



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS
TECNOLÓGICAS DE LA MADERA EN EL
ÁNGULO MICROFIBRILAR DE *Pinus pseudostrabus*
var. *apulcensis* (Lindley) G.R. Shaw 1909**

TESIS

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

JHAZIEL SAUCEDO IBARRA

Bajo la supervisión de:

DRA. MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA



APROBADA



Chapingo, Estado de México, abril de 2021

INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA MADERA EN EL ÁNGULO MICROFIBRILAR DE *Pinus pseudostrabus* var. *apulcensis* (Lindley) G.R. Shaw 1909

Tesis realizada por **JHAZIEL SAUCEDO IBARRA** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



_____ **DRA. MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA**

ASESOR:



_____ **DR. JOSÉ TARCÍSIO LIMA**

ASESOR:



_____ **DR. ALEJANDRO CORONA AMBRIZ**

ASESOR:



_____ **DR. ROBERTO MACHUCA VELASCO**

CONTENIDO

DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DATOS BIOGRÁFICOS	vi
RESUMEN GENERAL	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	9
Antecedentes	9
Justificación	10
Planteamiento del problema	11
Objetivo general.....	12
Objetivos particulares.....	12
Preguntas de investigación	12
Hipótesis	13
Estructura del documento de titulación	13
Contenido temático	13
Literatura citada	15
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
2.1 Marco teórico	16
2.2 Marco de referencia	20
Literatura citada	32
CAPÍTULO 3. EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA MADERA SOBRE EL ÁNGULO MICROFIBRILAR DE <i>PINUS PSEUDOSTROBUS</i> VAR. <i>APULCENSIS</i>	36

DEDICATORIAS

A mi querida esposa, mi mejor amiga y compañera en este lindo viaje.

A mis Padres, mis ejemplos de trabajo y esfuerzo.

A mi familia, que siempre ha estado conmigo y me apoya incondicionalmente.

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi segunda casa, mi alma mater.

A Dios, por brindarme la vida y el logro de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que se me otorgó para la continuidad de mi preparación académica y para el logro de esta investigación.

A la Coordinación de Posgrado de la División de Ciencias Forestales, por su confianza y apoyo.

A la Dra. Ma. Amparo Borja de la Rosa, por ofrecerme su amistad, apoyo y dirección al realizar este trabajo de investigación.

A mi Comité Asesor integrado por el Dr. Alejandro Corona Ambriz, Dr. Roberto Machuca Velasco y Dr. José Tarcisio Lima por su comprensión, apoyo y buenos consejos.

Al director de la División de Ciencias Forestales, Dr. Ángel Leyva Ovalle por su apoyo y disposición durante el tiempo de contingencia sanitaria.

A la Sra. Adriana Acosta García, técnica del Laboratorio de Anatomía de la Madera de la División de Ciencias Forestales por su ayuda y prácticos consejos.

DATOS BIOGRÁFICOS



Jahaziel Saucedo Ibarra nació en Vicente Guerrero, Durango el 10 de marzo de 1988. Realizó su formación media superior en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

En 2010 obtuvo el título de Ingeniero Forestal Industrial en la misma casa de estudios. Desde 2010 a 2018 se desempeñó en diversas ramas profesionales. En 2019 inició sus estudios en la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA MADERA EN EL ÁNGULO MICROFIBRILAR DE *Pinus pseudostrabus* var. *apulcensis*¹

Para la industria forestal es importante contar con materia prima de alta calidad, que sea clave en la fabricación de productos acordes a las necesidades del mercado. Una de las características que más define la calidad de la madera para sus diversos usos es el ángulo microfibrilar. El objetivo del presente estudio fue determinar la relación del ángulo microfibrilar con la longitud de traqueidas, la densidad básica y la contracción volumétrica de la madera de *Pinus pseudostrabus* var. *apulcensis*. Se extrajo un núcleo a cada uno de 10 árboles de 36 años, elegidos al azar, a 1.30 m de altura, provenientes de una plantación en la Universidad Autónoma Chapingo. Se midió el ángulo microfibrilar en traqueidas individuales con microscopía de luz polarizada, se obtuvo un ángulo medio de 28.8°. Se determinó la densidad básica de la madera cuyo valor fue de 0.43 g/cm³. La longitud de traqueidas media fue de 3,516 µm. Se determinó la contracción volumétrica, se obtuvo una media de 10.3%. Se ajustó un modelo aditivo generalizado con el ángulo microfibrilar como variable respuesta y la densidad básica, la longitud de traqueidas y la contracción volumétrica como variables explicativas. El modelo logró explicar el 88.2% de la variabilidad total del AMF.

