en condiciones protegidas de cambios drásticos de humedad para garantizar un desempeño en servicio razonable proponiendo así que puede ser una materia prima para carpintería, objetos torneados, artesanía y artículos no expuestos a grandes esfuerzos y una alternativa razonable para maderas exóticas en otras regiones del mundo.

Cahyono et al. (2019) en su escrito "The durability of OSB composite plywood with avocado, mahogany, and pine wood veneers against drywood and subterranean termites" describe los resultados de la investigación, mostrando que la durabilidad del cumplimiento aumenta contra las termitas de la madera seca y del suelo (prueba del cementerio), respectivamente, en un 41.3% y un 71.58%. Esta investigación muestra que el tipo ME (chapa de caoba, adhesivo de isocianato) es el que tiene la mejor durabilidad contra los ataques de ambos agentes biológicos de descomposición.

Soria-González et al. (2022) publicaron un artículo el cual se denomina "Avocado Tree Pruning Pellets (*Persea americana* Mill.) for Energy Purposes: Characterization and Quality Evaluation" donde se analiza el potencial del aprovechamiento energético de las podas de aguacate como biocombustibles sólidos densificados, concluyendo que la biomasa clase B (ramas) puede ser utilizado como combustible sólido, presentando un alto poder calorífico (19,61 MJ/kg) y un bajo contenido de cenizas (1,2%). Mientras que la clase BAL (ramas y hojas) limita su uso debido a su alta concentraciones de N y S, y su elevado contenido de cenizas y presencia de elementos pesados, como Cd, Cu y Zn. Señalando que los pellets obtenidos de clase B cumplen con la mayoría de los requisitos de calidad analizados para su uso residencial, uso comercial e industrial, excepto durabilidad mecánica y densidad aparente, cuyos los valores están por debajo del límite mínimo.

Ngabea (2023) presenta "Effect of Particle Size and Filler Content on Mechanical Properties of Avocado Wood Flour-Low Density Polyethylene Composite" en el cual evalúa los efectos del tamaño de partícula y el contenido de relleno sobre las propiedades mecánicas del compuesto de polietileno de baja densidad y harina de madera de aguacate (AWF-LDPE) modificado con hidróxido de sodio y ácido acético (NaOH/CH₃COOH) utilizando la metodología de superficie de respuesta. Las propiedades de alargamiento fueron del 4.8768 %, una resistencia a la flexión de 41.2921 MPa, un módulo de flexión de 0.6614 GPa y una resistencia al impacto de 83.384 kg/m². El coeficiente de determinaciones (R²) estuvo cercano a la unidad con un error máximo de 0.09139%. Los valores obtenidos del compuesto AWF-LDPE en condiciones óptimas indicaron que es un material recomendado para tableros de

partículas en la parte interior de electrodomésticos y aplicaciones de automóviles. Ccallo y Salas (2024), desarrollaron un biocompuesto a partir del uso continuo de residuos de palpa (*Persea americana*) y aserrín procedente de las industrias frutícolas y madereras para su uso potencial como material alternativo a los tableros aglomerados. Los resultados de los ensayos físico-mecánicos, según la norma ASTM-D-1037, mostraron que el tablero con las mejores propiedades mecánicas en resistencia a la ruptura (25.24 MPa) fue el compuesto por 33.3% de semillas, 33.3 % de cáscaras y 33.3% de aserrín, sin tratamiento alcalino, con un 60% de resina en base al peso del residuo, tamaño de partícula entre 0 y 0.2 mm, presión de 300 PSI, temperatura de 110°C y tiempo de prensado de 15 minutos. Lo que lo posiciona como un producto alternativo a los tableros de partícula.

MARCO TEORICO

1. Tableros de madera

Un tablero o panel es un producto forestal, es decir, un elemento que se obtiene de la madera mediante algún proceso industrial y se presenta en forma de hojas, las cuales están constituidas por chapas, partículas o fibras. Existe una tendencia predominante en muchos países de América Latina para fabricar y usar cada vez más los tableros a base de madera, ya que se pueden utilizar para fines estructurales o decorativos. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) distingue tres tipos de tableros: los de madera contrachapada o triplay, los de fibra, los de partículas y el OSB (tablero de virutas largas y orientadas). De estos tipos solamente los contrachapados, los de partículas y el OSB pueden tener una aplicación estructural, ya que los tableros de fibra no tienen las propiedades requeridas para poder utilizarlos en la construcción. Cada tipo de tablero se distingue por sus características particulares, pero, en general, presentan grandes ventajas con respecto al uso de la madera aserrada. Algunas de estas ventajas son:

- a. Se eliminan o reducen los efectos de debilitamiento que se tienen en la madera aserrada, causados por nudos, desviación de la fibra u otros defectos.
- b. Debido a que se fabrican en dimensiones mayores que las obtenidas en piezas de madera aserrada, con ellos es posible cubrir con facilidad grandes

superficies.

c. Tienen una mejor estabilidad dimensional.

d. Reducen el desperdicio en su procesamiento, ya que se producen con material que en algunos aserraderos consideran que es material de desecho o de desperdicio.

e. Pueden diseñarse para satisfacer necesidades específicas, incorporando diversas sustancias o modificando convenientemente los tratamientos térmicos o mecánicos a los que pueden ser sometidos, con el fin de lograr elementos con determinadas características de resistencia al agua, al fuego, a la pudrición o a acciones mecánicas requeridas para aplicaciones estructurales.

f. Posibilita la utilización de especies de rápido crecimiento y de ciertas especies blandas y marginadas.

g. Reducen el desperdicio en su procesamiento, ya que se producen con material que en algunos aserraderos consideran que es material de desecho o de desperdicio.

Actualmente la fabricación de muchos tableros o paneles está basada en el empleo de materia prima en forma de desperdicios por residuos de otras manufacturas de madera y en la utilización de árboles más pequeños. Las dimensiones más comunes de estos tableros son de 1.22 m de ancho y 2.44 m de largo, con espesores de 9, 12, 16, 19 y 22 mm (Vignote et al., 2000).

2. Tipo de tableros de madera

2.1. Tablero de contrachapado o triplay

El contrachapado es un tablero de madera encolado con resinas sintéticas constituido de capas relativamente delgadas de chapa (0.5-5 mm) con el hilo de las capas adyacentes usualmente a un ángulo de 90°. Las capas varían en número, grosor, y grado, dependiendo de los requerimientos fin-uso.

Comparado con la madera sólida, las principales ventajas del contrachapado son: propiedades casi igual a lo largo y ancho del panel, resistencia más grande al rajado, y capacidad de fabricación en hojas grandes. Usando el contrachapado resulta una

mejor utilización de la madera, porque cubre áreas grandes con una mínima cantidad de material.

Las propiedades del contrachapado dependen de las especies de madera, de la calidad de la chapa, el orden de colocación de las capas en el panel, y el tipo de adhesivo utilizado, y por lo general, tienen buenas propiedades térmicas y acústicas, no se contrae ni alabea significativamente, Se utiliza para pisos, muros, techos, cimbra, puertas, muebles etc.

2.2. Tablero de fibra

Se define como el producto obtenido del entrecruzamiento de las fibras lignocelulósicas aglutinadas con la lignina contenida en las fibras o con la adición de otros aglutinantes orgánicos e inorgánicos, pudiendo elaborarse en una extensa gama de densidades y espesores (EGOAVIL & Gonzales, 2003). Las fábricas de tableros de fibras se alimentan de madera delgada y de baja calidad no apta para otras industrias y restos de otras industrias del aserrío, nunca de aserrín. Los tableros de fibras son un aglomerado de fibras de madera interconexionadas entre sí con un adhesivo y prensadas. Los tipos de tableros de fibras son:

- a. HDF (High Density Fibreboard) o tableros de fibras de alta densidad, tienen una densidad entre 850 kg/m^3 y 1200 kg/m^3 . Fabricados generalmente mediante el afieltrado al agua.
- b. DM o MDF (Medium Density Fibreboard) o tableros de fibras de media densidad, tienen una densidad entre 500 kg/m^3 y 850 kg/m^3 . Fabricados mediante el afieltrado en seco.
- c. LMF (Low Density Fibreboard) o tableros de fibras de baja densidad, tienen una densidad inferior a 500 kg/m^3 . Fabricados mediante el afieltrado en seco.

2.3. Tablero de partícula

Los tableros aglomerados o de partículas de madera se constituyen a partir de pequeñas virutas de madera encoladas a presión. Se fabrican diferentes tipos en función de la forma y del tamaño de las partículas, de su distribución en todo el tablero, así como por el tipo de aglutinante que se utiliza para unirlos. Estos materiales son estables y de consistencia uniforme. Estos tableros son materiales

planos formados por virutas y/o astillas de madera provenientes del residuo de aserraderos tales como el aserrín, virutas, hojuelas, o de algún otro material lignocelulósico como las cáscaras del arroz, el bagazo de caña, etc., que se unen por medio de resinas sintéticas termo endurecibles y polimerizadas, las cuales se prensan en caliente.

2.4. Tablero OSB

El tablero OSB o tablero de viruta orientada (oriented strand board) se obtiene encolando virutas de madera mientras se aplican unas condiciones de calor y presión determinadas. El tablero OSB recibe este nombre porque las virutas de las que está compuesto se orientan formando capas, ya que son de diferentes tamaños y espesores. De este modo, las virutas de la capa exterior quedan en sentido longitudinal, mientras que las virutas de capas más interiores se colocan tanto de forma perpendicular como longitudinal o paralelamente, creándose tres capas de virutas, o cinco en ocasiones. En la norma UNE-EN 300:2007 se recogen los términos y requisitos que se aplican para los tableros de virutas orientadas. Además, en ella quedan clasificados los tipos de tablero OSB que existen en función de las condiciones ambientales a las que se vaya a ver expuesto según el uso que vaya a tener:

Tablero OSB/1: Son adecuados para ambientes secos, por lo que se destinan principalmente a su uso en interior.

Tablero OSB/2: Son adecuados para ambientes secos y se emplean para uso estructural.

Tablero OSB/3: Son adecuados para ambientes húmedos y se emplean para uso estructural.

Tablero OSB/4: Son adecuados para ambientes húmedos y se usan como elementos estructurales de alta prestación.

3. Producción mundial del tablero de partícula

De acuerdo con los datos de FAOSTAT (2022), la producción mundial de tableros de partícula en ese año ascendió a 110,251,544 m³. Los principales productores, en orden de relevancia fueron: China, Federación de Rusia, Turquía, Alemania, Polonia, E.U., Tailandia, Brasil, Francia y España, tal como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Producción mundial de tableros de partículas durante 2022. Fuente: FAOSTAT.

Conforme a esta información, México se encuentra produciendo 754, 000 m³ de tablero de partículas, por lo cual contribuye al 0.68% de la producción total mundial, observando que no se encuentra en los primeros 10 productores, sin embargo, estas cifras detonan un crecimiento a través de los años ya que en el año 2018 México contribuía con el 0.14% de la elaboración global con una producción de 225.000 m³ (FAOSTAT, 2020).

4. Producción mundial del tablero de OSB

De acuerdo con los datos de FAOSTAT (2022), la producción mundial de tableros de OSB para ese año ascendió a 38,184,263 m³. En la figura 2 se muestran los principales productores, en orden de relevancia fueron: E.U., Canadá, China, Federación de Rusia, Alemania, Rumania, Polonia, Chequia, Letonia y Belarús.



Figura 2. Producción mundial de tableros OSB durante 2022. Fuente: FAOSTAT.

Según los datos registrados, se observa qué actualmente México no compite en este mercado, ya que presenta una producción nula de este producto.

5. Resinas utilizadas en la producción de tableros

En la fabricación de tableros de madera se utilizan diversas resinas adhesivas, seleccionadas en función del uso específico y de las propiedades requeridas para cada tipo de tablero. En la mayoría de la producción de madera laminada, se emplean adhesivos termoestables a base de resinas fenólicas. Las resinas de urea formaldehído (UF) y fenol formaldehído (FF) predominan en el mercado. Entre estas, la resina de urea formaldehído destaca por sus ventajas; posee buenas propiedades térmicas (no requiere altas temperaturas para su fraguado, presenta excelente capacidad de adhesión, no genera cambios de color durante el curado, tiene alta reactividad y es más económica en comparación con otras resinas (Salas, 2021).