Palabras clave: densidad básica, longitud de traqueidas, contracción volumétrica, modelo aditivo generalizado, microscopía de luz polarizada.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jahaziel Saucedo Ibarra

Director de Tesis: Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa

ABSTRACT

INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WOOD ON MICROFIBRIL ANGLE OF *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*

For the forest industry it is important to have high quality raw material, which is key in the manufacture of products according to market needs. One of the characteristics that most defines the quality of wood for its various uses is the microfibril angle. The aim of this study was to determine the relationship between the microfibril angle and the tracheid length, basic density, and volumetric shrinkage in *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* wood. A core was extracted from each of 10 36-year-old trees, chosen at random, at 1.30 m stem height, from a plantation at the Universidad Autónoma Chapingo. Microfibril angle was measured in individual tracheid by polarized light microscopy; a mean angle of 28.8° was obtained. Basic density was determined, and its mean was 0.43 g/cm³. Mean tracheid length was 3,516 µm. Volumetric shrinkage was determined, an average of 10.3% was obtained. A generalized additive model was fitted with microfibril angle as the response variable and basic density, tracheid length, and volumetric shrinkage as explanatory variables. The resultant model managed to explain 88.2% of the total variability of the AMF.

Keywords: basic density, tracheid length, volumetric contraction, generalized additive model, polarized light microscopy.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Antecedentes

El término *ángulo microfibrilar* (AMF) en la ciencia de la madera se refiere al ángulo entre la dirección de los devanados helicoidales de las microfibrillas de la celulosa en la pared celular secundaria de fibras y traqueidas y el eje de la célula. El primer registro de estudios sobre la inclinación de las microfibrillas fue en 1864, cuando el científico alemán Nägeli observó estriaciones en las traqueidas de la pared celular de *Abies excelsa* acomodadas en hélice hacia la derecha, concluyendo que eso reflejaba la orientación de las moléculas de la celulosa en la pared celular, alineadas y paralelas entre ellas en micelios cristalinos (Barnett y Bonham, 2003).

El ángulo microfibrilar determina la estabilidad y la dureza de la madera en los primeros 10 a 15 anillos de crecimiento (Barber y Meylan, 1964). En 1998, Butterfield llevó a cabo una investigación en la que concluyó que el AMF es la característica con mayor influencia en la baja calidad de la madera de plantaciones de coníferas de rápido crecimiento.

Para los árboles en pie la rigidez, resistencia y punto de fractura que es la capacidad de absorber y disipar energía en condiciones dinámicas como fuertes ráfagas de viento son muy importantes. Gordon y Jeronimidis (1980) observaron que el punto específico de fractura para *Picea sitchensis* es superior al acero (con base en comparaciones del mismo peso). Más recientemente, Reiterer et al. (1999) mencionan, para *Picea abies*, un aumento significativo en la resistencia a la tensión cuando el valor de AMF es mayor. Posteriormente Reiterer et al. (2001) midieron el punto de fractura y observaron que la tensión máxima hasta la fractura ocurre alrededor de los 25-30°. Quizá la explicación de la diversidad de ángulos microfibrilares observada en la zona de madera juvenil debería explicarse con base en la fisiología del fuste y morfología funcional (Givnish, 1995). A su vez, la

capacidad de absorber energía debe estar vinculada a la abundancia de hemicelulosas que rodean las microfibrillas (Walker, 2006).

Según Donaldson (2008), existen diversos métodos para determinar el ángulo microfibrilar en la madera y los más utilizados son los siguientes:

1. **Microscopía de polarización**, se basa en que la celulosa es parcialmente cristalina y las microfibrillas están altamente alineadas. Esta técnica implica rotar las traqueidas o fibras en relación con el eje longitudinal de la célula hasta que el brillo observado en la pared celular se observe oscuro, que es conocida como la Posición de Máxima Extinción.
2. **Visualización directa usando métodos físicos o químicos**. Esta técnica se basa en la precipitación de cristales de yodo dentro de la pared celular o en la fibrilación mecánica para visualizar el AMF.
3. **Difracción de rayos X** es quizá la más popular actualmente y se basa en obtener el AMF midiendo las características de la reflexión ecuatorial 002 en los equipos de difracción de rayos X.
4. **Espectroscopía de luz infrarroja**. Esta técnica puede usarse para predecir el AMF escaneando la superficie de la madera sobre su cara radial usando técnicas de modelado multivariante.

La elección del método a utilizar depende en gran medida a los equipos disponibles. La técnica de rayos X, por ejemplo, ofrece mediciones para muestras grandes, mientras que las técnicas microscópicas ofrecen mediciones para una célula; así que la elección del método también depende de la naturaleza del estudio (Donaldson, 2008).

Justificación

Medir el ángulo microfibrilar y determinar su relación con las características tecnológicas de la madera es importante pues esta relación se podrá generalizar a otras especies del género *Pinus*. Esto a su vez, hará posible la estimación del AMF a partir de una característica tecnológica y no de mediciones en microscopio, las cuales llevan mayor tiempo y complejidad. La contracción de la madera, por

ejemplo, es una propiedad importante para el uso de la madera y siempre es interesante saber cómo influyen otras propiedades sobre esta característica, en particular el AMF. También es importante conocer la influencia del AMF sobre la longitud de traqueidas, ya que las fibras individuales se utilizan en la producción de pulpa celulósica, entre otras.

La madera tiene una estructura que combina perfectamente la resistencia con la flexibilidad. Esto se logra por la producción de complejas paredes celulares multicapas compuestas de microfibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de hemicelulosa y lignina. El ángulo de las microfibrillas de celulosa difiere entre las distintas capas de la pared celular secundaria y esto es lo que confiere la resistencia y durabilidad a la madera. (Brown y Saxena, 2007) La orientación y la organización de las microfibrillas de la celulosa contribuyen a las propiedades de la madera y la fibra procesada. La capa S2 es generalmente más gruesa que las otras capas y, por lo tanto, puede dominar las propiedades físicas y químicas de la pared celular. (Donaldson, 2008)

El ángulo microfibrilar tiene un efecto importante en las propiedades de la madera, en particular de la rigidez. Un ejemplo de esto es el AMF grande en la madera juvenil de las coníferas que determina una baja rigidez y le da flexibilidad al árbol para sobrevivir a los fuertes vientos sin quebrarse. (Barnett y Bonham, 2003). Por lo anterior, el estudio del AMF y la correlación con las características tecnológicas de la madera puede aportar conocimiento valioso a la industria forestal, pues de esta ultraestructura depende en gran medida la calidad y la capacidad de uso de los productos forestales: desde la celulosa para papel y productos desechables hasta columnas y vigas en la construcción.

Planteamiento del problema

El ángulo microfibrilar es la característica ultraestructural que mayor influencia tiene sobre la rigidez de la madera. Donaldson (2008) afirma que esta característica también se relaciona con la longitud de fibra en maderas de latifoliadas. Este estudio pretende determinar si la densidad básica, la longitud de

traqueidas y la contracción volumétrica se correlacionan con el ángulo microfibrilar en la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*. y, a su vez, generar un modelo que permita la estimación de dicha característica en especies del género *Pinus*. Lo anterior permitirá la predicción del ángulo microfibrilar mediante la medición de una característica física de la madera y aportará conocimiento sobre la relación existente. Así, la presente investigación tuvo los siguientes objetivos:

Objetivo general

Determinar la relación del ángulo microfibrilar con la longitud de traqueidas, la densidad básica y la contracción volumétrica de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*, mediante un modelo que explique estas características tecnológicas en función del ángulo microfibrilar.

Objetivos particulares

- Medir el ángulo microfibrilar de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*, mediante microscopía de luz polarizada, para relacionarlo con sus características tecnológicas.
- Determinar la densidad básica, la longitud de traqueidas y la contracción volumétrica de la madera.
- Aplicar un modelo no lineal que relacione la densidad básica, la longitud de traqueidas y la contracción volumétrica de la madera en función del ángulo microfibrilar.

Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación que motivan a este estudio son: Las características tecnológicas de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* ¿tienen influencia sobre el ángulo microfibrilar? Si así es, ¿Cuál es el modelo que se genera por esta correlación?

Hipótesis

Existe una correlación entre el ángulo microfibrilar y la densidad básica, contracción volumétrica y longitud de traqueidas de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* que permite generar un modelo que estima dicho ángulo.

Estructura del documento de titulación

El contenido de este documento tiene la siguiente estructura:

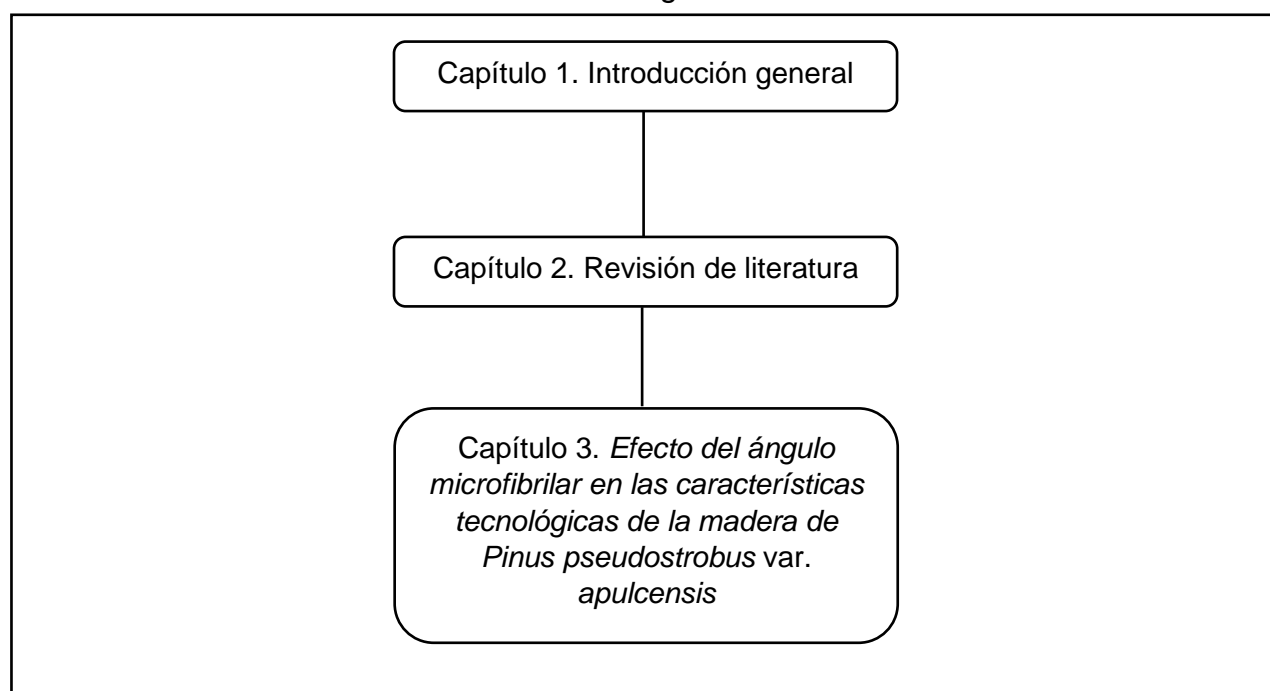


Fig. 1. Estructura del presente documento

Contenido temático

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes y la justificación de la presente investigación. Así como los objetivos y la hipótesis que se generó a partir de la pregunta de investigación.