5.1. Generalidades de las resinas urea formaldehído

Las resinas de urea formaldehído (UF) son una clase de polímeros de condensación, que se emplean como resinas sintéticas obtenidas a través de la reacción entre la urea y el formaldehído, que suele estar catalizada por cloruro de amonio (Sun et al., 2014). En la reacción entre la urea y el formaldehído para la producción de adhesivos, los factores críticos incluyen; la proporción molar de urea a formaldehído, la temperatura de la reacción y los valores de pH en los que se desarrolla el proceso. Estos factores son determinantes para el aumento del peso molecular de la resina para definir sus características finales (Flores, 2006).

Las principales ventajas de esta resina son:

- Costo reducido en comparación con otros adhesivos empleados en la industria de tableros.
- Rápida velocidad de curado, lo que permite una mayor producción de tableros de madera.
- Alta resistencia a microorganismos y abrasión.
- Transparencia y falta de color una vez curadas.
- Capacidad de fraguar a diversas temperaturas, ofreciendo un amplio rango de viscosidades y contenido de sólidos, lo que la hace adecuada para múltiples aplicaciones.

Aunque también presentan ciertas limitantes, como la baja resistencia a la humedad y la emisión de formaldehído durante y después del fraguado (Esteves, 2012).

5.2. Generalidades de las resinas fenol formaldehído

Los principales componentes de las resinas fenólicas son el fenol y el formaldehído, son las sustancias que deben polimerizarse para formar una estructura tridimensional. Estas son de uso comercial desde hace más tiempo que cualquier otro polímero sintético, exceptuando el nitrato de celulosa. Sus aplicaciones industriales se basan en las excelentes propiedades adhesivas y resistencia de unión de los fenólicos, estas tienen un olor característico que se intensifica al calentarlas. Los productos de resinas fenólicas se oscurecen con el tiempo, sobre todo expuestas a la luz solar, la radiación ultravioleta es la parte de la radiación solar principal responsable de la iniciación de procesos de degradación de polímeros (Velázquez et al., 2016).

A pesar de que se asocian algunos inconvenientes a este tipo de resina, su importancia para la industria maderera radica en sus numerosas ventajas. El desafío relacionado con la relación costo-rendimiento está estrechamente vinculado al precio de las materias primas, que en la mayoría de los casos son derivados de combustibles fósiles y pueden experimentar fluctuaciones significativas. Es relevante destacar, que según la ECHA (Agencia Europea de Sustancias Químicas), las emisiones del formaldehído son altamente volátiles y clasificadas como CMR (Cancerígeno

mutagénico neurotóxico).

Según (Tapia, 2007) menciona que sus propiedades principales son:

- Alta resistencia, rigidez y dureza.
- Según el material de refuerzo: alta tenacidad, aún en el frío.
- Baja tendencia al plasto deformación.
- Alta estabilidad de la forma al calor (+ 150 °C).
- Dificil flamabilidad.
- Propiedades de aislamiento eléctrico no tan buenas como con UF, factor de pérdida dieléctrica relativamente alto (0.3 a 0.5), por lo tanto, es apropiado para el precalentamiento.
- Resistente a los solventes orgánicos, aceites, grasas, gasolina, alcohol, benceno y agua.
- Olor característico.
- No autorizado para el contacto con alimentos.
- Resistencia a ambientes húmedos.

6. Métodos experimentados para la reducir la emisión de formaldehído

La principal limitación del uso de resinas de urea formaldehído en la industria de tableros de madera es la emisión de formaldehído. Por lo tanto, se han implementado diversas modificaciones para reducir las emisiones de formaldehído provenientes de los tableros. Liu et al. (2020), señala que entre estos factores se encuentran:

- Composición del endurecedor de la resina.
- Modificación de la resina por co-polimerización con otras resinas, adición de correctivos: aminas, amoniaco, bisulfito sódico, urea, entre otros.
- Las temperaturas y el tiempo de prensado.
- Disminuir la relación formaldehído/urea.
- Añadir materiales secuestrantes del formaldehído directamente a la mezcla de la resina o bien al tablero final.
- Cambiar a un sistema completamente diferente de fabricación de resinas

adhesivas.

7. Interacción del adhesivo con el material lignocelulósico

Se puede definir adhesivo como aquella sustancia que se aplica entre las superficies de dos materiales permitiendo una unión resistente a la separación. Denominamos sustrato a los materiales que pretendemos unir por mediación del adhesivo, y el conjunto de interacciones físicas y químicas que tiene lugar en la interfase adhesivo/sustrato recibe el nombre de adhesión.

Los adhesivos actúan como un puente entre las superficies de los sustratos, ya sean del mismo material o de materiales diferentes. El mecanismo de unión dependerá de dos factores principales (Anaguano, 2008):

- La fuerza de unión del adhesivo al sustrato o adhesión
- La fuerza interna del adhesivo o cohesión

La adhesión se puede definir como la atracción molecular ejercida entre las superficies de los cuerpos en contacto, mientras que la cohesión se entiende como la atracción molecular mediante la cual las partículas de un cuerpo se unen en toda su masa. Dicho de otra manera, la adhesión es cualquier proceso de atracción entre especies moleculares diferentes que entran en contacto directo de modo que el adhesivo se adhiere a la superficie o sustrato aplicado. Mientras que la cohesión es un proceso de atracción que ocurre entre moléculas similares, principalmente como resultado de los enlaces químicos formados entre los componentes individuales del adhesivo (Von, 2012).

Con el fin de profundizar en el concepto de adhesión es posible identificar dos tipos de fenómenos que tienen lugar en la interfase entre el adhesivo/sustrato, los de tipo físico y los del tipo químico.

a) Fenómenos físicos

- Modelo de adhesión mecánica
- Teoría de la difusión
- Teoría eléctrica

b) Fenómenos químicos

- Teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial

El modelo de adhesión mecánica es el primero y más antiguo de todos. En este modelo la adhesión se debe a un anclaje del polímero (adhesivo) en los poros y rugosidades superficiales del sustrato. La penetración del adhesivo en la orografía superficial del sustrato provoca que la zona de contacto real entre los dos materiales sea varias centenas de veces superior a la correspondiente a la superficie aparente de contacto. Por tanto, rugosidad y porosidad son factores favorables a la adhesión (Anaguano, 2008).

La teoría de la difusión plantea la adhesión como resultado de la Inter difusión de moléculas en las superficies de contacto, lo que genera una zona de transición entre el adhesivo y el adherente. Esta zona reemplaza la idea de una interfase delgada por la de una interfase densa o "interfase". El proceso se basa en la migración de cadenas poliméricas largas que son mutuamente solubles, y se limita principalmente a casos como la autoadhesión, la adhesión entre polímeros compatibles y ciertos tipos de soldadura termoplástica o con disolvente. Mientras que la teoría eléctrica compara el sistema adhesivo/sustrato a un condensador plano cuyas placas están constituidas por la doble capa eléctrica que se forma cuando dos materiales de naturaleza diferente se ponen en contacto, por ejemplo, un polímero y el vidrio (Comyn, 2006).

Por su parte la teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial explica muchas de las uniones adhesivas que se realizan habitualmente. En esta teoría estas fuerzas se denominan "fuerzas de humectación o mojabilidad" porque cuando se forma una unión adhesiva se pasa por una fase de contacto entre el líquido y el sólido, y este proceso es al fin y al cabo de mojado. En general, se distinguen diferentes tipos de fuerzas involucradas en el fenómeno:

Enlaces secundarios:

- Fuerzas de van der Waals.
- Puentes de hidrógeno.

Enlaces primarios:

- Enlace iónico.
- Enlace covalente.

A pesar de su debilidad relativa, los enlaces secundarios generan en la práctica uniones suficientemente fuertes, dado que la superficie que entra en juego es considerable. Los enlaces primarios mejoran la durabilidad de las adhesiones y suelen ser necesarios para la adhesión de materiales cerámicos y vidrio (Anaguano, 2008).

En el ámbito de la fabricación de tableros derivados material lignocelulósico, se busca la formación de enlaces covalentes entre el adhesivo y los componentes de la madera debido a la necesidad de obtener uniones altamente resistentes, estables y duraderas. Los adhesivos utilizados en la industria como urea formaldehído, fenol formaldehídos o sus derivados, están formulados con grupos funcionales capaces de reaccionar químicamente con los grupos hidroxilo presente en la madera, esta interacción da lugar a la formación de enlaces covalentes los cuales aseguran una adhesión solida a nivel molecular, superando así a la resistencia a la unión física (Wang et al., 2024).

Cuando consideramos *Persea americana* como sustrato, la cual posee los componentes típicos de la madera, celulosa, hemicelulosa y lignina la interacción del adhesivo con dicho material presenta una serie de particularidades las cuales se deben tener en cuenta en el contexto de su uso para la elaboración de paneles;

1. Preparación de la superficie y penetración del adhesivo.

La madera de *Persea americana* presenta una microestructura que incluye vasos, lúmenes celulares, fibras y poros. Para favorecer la adhesión mecánica, es relevante que el adhesivo sea capaz de penetrar la micro y macro porosidad del sustrato. Estudios recientes en adhesivos han mostrado que la penetración del adhesivo en los vasos y lúmenes constituye un factor clave para generar una interfaz resistente (Huang et al., 2023).

2. Humedad, mojabilidad y humectación del adhesivo sobre *Persea americana*.

El éxito de la adhesión depende de que el adhesivo moje adecuadamente la superficie del sustrato (teoría de mojado superficial). La madera de *Persea americana*, al igual que otras maderas, posee grupos hidroxilo libres en la superficie que pueden favorecer la formación de puentes de hidrógeno con el adhesivo, y también presenta cierta polaridad que permite la humectación. Los estudios recientes sobre bio-

adhesivos muestran que la compatibilidad de humectación entre adhesivo y sustrato es fundamental para favorecer la difusión, penetración y posterior reacción del adhesivo (Huang et al., 2023). Cuando la superficie de la madera es muy hidrófoba o tiene una película de extractivos, la mojabilidad disminuye y se compromete la adhesión, lo que podría ocurrir en esta madera por su alto contenido de extractivos. Por tanto, una limpieza superficial o pre-tratamiento de superficie facilitará la interacción adhesiva/sustrato.

3. Reacciones químicas adhesivo-madera: enlaces covalentes, puentes de hidrógeno y reticulación.

En la matriz lignocelulósica de la madera de *Persea americana*, la celulosa y la hemicelulosa presentan abundantes grupos hidroxilo ($-OH$) accesibles en la pared celular o en los sitios de contacto de superficie. Los adhesivos tradicionales como la urea formaldehído (UF) o fenol formaldehído (FF) pueden reaccionar con estos grupos hidroxilo, generando enlaces covalentes, lo que mejora la adhesión, la estabilidad frente a humedad y el envejecimiento (Deng et al., 2025). En la interacción madera-adhesivo de base celulosa, se ha observado que la adición de nanocelulosa mejora la reticulación del adhesivo UF, aumentando fuerza de unión y disminuyendo emisiones de formaldehído (Deng et al., 2025). Asimismo, las investigaciones que emplean lignina extraída (o modificada) para producir adhesivos para madera han resaltado que la interacción química incluye: ablandamiento de lignina, relleno de vasos, y entrecruzamiento de la lignina del adhesivo con la lignina de la pared celular del sustrato (Li et al., 2023).

En el caso de la madera de *Persea americana*, este mecanismo es igualmente aplicable: el adhesivo debe ser capaz de reaccionar (o al menos interactuar de forma fuerte) con los grupos hidroxilo del sustrato, formando puentes de hidrógeno, adhesión secundaria, y en lo posible, enlaces covalentes entre adhesivo y pared celular que mejoren la cohesión de la unión.

4. Interfase adhesivo/sustrato: combinación de mecanismos físico y químico.

En la producción de paneles derivados de madera de *Persea americana*, se integran tanto mecanismos físicos como químicos. El adhesivo penetra físicamente la superficie (adhesión mecánica), se moja y humecta (adsorción y mojado superficial),

y simultáneamente se producen interacciones químicas (puentes de hidrógeno, posiblemente enlaces covalentes). Estudios recientes lo presentan así: “la adhesión sostenible de madera con adhesivos de base biomasa implica penetración, ensamblaje de red y reticulación covalente en la interfase” (Huang et al., 2023).

Por tanto, al diseñar la unión del adhesivo con la madera de *Persea americana*, se debe considerar:

- Que la viscosidad del adhesivo permita buena penetración sin generar exceso de migración o vacíos.
- Que el tiempo de prensado caliente y la temperatura sean adecuados para permitir la reticulación química.
- Que la capa de adhesivo y la interfase resulten desnudas de micro-espacios o vacíos, lo que comprometería la adhesión mecánica.

5. Cohesión del adhesivo y durabilidad de la unión.

Si bien toda esta interacción adhesivo-sustrato es esencial para la adhesión, la cohesión interna del adhesivo (fuerza intrínseca del polímero o red reticulada) también es clave. Un adhesivo con buena penetración y reacción en la interfase, pero con baja cohesión interna fracasará. Las investigaciones sobre adhesivos modificados con nanocelulosa muestran que se obtiene una red interna más densa, con mejor estabilidad térmica y mayor fuerza de unión (Deng et al., 2025). Por tanto, al aplicar adhesivo en madera de *Persea americana*, se debe elegir formulaciones que aseguren tanto buena adhesión como óptima cohesión, para que la unión sea estable en condiciones de uso (humedad, temperatura) del panel.

6. Tendencias recientes hacia adhesivos de base biomásica.

Más allá de la formulación tradicional con urea formaldehído o fenol formaldehído, la literatura reciente está orientada hacia adhesivos en los que la biomasa lignocelulósica misma (celulosa, lignina, hemicelulosa) se utilice como parte del adhesivo. Por ejemplo, se logró producir adhesivos a partir de lignina ligeramente condensada que, al aplicarse sobre madera, rellenaban los vasos, se ablandaban en agua y generaban paneles con desempeño competitivo (Li et al., 2023).

En resumen, la interacción del adhesivo con el material lignocelulósico (*Persea americana*) se basa en una combinación de mecanismos físicos (penetración, anclaje

mecánico, mojado) y mecanismos químicos (puentes de hidrógeno, reacciones covalentes con grupos hidroxilo de la madera, reticulación del adhesivo). Para el desarrollo de paneles derivados de esta biomasa lignocelulósica, es esencial asegurar una buena preparación del sustrato, selección de adhesivo (o incluso formulaciones biomásicas), y condiciones de procesamiento que favorezcan tanto la adhesión como la cohesión. Con ello se maximiza la calidad de la unión, su durabilidad y la eficiencia de integración en la matriz de panel.

8. Generalidades de la madera de *Persea americana*

El aguacate (*Persea americana* Mill) pertenece a la familia Lauraceae, que cuenta con casi 2500 especies que crecen principalmente en los bosques nublados de montaña en zonas tropicales y subtropicales, especialmente en América y Asia. El género tiene casi 200 especies y se divide en tres subgéneros: *Persea*, *Eriodaphne* y *Machilus*. El número de especies del subgénero *Persea* difiere entre cuatro y siete. Estas especies se distribuyen principalmente desde la parte central de México al extremo noreste de Sudamérica, en alturas desde el nivel del mar hasta 3500 msnm.

En México, el aguacate denominado comercialmente como “Hass” se cultiva principalmente en el estado de Michoacán y en menor proporción en Jalisco, Nayarit, Estado de México, Puebla y Veracruz (Smith et al., 1992). Es un árbol de 10 -15 m de altura (cuando es cultivado) y alcanza diámetros de 40 - 60 cm, mientras que en estado silvestre puede llegar a 25 o 30 m de altura. Es probablemente originario de México y Centroamérica (Record & Hess, 1943). Respecto a las propiedades tecnológicas de la madera de *Persea americana*, la calidad para pulpa y papel se clasifica como excelente, su madera a su vez se le denomina excelente al lijado para un grano 100 aunque muy pobre para los granos de 80 y 60. Asimismo, se considera moderadamente estable de acuerdo con la anisotropía de la contracción. La madera se considera como no resistente (clase 5 según EN 350-1) y por lo tanto no es apta para aplicaciones en el exterior a menos que esté tratada. Teniendo en cuenta su perfil de propiedades y las pequeñas dimensiones disponibles, la madera de aguacate se recomienda para carpintería general, muebles, decoración interior, placas encoladas para armarios y archivadores y madera laminada para usos interiores (Fuentes-Talavera, et al., 2011).

HIPÓTESIS

Es factible desarrollar tableros a partir de la biomasa lignocelulósica resultante de las podas del árbol *Persea americana*, empleando tanto adhesivos comerciales como adhesivos sustentables, obteniendo propiedades físicas y mecánicas comparables o superiores respecto a los tableros comerciales.

JUSTIFICACIÓN

El incremento de las plantaciones de *Persea americana*, ha presentado un aumento de residuos agroforestales producidos por el manejo silvícola. Estos residuos constituyen, una fuente de material lignocelulósico en su mayoría sin aprovechamiento o con muy poco impacto socioeconómico. Por este motivo, se propone elaborar un tablero de partículas. Sin embargo, los problemas originados por emisiones de formaldehído, principal compuesto utilizado en la adhesión de tableros a nivel comercial se hace evidente el uso alternativo de adhesivos sustentables. Aunque, en algunos países han impuesto mayores regulaciones acerca de su uso de formaldehído, es factible fomentar la utilización de tecnologías renovables y sostenibles, dando a su vez la creación de productos de bajo impacto en el ambiente y la salud.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar tableros de partículas con biomasa de *Persea americana* utilizando diversas formulaciones adhesivas en relación con los tableros comerciales.

Objetivos específicos

- Analizar la estructura anatómica de la madera de *Persea americana*.
- Desarrollar prototipos utilizando compuestos urea, fenol y formaldehído.
- Integrar la lignina como formulación adhesiva sustentable en la conformación de prototipos.
- Evaluar los tableros obtenidos mediante pruebas físico-mecánicas.

MATERIALES Y METODOS

1. Materiales

Los residuos lignocelulósicos de *Persea americana*, provenientes de podas, fueron recolectados en la plantación ubicada en el rancho “El cerrito de la joya” en la comunidad de La Palma de Altamira, municipio de Ario de Rosales, Mich. Situado en las coordenadas: 19°17'27.0"N 101°35'29.0"W (figura 3).



Figura 3. Mapa de localización del huerto "el cerrito de la joya". Fuente: (INEGI 2020).

El material recolectado se habilitó en tablillas de xiloteca de 1.5 cm X 7 cm X 15 cm, las cuales se emplearon para la descripción de características macroscópicas y organolépticas. El material restante se utilizó para la preparación de partículas destinadas a la fabricación de los prototipos experimentales.

2. Metodología

A continuación, se muestra un diagrama que presenta las etapas que se llevarán a cabo en la realización de la experimentación, la cual, a su vez da lugar al cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados. Estos puntos serán abordados en este apartado.

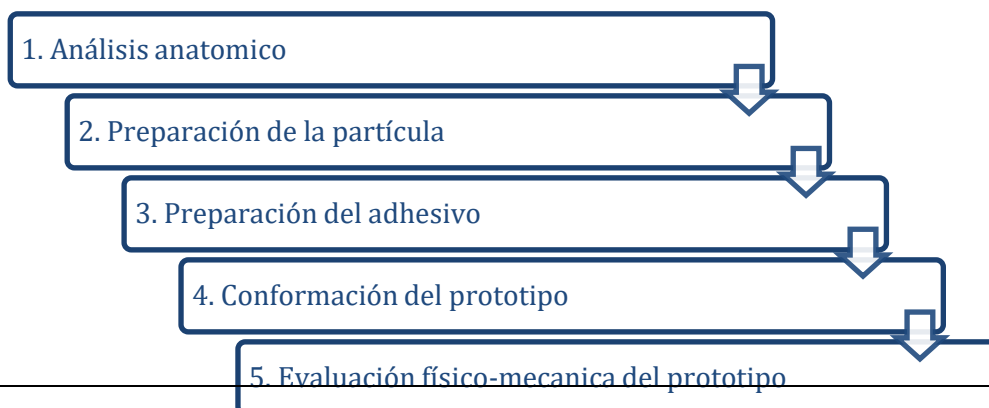


Figura 4. Diagrama de las etapas realizadas en la metodología.

2.1. Análisis anatómico de la madera de *Persea americana*

Las muestras para el análisis anatómico mediante el microscopio óptico se habilitaron a partir de cubos de madera de 2 cm x 2 cm x 2 cm, con sus caras representativas transversal (X), tangencial (tg) y radial (R), tal como se muestra en la figura 5. Estos se sometieron a un proceso de ablandamiento el cual se llevó a cabo por medio de cocción durante 400 horas a ebullición normal.

Posteriormente, se obtuvieron los cortes utilizando un micrótopo Leitz Wetzlar ® con un grosor aproximado de 30-40 micras, A la mitad de los cortes se les realizó un blanqueamiento con una mezcla de $\frac{1}{4}$ de hipoclorito de sodio al 5% y $\frac{3}{4}$ de agua destilada, después de lavarlos y se tiñeron con safranina, para después lavarlos con alcohol al 60%. A su vez, la otra mitad de los cortes se sometió a un proceso de deshidratación gradual con alcoholes: al 70% y 80% por 1 hora, 96% por 50 minutos y al 100% por 5 minutos, luego se aclararon con xilol durante 1 minuto, finalmente todos los cortes se colocaron en portaobjetos para agregarles resina de montaje.

Para el material disociado se obtuvieron astillas de la cara radial de los cubos previamente ablandados. Estas astillas se colocaron en tubos de ensayo, a los que se les agregó una mezcla de ácido acético glacial, ácido nítrico, ácido láctico y glicerina (en proporciones 1:1:1:1), como se observa en la figura 6. Luego, se taparon con papel aluminio y se dejaron reposar durante 24 horas. Después, se sometieron a baño maría durante 15 minutos, se taparon con nylon y se lavaron 5 veces con agua destilada para eliminar la mezcla. Posteriormente, las fibras (macerao) se tiñó con pardo de Bismarck y se lavó con alcohol

al 60% en 5 ocasiones. Finalmente, las fibras se vertieron en una caja Petri con alcohol al 70% y con ayuda de un pincel se colocaron en un portaobjetos de manera uniforme para luego agregar resina de montaje, como se muestra en la figura 7. La descripción anatómica se realizó de acuerdo con la Asociación Internacional de Anatomistas de Madera (Comité IAWA, 1989).

2.2. Preparación de la partícula



Figura 5. Cubos 2 x 2 x 2 Persea americana.



Figura 6. Ensayos para disociado.



Figura 7. Muestras anatómicas montadas.

La partícula para la elaboración de los prototipos (tableros) se habilito a partir de secciones de 20-25 cm de largo por 5-10 cm de diámetro aproximadamente, esto con ayuda de una motosierra stihl MS360. Estos se dejaron secar al aire durante 4 semanas alcanzando un contenido de humedad (C.H.) de 6-10%. Posteriormente se astillaron de manera manual utilizando un hacha Truper Velocity y se molieron en un molino micrón K20, para después tamizar en un equipo RO-TAP y clasificar en tamaños de malla del No. 10, 14, 18. 20, 40, 60 y 80, manteniendo el C.H de 6-8%. La figura 8 presenta gráficamente el procedimiento realizado.



Figura 8. Preparación de la partícula.

2.3. Preparación del adhesivo

2.3.1. Preparación del fenol formaldehído

En un recipiente de vidrio graduado (vaso de precipitado), se añadió 15.28 ml de formaldehído, 13.33 gr de fenol y 2 ml de hidróxido de sodio. Este último se utiliza como catalizador alcalino para ajustar el pH, favorecer la polimerización y controlar la viscosidad. Posteriormente, se colocó en una placa de calentamiento a una temperatura aproximada de 160°C, agitándola constantemente. Cuando la mezcla adquirió un color amarillo, la temperatura se redujo a 120°C. Luego, se dejó enfriar completamente antes de proceder a manipularla. Este procedimiento se ilustra en la figura 9.