En el capítulo 2 se detalla la revisión de literatura. Se presentan los conceptos teóricos importantes y su definición. Esto servirá como base teórica para el lector.

En el capítulo 3, *Efecto de las características tecnológicas de la madera sobre el ángulo microfibrilar de Pinus pseudostrobus var. apulcensis* se explican los métodos, resultados y conclusiones de la parte experimental de esta investigación.

Literatura citada

- Barber, N.F. and Meylan, B.A. (1964) The anisotropic shrinkage of wood. *Holzforschung*, 18(5): 146-56.
- Barnett, J.R. and Bonham, V.A. (2003). Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibers. *Biological Reviews*, 79: 461-472.
- Brown, R.M. & Saxena, I.M. (2007). *Cellulose: Molecular and Cellular Biology*. Springer. 355 p.
- Butterfield, B.G. (ed) (1998) *Proceeding of the IAWA/IUFRO Workshop on Microfibril angle in wood*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Donaldson, L. (2008). Microfibril angle: Measurement, variation and relationships – A review. *IAWA Journal*, 29(4):345-386.
- Givnish, T.J. (1995) Plant stems: biomechanical adaptation for energy capture and influence on species distributions. In Gartner BL (ed), *Plant stems: physiology and functional morphology*. Academic Press, San Diego 3-49.
- Gordon, J.E. and Jeronimidis, G. (1980) Composites with high work of fracture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A* 294 545-50.
- Reiterer A., Lichtenegger H., Fratzl P. and Stanzl-Tschegg S.E. (2001) Deformation and energy absorption of wood cell walls with different nanostructure under tensile loading. *Journal of Materials Science*, 36 4681-6.
- Reiterer A., Lichtenegger H., Tschegg S. and Fratzl P. (1999) Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in the wood cell walls. *Philosophical Magazine, A* 79(9) 2173-84.
- Walker, J.C.F. (2006) *Primary Wood Processing: Principles and Practice*, 2nd Edition. Springer, Netherlands. 603 pp.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo se divide en dos secciones. En la primera se expone el marco teórico, donde se definen diversos conceptos en la literatura que son relevantes y se toman como base para este trabajo. En la segunda parte, se presentan los artículos científicos los cuales conforman el marco de referencia de la presente investigación.

2.1 Marco teórico

Se seleccionaron los conceptos de mayor importancia para el sustento teórico de esta investigación. Se hizo una revisión de bibliografía para encontrar una definición e importancia de cada concepto.

El ángulo microfibrilar

La Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) al igual que otras organizaciones internacionales han acordado el término *ángulo microfibrilar* como el aceptado para referirse al ángulo formado entre el eje longitudinal de la célula vegetal y la inclinación de la microfibrilla. La orientación que tienen esas microfibrillas en la pared celular de la madera tiene un efecto importante sobre la calidad y estabilidad de la madera, en particular sobre las contracciones tangenciales y longitudinales (Zobel & Jett, 2012). Brown & Saxena (2007) mencionan que el AMF varía dependiendo en la edad y el tipo de madera. Por ejemplo, un AMF mayor en la madera juvenil y de reacción de coníferas resulta en un alto grado de flexibilidad. Además, los mismos autores mencionan que se han realizado algunas investigaciones sobre cómo se produce la orientación de las microfibrillas a nivel fisiológico.

Modelo aditivo generalizado

Ledder (2013) define un modelo matemático como un conjunto autónomo de fórmulas y/o ecuaciones basadas en una descripción cuantitativa aproximada de

fenómenos reales y creado con la esperanza de que el comportamiento que predice sea consistente con el comportamiento real en el que se basa.

Un modelo aditivo generalizado es un modelo lineal generalizado con un predictor lineal que involucra una suma de funciones de suavizado con covariables. En general, el modelo tiene una estructura de la forma:

$$g(\mu_i) = X\beta + f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{1i}, x_{2i}) + \dots$$

donde $\mu_i \equiv \mathbf{E}(Y_i)$ y $Y_i \sim \text{EF}(\mu_i, \phi)$. Y_i es la variable respuesta, $\text{EF}(\mu_i, \phi)$ denota una distribución de la familia exponencial con media μ_i y parámetro de escala ϕ y las $f_j(\cdot)$ son funciones de suavizado con covariables x_{ki} . (Wood, 2017).