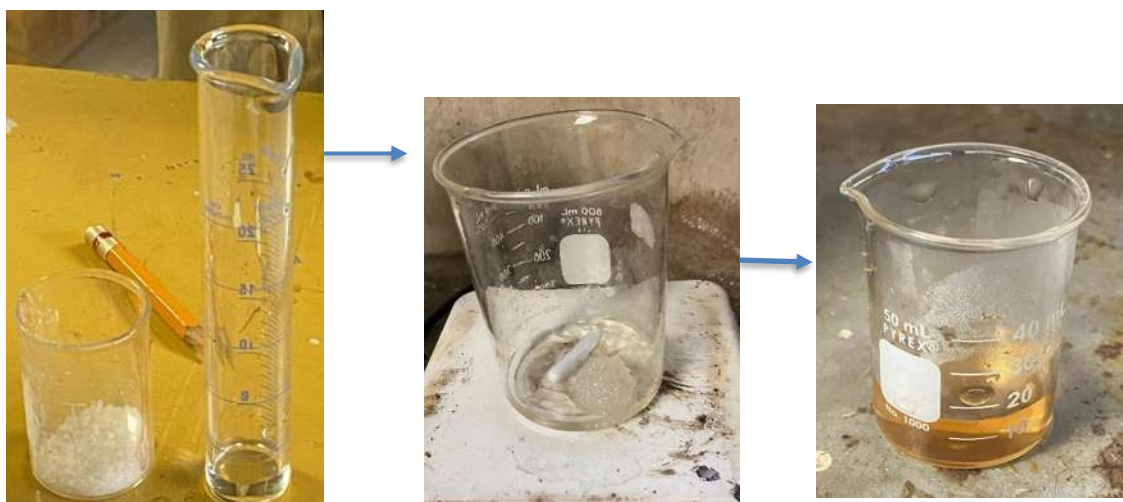


Figura 9. Preparación del adhesivo fenol formaldehído.

2.3.2. Preparación de la urea formaldehído

En un vaso de precipitado se añadió 19.05 g de urea, el recipiente se colocó sobre una placa de calentamiento a una temperatura aproximada de 70°C. Posteriormente, se incorporaron 10.95 g de formaldehído y 2 ml de hidróxido de sodio. La mezcla se mantuvo bajo agitación constante mientras la temperatura se incrementaba gradualmente hasta alcanzar los 95°C. Finalmente, se dejó enfriar completamente antes de proceder a su manipulación.

2.3.3. Preparación de lignina fenol

Según lo descrito por Chávez (2019), en un vaso de precipitado de 100 ml se agregaron 50 g de agua y 75 partes en masa de lignina, de acuerdo con la proporción establecida. Posteriormente, se añadieron 25 partes de fenol, completando así el 100% de los reactivos requeridos. Después se incorporó hidróxido de sodio 10 N como agente catalizador.

En un segundo vaso de precipitado, equipado con termómetro y agitación constante, se añadieron 100 partes de formaldehído. La mezcla se calentó gradualmente hasta alcanzar una temperatura de 100°C, durante 90 minutos.

2.4. Conformación de los tableros

Las dimensiones del tablero son 8 cm x 16 cm x 1.3 cm, el cual será formado con ayuda de un molde de madera. La mezcla por utilizar está conformada por 70% de partícula y 30% de adhesivo, esto según lo descrito por López Zapata y Mesias Narvaez (2020).

Para la fabricación del tablero de partícula, se realizaron tres prototipos los cuales se reflejan en la Tabla 1:

Tabla 1. Especificaciones para elaborar los prototipos.

	PFF	PUF	PLF
Medio	Húmedo	Húmedo	Húmedo
Conformación	Finos/Gruesos	Finos/Gruesos	Finos/Gruesos
Cantidad de partícula	35g / 35g	35g / 35g	35g / 35g
Cantidad de adhesivo	30 g	30 g	30 g
Tipo de adhesivo	Fenol- Formaldehído	Urea- Formaldehído	Lignina-Fenol

Los diferentes prototipos se conformaron de una mezcla de 35 g de partícula fina y 35 g de partícula gruesa, donde las partículas finas son el resultado de la fusión de los tamizados de las mallas 60, 80 y 40 y la gruesa es una combinación de las mallas 20, 18, 14 y 10. Esta caracterización se llevó a cabo según lo detallado por López Zapata y Mesias Narvaez (2020). Las partículas se sometieron a un proceso de humectación, colocándolas sobre una rejilla en contacto directo con agua común, durante una hora, después se mezclaron con 30 g de adhesivo fenol formaldehído y posteriormente se formó el colchón, esparciendo una capa de partícula fina, gruesa y fina, conformando así un tablero de tres capas, tal como se ve en la figura 10.



Figura 10. Conformación de los prototipos.

Después de la conformación de los tableros, se prensaron. El prensado se llevó a cabo en la prensa hidráulica EKA PRE ØØ1 equipada con controladores de temperatura y presión. La prensa se localiza en el laboratorio de Ingeniería Mecánica perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. En la Tabla 2 se muestran las características utilizadas.

Tabla 2. Características de prensado.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Presión (kg/cm ²)
10	30	0
10	30	0
20	60	30
20	60	35
20	90	40
20	90	55

El tiempo total de prensado fue de 100 minutos, distribuido en 6 etapas. Inicialmente, se realizó un pre-prensado durante los primeros 10 minutos: primero la superficie superior del colchón, con las platinas de la prensa completamente cerradas a una temperatura de 30 °C. Luego, se repitió el pre-prensado en la superficie inferior bajo las mismas condiciones.

A continuación, se llevó a cabo el prensado principal. En la primera aplicación, el colchón fue reacondicionado por su parte superior, aplicando una temperatura de 60 °C y una presión de 30 kg/cm² durante 20 minutos. Posteriormente, se volteó para prensar la parte inferior, manteniendo la misma temperatura y tiempo, pero aumentando la presión a 35 kg/cm².

En la etapa siguiente, se regresó a la superficie superior, incrementando la temperatura a 90 °C y la presión a 40 kg/cm², manteniendo estas condiciones durante 20 minutos. Finalmente, se repitió el prensado sobre la superficie inferior, elevando la presión a 55 kg/cm², manteniendo constantes la temperatura y el tiempo de la etapa anterior.

Al finalizar el proceso de prensado, el material se dejó en reposo para permitir su enfriamiento antes de ser manipulado. Esta metodología se aplicó al prensado de los diferentes prototipos.

2.5. Evaluación física-mecánica del tablero

2.5.1. *Determinación de la densidad normal*

Para el ensayo de densidad se utilizó la norma ASTM D 1037-12, siguiendo las indicaciones que en ella se describen.

$$\rho_o = \frac{m_o}{V_o}$$

Ecuación 1

Donde:

ρ_o : Densidad después del secado

m_o : Masa de probeta después el secado

V_o : Volumen de la probeta después del secado

2.5.2. Determinación de absorción de agua

Siguiendo la misma normativa, la absorción de agua se calculó empleando la fórmula establecida, después de someter las muestras a inmersión en agua durante 24 horas.

$$WA(\%) = \frac{w_2 - w_1}{w_1} (100)$$

Ecuación 2

Donde:

w_1 : masa seca inicial

w_2 : masa humedad

WA : porcentaje de absorcion de agua

2.5.3. Determinación de hinchamiento de espesor

Siguiendo la misma normativa y los lineamientos establecidos en ella, se utilizó la siguiente fórmula para el cálculo de hinchamiento de las muestras después de estar sumergidas en el agua por 24 horas.

$$TS(\%) = \frac{T_2 - T_1}{T_1} (100)$$

Ecuación 3

Donde:

T_1 : espesor seco inicial

T_2 : espesor humedo

TS : hinchamiento en espesor

2.5.4. Ensayos de flexión para MOR y MOE

El MOR (módulo de ruptura) representa la resistencia máxima que puede soportar un material antes de romperse cuando se aplica una fuerza de flexión, para lo cual se utilizó la ecuación 4 para determinarlo, mientras que el MOE (módulo de elasticidad) indica la rigidez del material, es decir, cuanto se deforma elásticamente bajo una carga sin romperse, para este ensayo se utilizó la ecuación 5 para determinarlo, siguiendo la normativa ASTM D 1037-12 para ambos.

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Ecuación 4

$$MOE = \frac{L^3m}{4bd^3}$$

Ecuación 5

Donde:

P: carga maxima aplicada

L: longitud del claro

b: ancho de la muestra

d: espesor de la muestra

m: pendiente de la parte lineal de la curva

RESULTADOS

1. Análisis anatómico del material celulósico *Persea americana*

1.1. Características organolépticas



Figura 11. Corte transversal (A), corte radial (B) y corte tangencial (B).

La madera no presenta diferencia de color entre albura y duramen, clasificándose como color blanco rosado (Hue 7-5YR-8/2) según la tabla Munsell (1975), como se aprecia en la figura 12. El sabor es ligeramente dulce mientras que el olor es característico estando este recién cortado, ya que una vez seco no se percibe. Su textura es fina tendiendo a media, con hilo ligeramente ondulado y entrecruzado tal como se observa en la figura 13. En la figura 11 se aprecia que el vetado varía de liso a suave con diseño liso y en caras radiales espigado presentando un brillo bajo.



Figura 12. Tabla de Munsell, identificación del color de la madera de *Persea americana*.



Figura 13. Muestra de madera de *Persea americana* donde se observa el hilo entrecruzado.

1.2. Características macroscópicas y microscópicas

La madera de *Persea americana* presenta una densidad de 0.41 g/cm^3 . Su zonación es ligeramente definida por fibras de pared más gruesas, la porosidad es difusa heterogénea sin acomodo alguno siendo a su vez muy dispersos tal como se aprecia en la figura 14. Los poros en su mayoría son solitarios, múltiples radiales de 2,3,5, agrupados de 3,4, y escasos de 5, y múltiples tangenciales de 2. En la figura 15 se puede observar un poro solitario. Los poros son de diámetro pequeño teniendo un promedio de $70.33 \mu\text{m}$ ($40\text{-}90 \mu\text{m}$) y moderadamente numerosos presentando un promedio de 10.63 por mm^2 ($6\text{-}16 \text{ poros/mm}^2$). El parénquima leñoso es de tipo paratraqueal vasicentrico y escaso paratraqueal unilateral.



Figura 14. Corte transversal, en el que se observa la porosidad difusa a 10x.

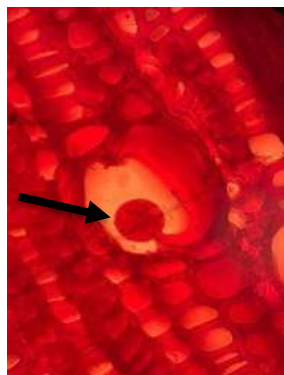


Figura 15. Poro solitario a 40x.

En la figura 16 se observa un elemento de vaso, estos son moderadamente cortos con longitud promedio de $337.68\ \mu\text{m}$ ($202\text{-}565.6\ \mu\text{m}$) con perforación simple y lígula corta, las puntuaciones en las paredes de los vasos son areoladas alternas tal como se observa en la figura 18.

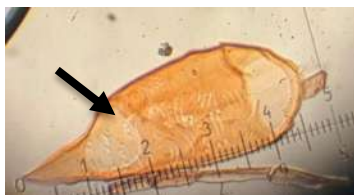


Figura 16. Elemento de vaso visto en microscopio a 10X.

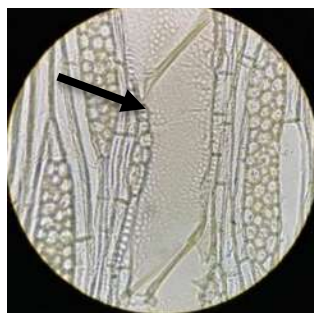


Figura 17. vasos en corte tangencial en microscopio a 10X.

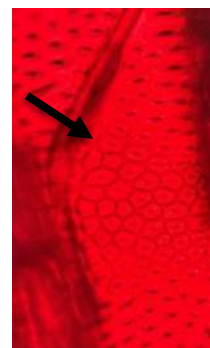


Figura 18. Sección parcial de vaso, puntuaciones areoladas en microscopio a 40x.

La madera presenta radios múltiples agregados, poliseriados y escasos uniseriados, biseriados y triseriados como se muestra en la figura 19. Los radios uniseriados presentan de 2 a 8 células de alto. Los radios presentan composición heterogénea, siendo estos muy angostos con un ancho de $17.25\ \mu\text{m}$ ($10\text{-}25\ \mu\text{m}$) y muy bajos con altura de $91.42\ \mu\text{m}$ ($42.5\text{-}225\ \mu\text{m}$). Mientras que los radios por mm lineales son pocos numerosos encontrándose en promedio $6.63\ \mu\text{m}$ ($5\text{-}9\ \mu\text{m}$).

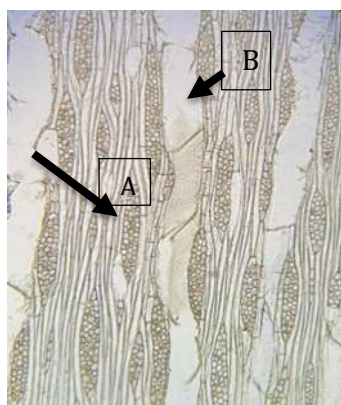


Figura 19. Corte tangencial, radios (A), vaso(B), a 10x.

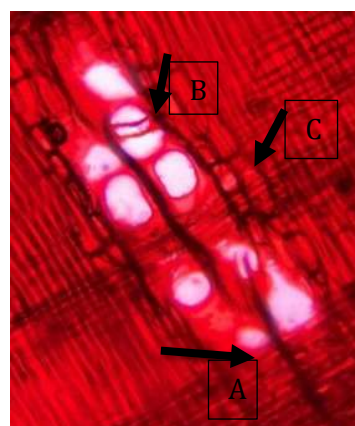


Figura 20. Corte radial donde se observa campo de cruzamiento (A), elementos de vaso (B) y parénquima leñoso (C), a 10x.

En las figuras 21 y 22 se observan las fibras, la cuales son de tipo libriforme y escaleriformes, de longitud son moderadamente cortas con $813.54\ \mu\text{m}$ ($646.4\text{-}1010\ \mu\text{m}$), con diámetro mediano de $31.96\ \mu\text{m}$ ($22.5\text{-}50\ \mu\text{m}$), de pared delgada $11.29\ \mu\text{m}$ ($6.25\text{-}20\ \mu\text{m}$) y con diámetro de lumen $20.67\ \mu\text{m}$ ($10\text{-}35\ \mu\text{m}$).

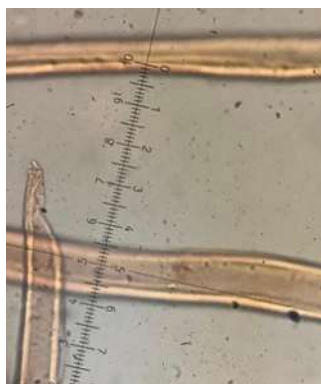


Figura 21. Dimensiones de las fibras a 40x.



Figura 22. Fibras libriformes a 10x.

Se observan abundantes inclusiones como células oleíferas, canales gomíferos (gomas) en los radios y ceras en los poros, tal como se observa en la figura 23, 24 y 25, así como tilósis común.

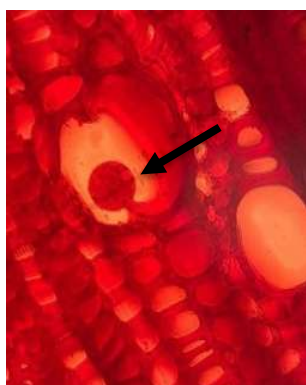


Figura 23. Corte transversal donde se observan oleosas a 10X.

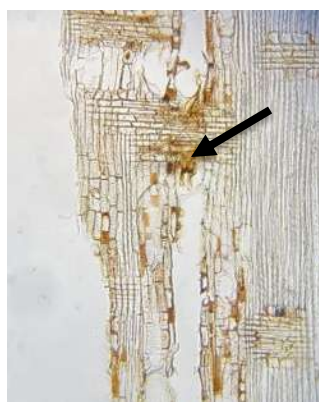


Figura 24. Corte radial en el cual hay presencia de gomias a 10X.

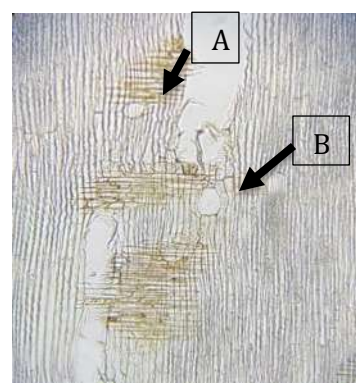


Figura 25. Célula oleífera (A). conducto gomífero (B) 10X.

En la Tabla 3, se presenta el índice de calidad de pulpa (ICP) para la madera de *Persea americana*, el cual es un parámetro utilizado en la industria forestal y papelera para evaluar la aptitud de una madera para ser utilizada en la producción de pulpa y posteriormente papel. Este índice se base en una combinación de características físicas, químicas y estructurales de la madera que afectan su rendimiento y calidad de la pulpa. La madera de *Persea americana* se clasifica en el grado IV, lo que significa que tiene una calidad regular para la producción de papel.

Tabla 3. Índices de calidad de pulpa para la especie *Persea americana*.

Índice	Clasificación
Coeficiente de rigidez	Muy gruesa: 0.7065
Coeficiente de flexibilidad	Media: 0.6467
Coeficiente de esbeltez	No existe clasificación: 25.4549
Relación Runkel	Grado IV: Regular para papel: 1.092

2. Pruebas físicas y mecánicas del tablero

2.1. Densidad

En la Tabla 4, se presentan los valores promedio de la densidad obtenidos para cada formulación evaluada. Las diferentes pruebas se llevaron a cabo siguiendo lo establecido por la norma ASTM D 1037-12.

Tabla 4. Densidad de tableros evaluados.

Tablero	Densidad (kg /m ³)
PFF	728.61
PUF	614.49
PLF	554.26
PC	802.72

Entre los tableros experimentales, el adhesivo fenol formaldehído (PFF) obtuvo la mayor densidad (728.61 kg/m³), situándose relativamente cerca del PC, lo que

sugiere una buena cohesión interna y potencial para aplicaciones estructurales. En segundo lugar, el tablero elaborado con urea formaldehído (PUF) alcanzó una densidad de 614.49 kg/m³, valor notablemente menor respecto al PC, lo que indica un grado inferior de compactación del material. Por último, el tablero producido con lignina fenol (PLF) registró la densidad más baja (554.26 kg/m³), evidenciando la menor interacción adhesivo-partícula del conjunto. Estas variaciones pueden atribuirse a las propiedades de los adhesivos utilizados las cuales influyen directamente en la consolidación del tablero.

Con base en la clasificación propuesta por la NMX-C-461-ONNCCE-2010, el tablero PFF se aproxima más al comportamiento del tablero comercial, cumpliendo con los requisitos para aplicaciones estructurales en condiciones húmedas (Tipo 3). El tablero PUF se ubica dentro de la categoría Tipo 2, adecuado para uso estructural en condiciones secas. Finalmente, el tablero PLF alcanza solamente la clasificación de Tipo 1, destinada a uso general en seco, lo que sugiere un desempeño limitado frente al estándar comercial. Aunque ningún tablero iguala la densidad del PC, es posible desarrollar tableros con biomasa de *Persea americana* cuyo comportamiento se aproxima al comercial, especialmente en el caso del PFF, respaldando así la viabilidad técnica de la propuesta.

2.2. Absorción e hinchamiento

La absorción de agua y el hinchamiento en espesor son parámetros críticos que reflejan la resistencia de los tableros de partículas a la humedad y su estabilidad dimensional. En la Tabla 5, se presentan los valores obtenidos para cada una de las formulaciones evaluadas.

Tabla 5. Porcentaje de absorción e hinchamiento de tableros evaluados.

Tablero	Absorción (%)	Hinchamiento (%)
PUF	67.33	22.47
PFF	43.88	17.74
PLF	78.96	26.96
PC	53.26	25.36

El tablero elaborado con adhesivo lignina fenol (PLF) registro los mayores porcentajes, con una absorción de 78.96 % y un hinchamiento de 26.96%, lo que indica una baja resistencia a la humedad. En contraste, el tablero con adhesivo fenol formaldehído (PFF) mostró el mejor desempeño, con una absorción de 43.88% y un hinchamiento de 17.74%, lo cual confirma la buena resistencia al agua de los adhesivos fenólicos. El tablero con urea formaldehído (PUF) obtuvo resultados intermedios, 67.33% de absorción y 22.47% de hinchamiento, revelando un comportamiento aceptable, aunque menos eficiente de los demás.

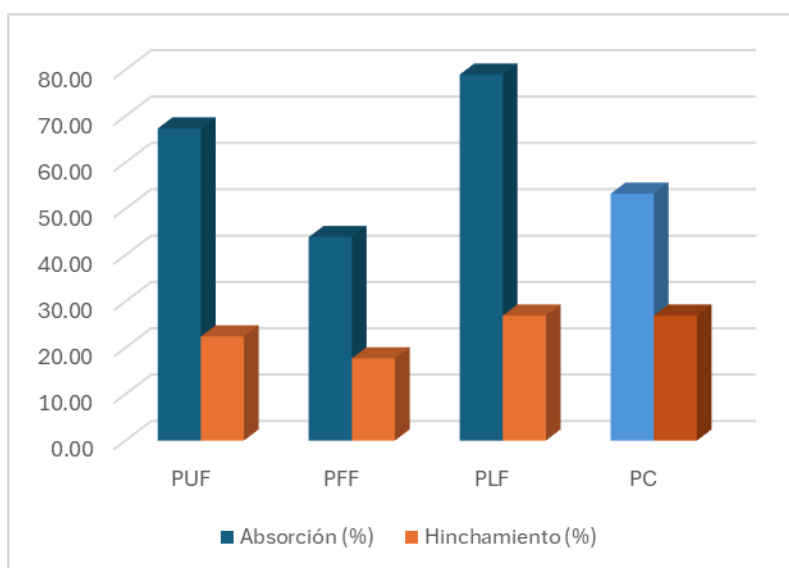


Figura 26. Comparación del porcentaje de absorción e hinchamiento en tableros evaluados según el tipo de adhesivo.

La figura 26, refuerza visiblemente estas observaciones, mostrando de forma clara el desempeño de los tableros elaborados frente al comportamiento del tablero comercial (PC). Se aprecia que el tablero PC presenta valores intermedios de absorción e hinchamiento, situándose por encima del PFF, pero por debajo del PLF y PUF en cuanto a absorción. No obstante, en el parámetro de hinchamiento se mantiene cercano a PLF, lo que evidencia una variación dimensional frente a la humedad.

De manera consistente con lo observado previamente, PFF mantiene el comportamiento más estable ante la humedad, reflejando la menor absorción e hinchamiento del conjunto. Por su parte, PUF manifiesta valores superiores de

absorción respecto al tablero comercial, pero conserva una hinchazón moderada; mientras que PLF vuelve a presentar los valores más altos en ambos parámetros, posicionándose como el material más susceptible al deterioro por humedad.

Al contrastar estos resultados con los criterios establecidos en la NMX-C-461-ONNCCE-2010, se reafirma que el tablero PFF cumple con las especificaciones requeridas para Tipo 3, correspondientes a uso estructural en condiciones húmedas. El tablero PUF, por su comportamiento, se clasifica dentro de Tipo 1, destinado a uso general en condiciones secas. El tablero PC muestra un desempeño compatible con aplicaciones donde la exposición a la humedad es moderada; sin embargo, su absorción supera la del PFF, lo que lo limita frente a condiciones rigurosas. Finalmente, el tablero PLF continúa sin cumplir los requisitos normativos para clasificación, sugiriendo nuevamente la necesidad de optimizar su proceso de fabricación.

2.3. MOR y MOE

Los valores obtenidos para el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) reflejan el comportamiento mecánico de los tableros fabricados bajo carga de flexión. En la Tabla 6 se observan los datos obtenidos de los ensayos realizados.

Tabla 6. Valores de MOR y MOE de los tableros evaluados.