Densidad básica de la madera

La propiedad física más importante de la madera es su densidad o peso específico. Con el conocimiento de esta propiedad, se puede determinar en gran medida la aptitud de la madera de una especie para un uso determinado. La densidad está íntimamente relacionada con la resistencia mecánica de la madera libre de defectos y con su conductividad térmica, entre otras propiedades (Echenique, 1993). Walker (2006) considera que la densidad de la madera debe determinarse cuando se conoce su contenido de humedad. En física, la densidad de un material se define como la masa por unidad de volumen (kg/m^3). Sin embargo, esto no es tan simple con la madera porque los cambios en el contenido de humedad afectan tanto su masa como su volumen. Por lo tanto, es necesario especificar el contenido de humedad de la madera, así como su densidad. Por lo cual existen diferentes tipos de densidad según el contenido de humedad:

$$\text{Densidad nominal} = \frac{Ph}{Vh}$$

Donde:

Ph : peso de la madera a cierto porcentaje de contenido de humedad

Vh : volumen a cierto porcentaje de contenido de humedad

La densidad básica se relaciona con una condición específica, derivable de la definición anterior:

$$\text{Densidad básica} = \frac{P_0}{V_v}$$

Donde:

P_0 : Peso de la madera en estado anhidro

V_v : Volumen de la madera en estado verde

El término "básica" enfatiza que los parámetros medidos, la madera seca en estufa y el volumen, tienen valores constantes y reproducibles. La densidad básica es el descriptor más útil de la densidad de la madera. Dentro de una especie y dentro de un árbol, generalmente existe una correlación negativa entre la densidad básica y el contenido de humedad, lo que indica que cuanto mayor es la densidad verde de la madera, menor es la densidad básica. Un material que tiene una baja densidad básica tiene un alto contenido de humedad y viceversa (Walker, 2006).

Longitud de traqueidas

Las traqueidas son células alargadas. Su longitud (1 a 10 mm) es regularmente 100 veces mayor que su ancho, son el componente principal de las maderas de coníferas y representan más del 90% del volumen de la madera y su función radica tanto en las necesidades conductoras como mecánicas de estas maderas (FPL, 2010).

Las traqueidas tienen los extremos cerrados llegando a punta en las paredes tangenciales y redondos en las paredes radiales. Las paredes celulares pueden ser delgadas o gruesas, dependiendo de la posición de las células dentro del anillo de crecimiento. En sección transversal, son aproximadamente cuadradas en la madera temprana y rectangulares en la tardía, con la dimensión radial menor que la tangencial. Las traqueidas tienen *puntuaciones areoladas* que son espacios que comunican lateralmente células entre sí. (Echenique, 1993).

La longitud de traqueidas en las maderas blandas varía tanto dentro de los anillos de crecimiento como en todo el fuste. Para *Pinus radiata*, la longitud de traqueidas y el grosor de la pared celular aumentan gradualmente con el número de anillo desde la médula. En esta especie se observó que la longitud de traqueidas promedio en los anillos cercanos a la médula es la doble de la que se encuentra en los 10 anillos cercanos a la corteza (Walker, 2006).

Bao et al. (2001) encontraron para siete maderas de coníferas que la longitud de traqueidas en el duramen era 21-52% más corta que en la albura, y para tres maderas de latifoliadas estudiadas, las fibras eran aproximadamente un 24% más cortas en el duramen (Walker, 2006).

Contracción volumétrica

Dado que la madera es un material higroscópico, se contrae al perder humedad o se expande en caso contrario cuando el contenido de humedad varía por debajo del punto de saturación de la fibra. En cierta manera se pueden definir los fenómenos de contracción y expansión como la disminución y el incremento de dimensiones de la madera por unidad de longitud o de volumen que ocurren durante la desorción y adsorción respectivamente (Echenique, 1993).

Aquellas maderas que tengan una densidad alta tendrán más sustancia madera por unidad de volumen, más cantidad de paredes celulares con más sitios en donde las cadenas de polisacáridos están poco organizadas y donde las moléculas de agua entren y salgan de estos lugares; de tal manera que las reducciones o incrementos en dimensiones, son grandes. Así que, conforme aumenta la densidad de la madera, los cambios dimensionales que pueden ocurrir, también aumentan en magnitud (Echenique, 1993).

La contracción en una pieza de madera tiene lugar a medida que la humedad se disipa más allá del punto de saturación de la fibra. La contracción paralela al grano de una pieza de madera es insignificante y mucho menor que la contracción perpendicular al grano. Los efectos de contracción en la madera pueden

minimizarse utilizando madera secada en estufa con un contenido de humedad de equilibrio del 15% o menos (Aghayere y Vigil, 2007).

La madera solo se contrae cuando se pierde agua de las paredes celulares y lo hace en proporción a la humedad perdida por debajo del punto de saturación de la fibra. La contracción volumétrica es proporcional al número de moléculas de agua que se adsorben dentro de la pared celular, y eso a su vez está relacionado con el número de hidroxilos accesibles en la celulosa, hemicelulosas y lignina y con la cantidad de material en la pared celular, es decir, la densidad básica de la madera. Las contracciones axial, radial y tangencial, que en conjunto representan la contracción volumétrica, están determinadas por las características de la estructura de madera que resisten la contracción, como la cantidad de células de rayos en la dirección radial, o por características ultraestructurales, como la tendencia de las microfibrillas a alinearse hacia la dirección axial (Walker, 2006).