Tablero	MOR (MPa)	MOE (MPa)
PUF	10.41	1159.14
PFF	16.77	2006.48
PLF	13.06	1566.54
PC	11.65	1889.93

En términos de desempeño mecánico, el tablero PFF supera claramente al resto de los tableros, alcanzando valores mayores tanto en MOR como en MOE, situándose incluso por encima del tablero comercial (PC). Por otro lado, el tablero PLF presenta un comportamiento intermedio: su MOR (13.06 MPa) se ubica por debajo del PFF, aunque

aún dentro del rango requerido para tableros Tipo 2; sin embargo, su MOE (1566.54 MPa) es inferior al del PC, lo que indica que, aunque posee una resistencia aceptable, su capacidad para resistir deformaciones bajo carga es menor. Esto lo orienta hacia aplicaciones de menor exigencia estructural, más cercanas a un Tipo 1.

El tablero PUF muestra el desempeño más bajo, con valores de MOR y MOE menores respecto al PC y a los tableros PFF y PLF. Su respuesta mecánica está por debajo de los límites establecidos en la normativa para uso comercial, lo que lo excluye de aplicaciones estructurales o de carga.

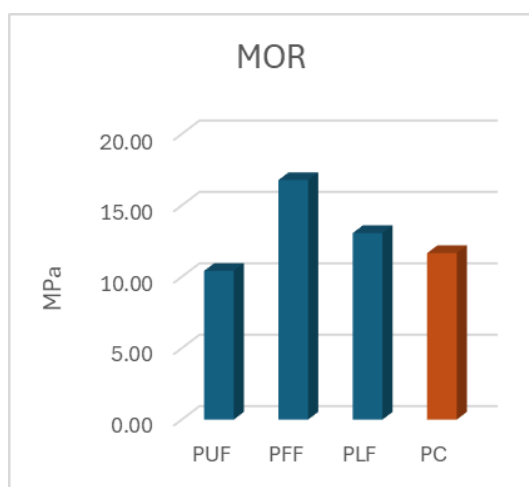


Figura 27. Comparación del MOR en los diferentes tableros evaluados.

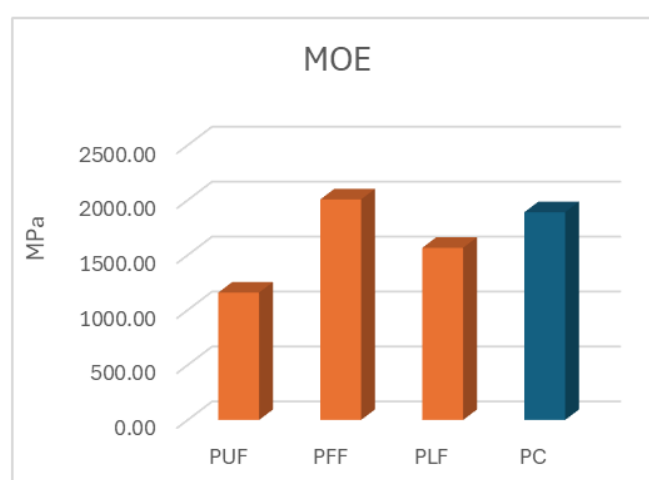


Figura 28. Comparación del MOE en los diferentes tableros evaluados.

La representación gráfica en las Figuras 27 y 28 confirma claramente el comportamiento mecánico comparativo de los tableros. El tablero PFF registra los valores más altos tanto en MOR como en MOE, superando incluso al tablero comercial (PC), lo que evidencia un desempeño superior bajo carga de flexión. En contraste, el tablero PLF muestra valores intermedios, con un MOR cercano al del PC, pero un MOE inferior, lo cual indica resistencia aceptable, pero menor rigidez frente a la referencia comercial. Finalmente, el tablero PUF presenta los valores más bajos para ambos parámetros, evidenciando una menor capacidad mecánica frente al resto de los tableros evaluados. Los resultados reflejan que solo el PFF puede considerarse competitivo respecto al tablero comercial, mientras que PLF y en mayor medida PUF, presentan limitaciones para aplicaciones que requieren mayores niveles de

desempeño estructural.

3. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el propósito de determinar si las diferencias observadas entre los paneles elaborados con los distintos adhesivos corresponden a efectos reales del tratamiento o solo son resultados al azar. Para ello se aplicó la prueba ANOVA, herramienta estadística que permite comparar simultáneamente los promedios de los grupos y establecer significancias entre ellos. En este estudio el factor principal fue el tipo de adhesivo utilizado; fenol formaldehído (PFF), urea formaldehído (PUF) y lignina fenol (PLF) y el tablero comercial de referencia (PC). Las propiedades analizadas fueron densidad, absorción, hinchamiento, MOR y MOE, variables que permitieron evaluar el desempeño físico y mecánico de los tableros obtenidos. Los datos se representan en la Tabla 7.

Tabla 7. ANOVA de un factor para las propiedades evaluadas (Media $\pm$ Desviación Estándar).

Prototipo	Densidad (kg/m ³)	Absorción (%)	Hinchamiento (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
PC	796.32 $\pm$ 11.66	53.09 $\pm$ 2.43	25.36 $\pm$ 2.86	11.48 $\pm$ 1.14	1889.96 $\pm$ 2.47
PFF	728.61 $\pm$ 18.74	43.04 $\pm$ 14.25	17.74 $\pm$ 4.98	16.88 $\pm$ 1.33	2006.48 $\pm$ 209.16
PUF	614.49 $\pm$ 112.48	67.74 $\pm$ 13.13	22.47 $\pm$ 2.77	10.41 $\pm$ 3.87	1147.58 $\pm$ 718.60
PLF	554.16 $\pm$ 108.74	78.04 $\pm$ 12.68	26.29 $\pm$ 6.58	13.04 $\pm$ 5.50	1543.89 $\pm$ 933.05
Valor p	< 0.001	0.001	0.001	< 0.001	< 0.001

El ANOVA de un factor mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en todas las propiedades evaluadas, lo que indica que el tipo de adhesivo influye de manera determinante en el comportamiento físico y mecánico de los tableros de partículas fabricados a partir de la madera de poda de *Persea americana*.

Al comparar los resultados con el panel comercial, se observó que los tratamientos con adhesivos sintéticos y biofenólicos presentaron un desempeño diferenciado. En densidad, los paneles experimentales mostraron valores ligeramente inferiores al

control, lo cual puede atribuirse a variaciones en la compactación y distribución de las partículas durante el prensado, así como a las diferencias en la compactación y distribución de las partículas durante el prensado, así como a las diferencias en la composición química y viscosidad de los adhesivos. Sin embargo, el tratamiento PFF logró una densidad más cercana al valor comercial reflejando una buena consolidación interna del tablero.

En cuanto a las propiedades físicas, los resultados evidenciaron que el adhesivo PFF presentó los valores más bajos de absorción de agua y porcentaje de hinchamiento, en comparación con el control y los demás tratamientos. Esto sugiere una mejor resistencia a la penetración de humedad y una mayor estabilidad dimensional, atribuida a la naturaleza hidrofóbica del fenol y a su elevada capacidad de entrecruzamiento durante el curado. El adhesivo PLF, aunque mostró una mejora frente a PUF, no alcanzó la estabilidad del PFF, lo que indica que la sustitución parcial de fenol por lignina disminuye ligeramente la resistencia al agua, debido a una menor reactividad de los grupos funcionales de la lignina.

Respecto a las propiedades mecánicas, los valores de MOR y MOE de los tableros con PFF fueron significativamente superiores a los del tablero comercial (PC), lo que demuestra su mayor capacidad de esfuerzo y deformación. En cambio, los tableros elaborados con PUF presentaron los valores más bajos, asociado a un menor grado de entrecruzamiento y a una menor resistencia térmica del adhesivo. El tratamiento con PLF se ubicó en un punto intermedio, mostrando un desempeño mecánico aceptable, aunque ligeramente por debajo del adhesivo PFF. En la Tabla 8 se muestran de manera precisa las implicaciones y perspectivas de acuerdo con las propiedades evaluadas de los tableros elaborados, no solo de una perspectiva estadística sino también desde su relevancia práctica.

Tabla 8. Interpretación y proyección por cada propiedad

Propiedad	Interpretación	Proyección
Densidad	PFF y PUF reducen significativamente la densidad respecto al control. PUF muestra alta variabilidad.	PUF podría emplearse en paneles ligeros. PFF mantiene equilibrio entre peso y desempeño.
Absorción	PFF reduce la absorción cerca del 30 % respecto al control. PUF y PLF presentan valores superiores.	PFF es favorable para ambientes húmedos. PUF y PLF requieren tratamientos de sellado o aditivos hidrofóbicos.
Hinchamiento	PFF presenta menor hinchamiento, indicando buena estabilidad dimensional. PUF y PLF son similares al control.	FF adecuado para condiciones de humedad variable. PUF y PLF útiles donde la estabilidad no sea prioritaria.
MOR	PFF incrementa 47 % la resistencia frente al control. PLF mantiene valores intermedios; PUF no difiere del control.	PFF es óptimo para aplicaciones estructurales. PUF se recomienda en usos no estructurales.
MOE	PFF muestra mayor rigidez (6 % más que el control). PUF presenta alta dispersión ($DE \approx 718$ MPa).	PFF se mantiene consistente; PUF necesita ajustes de formulación o curado. PLF podría optimizarse como alternativa intermedia.

En general, el análisis demuestra que el tipo de adhesivo influye de manera significativa en todas las propiedades evaluadas. Los resultados posicionan al adhesivo PFF con el mejor desempeño global, mientras que PUF se recomienda únicamente para aplicaciones de bajo esfuerzo o uso interior sin contacto con el agua. Por su parte, PLF representa una alternativa viable y más sustentable, ya que,

aunque presenta disminuciones en el rendimiento, conserva propiedades comparables al control, lo que respalda su potencial de mejora mediante optimización de la formulación y condiciones de prensado.

CONCLUSIONES

El análisis anatómico de la madera de *Persea americana* permitió comprender en profundidad su estructura interna y cómo esta condiciona el comportamiento físico y mecánico de los tableros elaborados. La madera presentó una densidad básica de 0.41 g/cm^3 , con una anatomía característica de maderas de porosidad difusa, donde los vasos son pequeños y moderadamente numerosos, las fibras poseen paredes delgadas y longitud media y existe una notable presencia de sustancias extractivas, como ceras, gomas y tilósis, sin embargo, no compromete la penetración de los adhesivos. Así mismo, se atribuye a la biomasa una estructura ligera, porosa y de baja compactación que, si bien favorece la manufactura de paneles de bajo peso, también limita la capacidad de cohesión interna y la distribución uniforme del adhesivo durante el prensado.

Dichas particularidades anatómicas explican las diferencias del comportamiento observadas entre los tableros experimentales y el tablero comercial de referencia, el cual, al estar fabricado con maderas más densas y homogéneas, presenta una compactación interna superior y un mejor aprovechamiento del adhesivo. En contraste, los tableros a base de *Persea americana* mostraron una densidad y resistencia ligeramente menores, pero con potencial funcional en aplicaciones donde el bajo peso y la sostenibilidad son deseables.

Entre las formulaciones adhesivas evaluadas, el PFF destacó por su mayor afinidad química y mejor impregnación en la matriz lignocelulósica, logrando tableros de alta densidad (729.61 kg/m^3), baja absorción de agua (43.88 %) y propiedades mecánicas sobresalientes (MOR = 16.77 MPa; MOE = 2006.48 MPa). Estas características cumplen con los estándares establecidos para tableros de uso estructural en condiciones húmedas (Tipo 3), de acuerdo con las normas NMX-C-461-ONNCCE-2010 y EN 312:2010, lo que confirma su idoneidad para aplicaciones donde se requiere estabilidad dimensional y resistencia, como recubrimientos o

componentes arquitectónicos expuestos a variaciones de humedad. Por otro lado, el tablero PLF presentó un desempeño intermedio, con valores físicos y mecánicos menores al PFF, pero superiores al tablero comercial, evidenciando una adhesión eficiente, aunque menos homogénea. Esta respuesta se relaciona con la baja reactividad natural de los grupos fenólicos de la lignina, lo que limita el entrecruzamiento con las partículas de madera. Aun así, los tableros obtenidos con PLF alcanzaron valores de MOR y MOE comparables al control, demostrando su viabilidad técnica y ambiental. Por su desempeño equilibrado y su carácter renovable, este adhesivo se perfila como una alternativa sustentable para la fabricación de tableros no estructurales, como mobiliario interior, revestimientos o elementos decorativos, contribuyendo a la reducción del uso de adhesivos sintéticos. En contraste, los PUF mostraron las propiedades más bajas en densidad, resistencia y estabilidad hídrica, lo que restringe su aplicación a usos interiores o de bajo esfuerzo estructural, como paneles divisorios, respaldos o recubrimientos en ambientes secos. Su menor desempeño se atribuye tanto a la baja compatibilidad del adhesivo con las características anatómicas de la madera como a la limitada resistencia del polímero frente a la humedad.