2.2 Marco de referencia

En esta sección se presentan resultados y referencias de otras investigaciones sobre el ángulo microfibrilar. Se realizó una búsqueda de artículos de revistas científicas indizadas en JCR. Dichos documentos se revisaron y se hizo una descripción breve de los métodos, los resultados y conclusiones de diversas investigaciones que abordan la correlación del ángulo microfibrilar con ciertas propiedades de la madera.

Estudios científicos sobre el ángulo microfibrilar y su relación con otras características de la madera

Özparpucu et al. (2019) llevaron a cabo una investigación para evaluar la correlación entre el contenido de lignina y la rigidez de la madera. El AMF, un factor *crucial* del comportamiento mecánico de la madera fue determinado por difracción de rayos X de ángulo amplio (WAXD). Estas mediciones revelaron una media similar de alrededor de $15 \pm 1^\circ$. Los datos mostraron que existe una correlación positiva entre el contenido de lignina y la resistencia axial de la pared

celular cuando se tienen valores comparativamente bajos de AMF (aproximadamente 15°).

Knapic et al. (2018) evaluaron la variación vertical y horizontal en las características (densidad, AMF, rigidez, fibras y vasos) de madera juvenil de *Eucalyptus botryoides* y *E. maculata*. Lo anterior, utilizando mediciones con el sistema SilviScan®, sentando las bases para una investigación más grande de estas especies. El AMF se midió con un difractor de rayos X. Un haz de rayos X enfocado a las muestras de madera interactuó con su estructura, generando una secuencia radial de patrones de difracción. A partir de estos difractogramas, se estimó la variación radial del AMF de las fibras. Como resultado se obtuvo que ambas especies difieren en sus propiedades medidas. La variación del AMF representó el 85% y el 78% de la variación en la rigidez de la madera para *E. botryoides* y *E. maculata*, respectivamente.

Tanabe et al. (2018) estudiaron las propiedades de la madera (AMF, densidad, MOE y MOR) de nueve familias de *Picea glehnii* plantadas en Japón para determinar variaciones radiales dentro del árbol, entre familias y sus correlaciones. Se obtuvieron discos de 3 cm de grosor y 40 cm de largo entre 1.3 y 1.8 m de altura del árbol en pie. Pequeños cubos de madera de 5 x 5 x 5 mm se prepararon de cada lado de cada tira a cada quinto anillo de crecimiento. El AMF de la capa S2 de traqueidas de madera tardía se midió por el método del yodo. De los cubos se obtuvieron secciones radiales de 15 µm de grosor y luego fueron tratados con la solución de Schulze (100 ml de ácido nítrico al 35% con 6 g de clorato de potasio) por 15 minutos, se enjuagaron con agua destilada y se deshidrataron a través de etanol graduado. Después se sumergieron en una solución de yodo-potasio al 2% y a cada sección se le aplicó una gota de ácido nítrico al 60%.

Los AMF se obtuvieron con un microscopio de luz (CX-41, Olympus Corporation, Tokio, Japón). El AMF se midió para cada traqueida de madera tardía usando ImageJ® sobre las microfotografías digitales. Se realizó la medición de 30 traqueidas y se determinó la media. Se obtuvieron valores medios de AMF ($9.7 \pm 0.6^\circ$), densidad anhidra (0.42 g/cm^3) y MOE ($8.19 \pm 0.45 \text{ GPa}$). Hubo diferencias

significativas en las propiedades de la madera entre las 6 familias, particularmente entre el sexto y quinceavo anillo de crecimiento, sugiriendo una contribución mayor de efectos genéticos para esos rasgos en esas posiciones. Por lo tanto, hacer mejoramiento genético enfocado en las propiedades de la madera para producir madera de alta calidad de *P. glehnii* pudiera ser más efectivo evaluando a la madera entre el sexto y el quinceavo anillo de crecimiento desde la médula.

Melo et al. (2018) investigaron la variación de la longitud de fibra y la densidad de la madera desde la médula hasta la corteza. El objetivo principal consistió en estimar el AMF de la madera de *Eucalyptus microcorys* a través de esos parámetros. Se usaron muestras de tres árboles de 37 años de una plantación, tomadas de entre los tres y seis metros de altura del árbol. El AMF se determinó en 30 fibras de cada muestra usando el método de microscopía con luz polarizada. Se obtuvieron valores promedio de AMF (12.6°), densidad básica (480 kg/m^3) y longitud de fibras ($968 \mu\text{m}$). Como resultado, a partir de la longitud de las fibras de la madera de esta especie se puede obtener un buen estimador del AMF y su comportamiento en la dirección de la médula a la corteza.

Hein et al. (2015) estudiaron 150 individuos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* de 6 años. Se seleccionaron árboles saludables. Se estimaron los valores de AMF mediante patrones de difracción de rayos X colectados usando la fórmula de Yamamoto de 1993. Como resultados, este estudio estableció la variación espacial de la densidad básica, rigidez y AMF en árboles de eucalipto. Se encontró que la densidad tuvo una variación significativa de la médula a la corteza con valores de 460 kg/m^3 y 600 kg/m^3 respectivamente. Los valores de AMF oscilaron entre 7° y 14° , y se presentó una reducción promedio en AMF de la médula a la corteza en 4.4° . La variación espacial de la rigidez de la madera parece ser sensible a la variación del pendiente del terreno y la velocidad del viento. Considerando los valores absolutos, el estudio reveló que los clones producen madera significativamente más densa en los sitios donde la velocidad del aire es mayor, la temperatura media anual es menor y el suelo es Inceptisol. La variación espacial en los fustes indica que los árboles son capaces de adaptar

su madera de acuerdo con las condiciones ambientales cambiantes a fin de resolver sus restricciones biomecánicas.