El análisis estadístico confirmó que las diferencias entre tratamientos fueron significativas ($p < 0.05$), evidenciando que el tipo de adhesivo tiene una influencia determinante sobre las propiedades finales de los tableros. Además, se comprobó la viabilidad técnica del uso de biomasa lignocelulósica de *Persea americana* proveniente de podas, lo que abre una ruta para su valorización dentro de una economía circular, contribuyendo al aprovechamiento de residuos agroforestales y al desarrollo de materiales ecológicos de valor agregado. En síntesis, los tableros fabricados con adhesivo fenol formaldehído se consolidan como los de mayor desempeño global, mientras que los elaborados con lignina fenol representan una alternativa prometedora hacia la sustitución parcial de adhesivos sintéticos, equilibrando funcionalidad técnica y beneficios ambientales. De este modo, la investigación demuestra que la madera de *Persea americana* puede ser una fuente viable y sustentable de materia prima para la elaboración de tableros lignocelulósicos, siempre que se optimicen las condiciones de adhesión y

compactación.

RECOMENDACIONES

1. Optimización del bioadhesivo lignina fenol:

Ajustar la relación lignina/fenol y las condiciones de curado con el fin de mejorar la reactividad del adhesivo y su capacidad de entrecruzamiento, buscando igualar el desempeño del PFF en términos de cohesión y resistencia.

2. Evaluar la preparación de la partícula de *Persea americana*:

Dada la presencia de ceras, tilósis y extractivos, se recomienda aplicar tratamientos previos de extracción para facilitar la penetración del adhesivo, aumentar la adherencia y minimizar zonas de falla interna, para así evaluar si es un factor determinante en el proceso.

3. Evaluar el efecto de la granulometría y el grado de compactación:

Considerar una distribución uniforme del tamaño de partícula y una mayor presión de prensado, con el propósito de mejorar la densidad aparente y la resistencia mecánica de los tableros.

4. Realizar estudios de durabilidad y emisiones:

Extender la investigación hacia pruebas de envejecimiento acelerado, emisiones de formaldehído, y resistencia térmica, para determinar la estabilidad del material ante condiciones de uso prolongado y su cumplimiento con normativas ambientales.

5. Explorar formulaciones 100 % naturales:

Avanzar hacia el desarrollo de adhesivos libres de formaldehído, incorporando taninos, proteínas o azúcares reductores como agentes reticulantes, con el fin de obtener materiales completamente biodegradables y seguros.

6. Escalamiento y análisis económico:

Implementar ensayos a escala piloto o industrial para evaluar la viabilidad económica y ambiental del proceso, promoviendo el aprovechamiento sustentable de los residuos de *Persea americana* y fortaleciendo la cadena de valor de productos forestales no maderables en regiones productoras.

REFERENCIAS

- Anaguano, D. P. (2008). *Determinación del formaldehído en los adhesivos*. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2148/1/CD-1422.pdf>
- Anzaldo Hernández J, Vargas Radillo J, Fuentes Talavera F, Silva Guzmán J A, Rutiaga Quiñones J G, San Juan Dueñas R. (2004). *La madera de aguacate (Persea americana Mill) como materia prima para la fabricación de papel corrugado*. Ciencia Nicolaíta 39:207-216.
- APA – The Engineered Wood Association. (2020). Norma de desempeño para tableros a base de madera. APA – The Engineered Wood Association. <https://www.apawood.org>
- ASTM International. (2020). *ASTM D1037-12(2020): Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*. <https://www.astm.org/d1037-12r20.html>
- Cahyono, T. D., Yanti, H., Massijaya, M. Y., Iswanto, A. H., & Uluputty, M. R. (2019). *The durability of OSB composite plywood with avocado, mahogany, and pine wood veneers against drywood and subterranean termites*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 260, No. 1, p. 012067). IOP Publishing.
- Ccallo Ccallo, K., & Salas Torres, M. K. (2024). *Desarrollo de un biocompuesto a partir del uso continuo de residuos de palta y aserrín procedentes de las industrias frutícola y maderera para su uso potencial como material alternativo a los tableros aglomerados*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica San Pablo]. Repositorio Institucional UCSP.
- Chávez, L. E. (2019). *“Desarrolló y evaluación de tableros (paneles) de madera a base de tres tipos de adhesivos (taninos/hexamina, lignina glioxilada/hexamina y lignina despolimerizada) y sin formaldehído”*. [Tesis de maestría]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Climate Rights International & Guardián Forestal. (2024). *In Mexico, avocado suppliers continue sourcing from illegally deforested land*. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2024/08/in-mexico-avocado-suppliers-continue-sourcing-from-illegally-deforested-land/>

- Comyn, J. (2006). *Theories of adhesion. Progress in Organic Coatings*, 57(3), 190–197.
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.04.003>
- Deng, X., Liu, Z., Wang, Z., Wu, Z., Li, D., Yang, S., He, S., & Ji, N. (2025). Mechanical properties, thermal stability, and formaldehyde emission analysis of nanocellulose-reinforced urea–formaldehyde resin and its mechanism. *Polymers*. 17(10), 1402.
<https://doi.org/10.3390/polym17101402>
- Dekker, Marcel. (1986). *In Wood Adhesives: Chemistry and Technology*. New York.
- EGOAVIL-CUEVA, G., & GONZALES, E. (2003). *Tableros de fibras de la madera de "tornillo"(Cedrelinga cateniformis Ducke)", Tornillo"(Cedrelinga cateniformis Ducke)". Bosque (Valdivia)*, 24(3), 39-44. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002003000300004&script=sci_abstract&utm_source
- Elékou, E. A. (2019). *Efecto del termotratamiento en aceite en las propiedades físicas y mecánicas de la madera Acrocarpus fraxinifolius*. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México: División de Posgrado Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera.
- Estévez, P. (2012). *Desarrollo, caracterización y optimización de resinas base urea-formol (UF), como adhesivos para tableros aglomerados con baja emisión de formaldehído*. Tesis Doctoral. Universidad de Burgos, España.
- European Committee for Standardization. (2010). *EN 312:2010. Particleboards – Specifications*. CEN. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/310c1aaa-c5c9-4e5d-ad3d-a255c265da52/en-312-2010>.
- FAOSTAT. (2022). *Datos y cifras globales de productos forestales*. Recuperado el: 08 de junio de 2024. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#home>.
- Flores M, Carlos. (2006). *Elaboración de tableros OSB con residuos de la Industria del Laminado y dos tipos de adhesivos*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima- Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/400>
- Fuentes-Talavera, FJ, Silva-Guzmán, JA, Rodríguez-Anda, R., Lomelí-Ramírez, MG, R., & Richter, HG. (1998). *Índices de hinchamiento y contracción de 3 especies de maderas*. Resúmenes de ponencias del II Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales.

- Fuentes-Talavera, FJ, Silva-Guzmán, JA, Rodríguez-Anda, R., Lomelí-Ramírez, MG, Sanjuán-Dueñas, R., & Richter, HG. (2011). *Propiedades de resistencia y durabilidad natural de la madera de la rama de Aguacate (Persea americana Mill.)*. Madera y bosques. <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712011000100003&s>
- Geffert, A., Geffertova, J., & Dudiak, M. (2019). *Direct method of measuring the pH value of wood*. *Forests* 10: 6–10. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/10/852>
- Guzmán, J. A. S., Talavera, F. J. F., Richter, H. G., Álvarez, G. A., & Dueñas, R. S. (1999). *Estructura de la madera de Persea americana var. guatemalensis Mill (Hass)*. *Madera y Bosques*, 5(1), 53-59. <https://www.redalyc.org/pdf/617/61750106.pdf>
- Huang, L., Sun, W., Shuai, L., Luo, X., & Liu, J. (2023). Lignocelluloses-based furan-acetone adducts as wood adhesives for plywood production. *Polymers*. 15(4), 996. <https://doi.org/10.3390/polym15040996>
- Industry Intelligence Inc. (2024). Global Forest Watch. *Industry Intelligence*. <https://www.industryintel.com/news/mexico-has-lost-93-091-hectares-of-primary-forest-in-2024-enters-top-10-countries-with-highest-forest-loss-fires-caused-60-of-damage-with-over-8-000-incidents-global-forest-watch-171383786016>
- INEGI. (2020). Biblioteca digital de Mapa. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>.
- Ivars, J. D. (2013). *¿Recursos naturales o bienes comunes naturales?: Algunas reflexiones*. Papeles de trabajo-Centro de Estudios Interdisciplinarios en Etnolingüística y Antropología Sociocultural. <https://doi.org/10.35305/revista.v0i26.85>
- Li, X., Zhang, W., & Liu, S. (2023). Lignin-based adhesives for wood composites: A review. *Journal of Wood Chemistry and Technology*.
- Liu, K., Su, C., Ma, W., Li, H., Zeng, Z., & Li, L. (2020). Free formaldehyde reduction in urea-formaldehyde resin adhesive: Modifier addition effect and physicochemical property characterization. *Bioresources*, 15(1), 1–15. <https://doi.org/10.15376/biores.15.1.1-15>
- López Zapata, R. A., & Mesias Narvaez, J. C. (2020). *Elaboración y caracterización de tableros de partículas a partir del cuesco de la palma africana con adhesivo*

- biodegradable. Quito. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20622>
- Madrid, M. (1997). *Tecnología de la adhesión*. Departamento Técnico de Loctite España.
- Martín, M. H. C., Molina, O. A., García, M. A., & Rodríguez, L. E. S. (2004). *Tableros de madera de partículas*. *Ingeniería*, 8(3), 39-46.
<https://www.redalyc.org/pdf/467/46780304.pdf>
- Martínez-Pinillos C., E. y J. L. Martínez C. (1996). *Características de cepillado y lijado de 33 especies de madera*. *Madera y Bosques* 2:11-27.
<https://www.redalyc.org/pdf/617/61720203.pdf>
- Masera, O. R., M. J. Ordóñez y R. Dirzo. (1997). "Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios". *Climatic Change*, pp. 265-295.
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/488582>
- Ngabea, S. A. (2023). *Effect of Particle Size and Filler Content on Mechanical Properties of Avocado Wood Flour-Low Density Polyethylene Composite*. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 27(10), 2303-2313.
<https://www.mendeley.com/catalogue/b41b3917-c6dc-3cf1-8b07-1b4e4ae999ef/>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). *NMX-C-461-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Tableros de partículas de madera – Denominación, clasificación y especificaciones*. ONNCCE.
<https://www.onncce.org.mx>
- Pennington TD, J Sarakhan. (1998). *Arboles Tropicales de México*. Segunda edición. Universidad Autónoma de México.
[https://openlibrary.org/books/OL31453692M/Arboles tropicales de M%C3%A9xico](https://openlibrary.org/books/OL31453692M/Arboles_tropicales_de_M%C3%A9xico)
- Record S. J. y R. W. Hess. (1943). *Timbers of the New World*. Yale University Press, New Haven, Connecticut, EUA. 640 p.
- Rogel G., Ma. de los A. (1982). *Estudio anatómico de la madera de 6 especies tropicales*. *Bol. Tec. Inst. Nal. Invest. For.* 89:37-41.
- SAGARPA. (2017). *Planeación AGRICOLA NACIONAL 2017- 2030*. Ciudad de México: secretaria de Agricultura, ganadería. desarrollo rural, pesca y alimentación.
<https://www.revista-asyd.org/index.php/asyd/article/download/995/674/7359>
- Salas Larreta, F. (2021). *Emisión de formaldehído y resistencia a la humedad en tableros*

contrachapados. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales Ingeniería Forestal Industrial.
<https://www.researchgate.net/publication/364311156> EMISION DE FORMALDEHIDO Y RESISTENCIA A LA HUMEDAD EN TABLEROS CONTRACHAPADOS UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES INGENIERIA FORESTAL INDUSTRIAL

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Superficie sembrada de aguacate por entidad federativa*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.gob.mx/siap>

Smith, N.J.H., J.T. Williams, D.L. Plucknett y J.P. Talbot. (1992). *Tropical forests and their crops*. Comstock Publishing Assoc., Ithaca, New York, EUA. 568 p.