Auty et al. (2017) compararon los efectos de la reposición en la variación radial en la densidad de la madera y su AMF. Para medir el AMF de la madera se obtuvieron tiras de madera verde de 7 mm en la dirección longitudinal y de 2 mm en la dirección tangencial. Estas tiras se acondicionaron a una atmósfera de 40% HR y 20°C, lo cual corresponde a una humedad en equilibrio de 7 a 8%. Las mediciones de difracción de rayos X se hicieron a 50 μm de resolución y el AMF medio se determinó en intervalos de 5 mm. Hubo un decremento no lineal en el AMF de una media de 30° en la médula a una media de 16° en la zona de madera madura. Los resultados aportan a anteriores investigaciones mostrando un efecto significativo de amplios espacios en la densidad de la madera y en su AMF. Desde la perspectiva del manejo forestal, la reposición temprana resultará en una reducción en la densidad de la madera.

Wang et al. (2016) evaluaron el rango de crecimiento de *Populus deltoides* y dos de sus híbridos, observaron su anatomía de la madera, determinaron las propiedades micromecánicas de las paredes celulares y luego compararon las diferencias de rasgos de crecimiento y las propiedades de la madera de las paredes celulares entre tres clones de *Populus* en su etapa de desarrollo temprano. Se determinó el AMF mediante un difractómetro de rayos X con un tamaño de las muestras de 1.5 x 10 mm. La media de los valores AMF fue calculada de acuerdo con el método desarrollado por Cave y Meylan; esto es, $\text{AMF}=0.6T$, siendo T el parámetro tomado de las tangentes dibujadas en los puntos de inflexión. Los valores de AMF de la pared celular oscilaron entre 11.5° y 16.7°. Cada muestra de madera se montó de tal manera que quedara perpendicular al rayo X. El rayo pasó a través de la cara tangencial de la muestra y el ángulo entre la trayectoria óptica recibida y el rayo incidente fue de 22.4°. Como resultados, hubo variación entre el *Populus* puro y sus híbridos. En estos últimos, la doble pared de las fibras fue más delgada.

En una investigación sobre el secado de la madera y el efecto en sus propiedades mecánicas en la madera de cicuta, Lube et al. (2016) observaron que, contrario a lo que se creía, después del proceso de secado los valores de AMF se incrementaron entre 4.88 y 15.55% (1.13 y 3.2°, respectivamente). Los valores de AMF se calcularon mediante la técnica de difracción de rayos X. Se obtuvo el arco de difracción T a partir de la cara tangencial de las muestras antes y después del secado usando el equipo Bruker-AXS D8 Discover. Los valores T se obtuvieron basados en el principio de la difracción angular en el modo de transmisión. Como resultado se observaron cambios significativos en los valores de AMF cuando las muestras se secaron al 15 y al 8% de humedad (4.88 y 15.55%, respectivamente). Por lo cual se puede deducir que el reordenamiento microfibrilar ocurre por la evaporación del agua durante el secado.

Mannan et al. (2016) implementaron el uso de la matriz de Mueller para determinar el ángulo microfibrilar en bambú midiendo un grupo de fibras y parénquima por su sección transversal. Para construir una matriz de Mueller, los experimentos se condujeron usando una combinación de polarizadores y placas de cuarto de onda a diferentes orientaciones y elementos ópticos acomodados en modo de transmisión. Se obtuvieron 16 imágenes para construir la matriz de Mueller, de las cuales se seleccionaron áreas de interés más pequeñas. Se calcularon matrices de Mueller para cada píxel de esas imágenes. Se encontraron valores de AMF en la pared celular de las fibras de entre 4 y 29°, con un AMF promedio de 15° y en la pared celular del parénquima se encontró un AMF promedio de 35°. Se tuvieron como conclusiones que la técnica utilizada es una manera rápida, fácil y redituable para determinar el AMF. Este método permitió una medición simultánea de AMF de diversas fibras y parénquima independientemente de la forma de las células.

Vanerek et al. (2016) estudiaron la influencia del AMF de las células de la madera temprana y madera tardía con los parámetros de rigidez de la madera de *Picea abies*. Para medir el AMF se utilizó la microscopía de luz polarizada, que es un método que se basa en las propiedades ópticas de la celulosa. La manera más común de medir el AMF usando esas propiedades es buscando la posición de

extinción y luego medir el ángulo entre esa posición de extinción y el eje longitudinal de la célula. Se obtuvieron valores de AMF de entre 7.8° y 29° . De los resultados obtenidos se concluye que para todas las muestras probadas no hay evidencia de diferencias significativas entre los valores de AMF en madera temprana y madera tardía. Sin embargo, si hay diferencia significativa entre los valores de AMF entre anillos de crecimiento.