SNIGF, S. N. (06 de Mayo de 2020). Obtenido de <https://snigf.cnf.gob.mx/informacion-economica/>.

Soria-González, J. A., Tauro, R., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M., & Rutiaga-Quñones, J. G. (2022). *Avocado tree pruning pellets (Persea americana Mill.) for energy purposes: Characterization and quality evaluation*. *Energies*, 15(20), 7514.
<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/20/7514>

Sun, Q.-N., Hse, C.-Y., & Shupe, T. F. (2014). Effect of different catalysts on urea-formaldehyde resin synthesis. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(16), 40644.
<https://doi.org/10.1002/app.40644>

Talavera, F. F., Guzmán, J. S., Ramírez, M. L., Richter, H. G., & Dueñas, R. S. (2002). *Comportamiento higroscópico de la madera de persea americana var. guatemalensis mill (hass)*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1), 49-56.
<https://www.redalyc.org/pdf/629/62980106.pdf>

Tamarit U., J.C. (1996). *Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas*. *Madera y Bosques* 2:29-41.
<https://www.redalyc.org/pdf/617/61720204.pdf>

Tapia, Bastidas, C. V. (2007). *Elaboración de tableros de partícula fina a partir de residuos lignocelulósicos y resinas termoestables*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4759/1/7319.pdf>

Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., & Leao, A. (2009). *Elaboración de tableros de partícula*

fin a partir de residuos lignocelulósicos y resinas termoestables.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4759>

Tauro, R., Manrique, S., Franch-Pardo, I., Charre-Medellín, J. F., Ortega-Riascos, C. E., & Soria-González, J. A. (2024). *Spatial expansion of avocado in Mexico: Could the energy use of pruning residues offset orchard GHG emissions?* *Environment, Development and Sustainability*, 26, 27325–27350. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03762-4>

Vallejos, S. (2010). *Estudio de la reducción de emisión de formaldehído en las resinas de urea formaldehído. Tesis de Máster.* Universidad de Burgos, España. [https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259.1/97/Vallejos Calzada.pdf](https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259.1/97/Vallejos%20Calzada.pdf)

Velázquez, H. E. C., Galindo, A. S., & Facio, A. O. C. (2016). *Resinas termoestables de fenol-formaldehído.* *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 17(6). <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2016-covarrubias.pdf>

Vignote Peña, S., Jiménez Peris, F. j., Morales Méndez, E., & Gómez Pérez, C. (2000). *Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica.* Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Von Fraunhofer, J. A. (2012). Adhesion and cohesion. *International journal of dentistry*, 2012(1), 951324. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3296218/>

Wang, H., Zhang, Y., & Zhang, S. (2024). Constructing multiple bonding mechanisms with a novel phenol-urea-formaldehyde resin for wood adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(5), 1–9. <https://doi.org/10.1002/app.52283>

ANEXOS

1. Mediciones de las propiedades físicas y mecánicas de los tableros elaborados.

DENSIDAD kg/m ³			
CONTROL	PFF	PUF	PLF
800.12	712.91	502.64	594.49
793.50	702.68	547.00	531.54
788.83	770.23	523.78	603.41
787.64	720.12	535.30	508.99
812.62	725.34	647.26	782.52
785.04	730.56	514.81	468.76
784.44	732.78	779.62	514.38
798.53	735.90	719.28	429.99
816.19	726.97	760.74	555.26

HINCHAMIENTO %			
CONTROL	PFF	PUF	PLF
25.00	28.63	18.13	25.00
23.16	16.55	20.29	27.69
24.79	17.35	26.22	41.96
28.97	21.90	19.11	26.95
20.75	17.34	22.47	25.61
29.50	11.98	24.00	30.87
23.25	14.55	22.64	27.44
25.35	13.58	24.49	19.17
27.47	17.78	24.88	17.95

MOE MPa			
CONTROL	PFF	PUF	PLF
1887.50	2002.71	644.53	1701.13
1890.50	1968.34	736.24	1392.48
1888.90	2031.36	604.33	1581.23
1892.30	2382.64	761.26	1267.55
1886.70	2016.15	766.60	3846.72
1889.40	2257.36	761.83	1022.98
1891.10	1786.45	1656.16	1223.20
1894.60	1789.92	2075.98	1011.65
1890.13	2029.36	1000.87	1630.87

MOR MPa			
CONTROL	PFF	PUF	PLF
10.60	18.31	7.07	17.04
10.56	15.98	7.41	13.03
11.15	15.97	6.64	11.39
12.79	18.56	9.14	9.89
11.49	16.60	9.39	25.97
10.37	18.63	8.81	11.26
11.08	15.31	13.20	10.22
13.64	16.00	14.91	8.79
11.68	15.55	17.10	9.96

ABSORCIÓN %			
CONTROL	PFF	PUF	PLF
52.73	32.14	52.44	76.74
55.64	35.51	67.91	80.28
55.05	41.94	90.61	73.60
53.97	50.81	51.37	94.77
47.57	37.06	51.84	82.93
54.59	47.49	76.58	61.96
52.93	75.85	83.05	97.33
53.31	30.27	64.86	64.05
53.55	43.85	67.31	78.98

2. Mediciones microscópicas (μm) de *Persea americana*.

	RADIOS			POROS		FIBRAS				ELEMENTOS DE VASO
	Altura (40x)	Ancho (40x)	Por mm lineal (10x)	Diámetro (10x)	Por mm^2 (10x)	Longitud (10x)	Ancho (40x)	Diámetro de lumen (40x)	Grosor de pared (40x)	Longitud (10x)
1	100	22.5	6	40	9	707	27.5	18.75	8.75	333.3
2	62.5	10	5	77.5	11	909	30	16.25	13.75	313.1
3	162.5	20	6	72.5	15	717.1	35	23.75	11.25	323.2
4	225	20	7	87.5	8	757.5	22.5	15	7.5	363.6
5	87.5	15	8	82.5	6	707	35	25	10	353.5
6	75	17.5	6	77.5	10	929.2	50	32.5	17.5	202
7	67.5	12.5	7	77.5	11	686.8	31.25	17.5	13.75	262.6
8	125	22.5	7	87.5	10	777.7	27.5	20	7.5	303
9	100	17.5	8	80	10	858.5	32.5	23.75	8.75	343.4
10	112.5	15	7	50	13	838.3	25	16.25	8.75	343.4
11	137.5	25	7	72.5	12	757.5	30	23.75	6.25	303
12	70	15	7	90	13	717.1	25	16.25	8.75	272.7
13	75	20	9	77.5	8	818.1	30	21.25	8.75	303
14	60	12.5	8	45	12	888.8	40	31.25	8.75	202
15	82.5	17.5	8	80	8	828.2	42.5	35	7.5	282.8
16	70	15	6	55	16	707	30	21.25	8.75	313.1
17	50	20	5	52.5	8	646.4	30	18.75	11.25	363.6
18	87.5	20	7	57.5	16	787.8	27.5	13.75	13.75	272.7
19	95	17.5	9	52.5	10	777.7	32.5	18.75	13.75	333.3
20	72.5	12.5	7	80	10	989.8	35	22.5	12.5	303
21	62.5	15	8	62.5	9	1010	27.5	13.75	13.75	323.2
22	42.5	17.5	5	75	14	767.6	35	23.75	11.25	363.6
23	100	12.5	6	52.5	8	797.9	25	13.75	11.25	383.8
24	152.5	12.5	5	62.5	10	909	25	15	10	303
25	70	22.5	5	80	10	949.4	30	10	20	343.4
26	62.5	20	6	75	13	878.7	35	15	20	474.7
27	100	17.5	7	87.5	6	959.5	37.5	28.75	8.75	434.3
28	87.5	15	6	90	8	707	32.5	21.25	11.25	565.6
29	72.5	17.5	6	70	11	787.8	40	28.75	11.25	454.5
30	75	20	5	60	14	999.9	32.5	18.75	13.75	393.9
mínimo	42.5	10	5	40	6	646.4	22.5	10	6.25	202
máximo	225	25	9	90	16	1010	50	35	20	565.6
Promedio	91.42	17.25	6.63	70.33	10.63	813.54	31.96	20.67	11.29	337.68
moda	100	20	7	77.5	10	707	30	18.75	8.75	303

3. Clasificación de tableros de partícula según la norma EN 312:2010.

Tipo	Uso principal	Condiciones ambientales	Capacidad estructural	Propiedades generales	Ejemplos de aplicación
P1	Uso general	Seco	No estructural	Propiedades básicas, baja resistencia mecánica	Revestimientos interiores temporales o decorativos
P2	Mobiliario interior	Seco	No estructural	Mayor resistencia y mejor acabado superficial que P1	Muebles, repisas, interiores de armarios
P3	Uso general	Húmedo (ocasional)	No estructural	Resiste algo de humedad, con buena estabilidad dimensional	Muebles de baño, cocinas, recubrimientos interiores húmedos
P4	Construcción	Seco	Estructural	Buena resistencia a flexión y tracción interna	Paredes o pisos interiores que soportan carga
P5	Construcción	Húmedo (ocasional)	Estructural	Igual que P4, pero con resistencia adicional a la humedad	Revestimientos o pisos estructurales en zonas húmedas
P6	Construcción exigente	Seco	Alta resistencia estructural	Alta densidad, módulo elástico elevado, menor hinchamiento	Elementos estructurales interiores sometidos a carga
P7	Construcción exigente	Húmedo (ocasional)	Alta resistencia estructural	Máxima durabilidad y estabilidad en ambientes húmedos	Pisos, techos o muros estructurales expuestos a humedad

4. Valores típicos según la norma EN 312:2010 (aproximados de referencia).

Tipo	Resistencia a flexión (N/mm²)	Resistencia interna (N/mm²)	Hinchamiento 24 h (%)
P1	11 – 13	0.30 – 0.35	—
P2	13 – 15	0.40 – 0.45	—
P3	13 – 15	0.45 – 0.50	≤ 25
P4	14 – 16	0.45 – 0.50	≤ 25
P5	16 – 18	0.45 – 0.50	≤ 16
P6	18 – 20	0.60 – 0.65	≤ 16
P7	20 – 22	0.70 – 0.75	≤ 10

5. Clasificación de tableros de partículas según la NMX-C-461-ONNCCE-2010.

Tipo	Uso	Condición Ambiental	Resistencia a la Flexión (N/mm²)	Hinchamiento en Espesor 24 h (%)
Tipo I	Uso general	Seco	≥ 11.5	≤ 15
Tipo II	Mobiliario interior	Seco	≥ 13.0	≤ 12
Tipo III	Uso general	Húmedo	≥ 13.0	≤ 20
Tipo IV	Estructural	Seco	≥ 14.0	≤ 20
Tipo V	Estructural	Húmedo	≥ 16.0	≤ 18
Tipo VI	Alta exigencia estructural	Seco	≥ 18.0	≤ 16
Tipo VII	Alta exigencia estructural	Húmedo	≥ 20.0	≤ 10

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencias y tecnología de la madera	
Título del trabajo	EVALUACIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA DEL ÁRBOL Persea americana PARA EL DESARROLLO DE PANELES	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	María José Garfías Cázares	1808634j@umich.mx
Director	Pablo López Albarran	plopez@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Abril Munro Roja	abril.munro@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	Búsqueda de sinónimos

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Si	Traducción de palabras
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Si	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	Si	Elaboración de imágenes
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	María Jose Garfías Cázares 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán 11 de Noviembre 2025

María José Garfías Cázares

EVALUACIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA DEL ÁRBOL Persea americana PARA EL DESARROLLO DE PANELES...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:526419644

Fecha de entrega

11 nov 2025, 10:06 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

11 nov 2025, 10:11 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

EVALUACIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA DEL ÁRBOL Persea americana PARA EL DESARR....pdf

Tamaño del archivo

1.9 MB

52 páginas

13.541 palabras

83.581 caracteres

20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 20%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.