Wang et al. (2016) observaron las propiedades de tensión longitudinal en función del contenido de humedad y el AMF inicial. Se tomaron muestras de $30 \times 10 \times 0.5$ mm de un árbol de *Pinus massoniana* de 30 años, después de un proceso de secado de tres meses. Las mediciones de AMF se hicieron usando un sistema de difracción de rayos X. Las muestras se fijaron perpendicularmente al haz de rayos X, el cual pasó a través de la cara tangencial, cerca del centro del espécimen. El ángulo entre el incidente y el haz de rayos X se fijó en 22.4° , el cual es el ángulo característico de difracción de la cara cristalina de la celulosa. Los valores de AMF para esta especie oscilaron entre 12.5° y 42° . Los resultados indican que las propiedades longitudinales de tensión de la madera tienen una correlación altamente negativa para el AMF y el contenido de humedad. A valores más altos de AMF, los cambios en el contenido de humedad influyeron en mayor medida en la sensibilidad de los dos indicadores mecánicos.

Winck et al. (2015) determinaron la influencia de la intensidad de raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera a partir de una muestra de 24 individuos de *Pinus taeda*. Los experimentos se hicieron con madera en estado verde. El AMF se midió con la técnica de Huang (1998) y Wang (2001) a través de las puntuaciones, utilizando el software UTHSCSA "Image Tool" para Windows. Para medir el espesor de pared y AMF se tomaron microfotografías de las traqueidas con un aumento de 1000X. En la fotomicrografía de cada traqueida se midieron tres AMFs. Como resultado, la aplicación de un raleo del 0% y el 50% de la densidad original de la plantación favoreció la obtención de madera con mayor espesor de pared celular y menor AMF (30.8°); mientras que con un raleo de 75%

se obtuvo un AMF promedio de 32° y con el tratamiento de 87.5% de raleo de la densidad original, se obtuvo un AMF de 34°.

Hirvonen et al. (2014) implementaron un método para medir el AMF de fibras de papel en un micro-robot diseñado para probar las propiedades mecánicas de las fibras. El método está basado en elipsometría de transmisión microscópica y los componentes requeridos para las mediciones están integrados en la plataforma y el algoritmo de cómputo usado se desarrolló en Matlab. Se midieron los AMF de 11 fibras de pulpa para papel para demostrar la funcionalidad del sistema. Para realizar una medición, al sistema le tomó 20 segundos. Los resultados son prometedores, pero aún se requiere su validación. Se obtuvieron valores de AMF entre 5° y 35°. Este sistema es el primero en su tipo para medir AMF de manera automatizada.

Lima et al. (2014) evaluaron el comportamiento del AMF en la madera de *Eucalyptus grandis* de 25 años, en relación con la edad cambial. El AMF fue medido usando la técnica de microscopía de luz polarizada, propuesta por Preston en 1974, usando un microscopio Olympus BX51, equipado con platina rotatoria graduada de 0 a 360°. El valor de AMF fue el valor medio de las muestras medidas, el cual fue de 23.5°

Wanju et al. (2014) utilizaron la técnica de nano indentación para determinar la deformación y las propiedades mecánicas de las paredes celulares del pino de Masson (*Pinus massoniana*) con tres diferentes contenidos de humedad (5%, 8% y 11%) y tres diferentes valores de AMF (16°, 27° y 38°). Para realizar la medición del AMF se utilizó un difractómetro de rayos X (Xpert Pro; Panalytical). Un haz de rayos X enfocado se aplicó a las caras tangenciales con un ángulo de escaneo de 0 a 360°. A partir de las curvas de intensidad de difracción, el AMF de las paredes celulares se determinó mediante el método de Cave de 1966 del 0.6T. Se encontró que el MOE disminuyó con el aumento del contenido de humedad de 5% a 11%. El AMF tuvo una influencia negativa en el MOE de la pared celular para todos los valores de contenido de humedad (Para las muestras con AMF de 16°, se observó un MOE promedio de 17.18 GPa; para las muestras con AMF de 27°,

se observó un MOE de 14.11 GPa y para las muestras con AMF de 38°, un MOE de 13.21 GPa). La dureza de la pared celular disminuyó cuando se aumentó el contenido de humedad para los tres valores de AMF estudiados, mientras que el efecto de AMF fue insignificante (promedio de 0.03 GPa en los tres casos).

Auty et al. (2013) desarrollaron un modelo para la predicción de la variación del AMF en los fustes de pino silvestre de plantación con el objetivo específico de cuantificar la influencia adicional del rango de crecimiento sobre el patrón radial de variación. Se utilizó el SilviScan-3 que está diseñado para analizar muestras de 2 mm en la cara tangencial y 7 mm en la dirección longitudinal. Se obtuvieron 120 muestras rodaja de 15 cm de grosor de 24 árboles. Se sumergieron en acetona por 24 horas para eliminar los extractivos. Posteriormente se escanearon en la dirección radial-tangencial usando un difractómetro de rayos X y el AMF medio se calculó sobre intervalos de 5 mm a lo largo de cada muestra. Se obtuvo un valor de AMF promedio de 13.5° y un ancho de anillos promedio de 1.9 mm. La variación del AMF en función de los anillos de crecimiento resultó ser una curva exponencial negativa. Además, se observó variación significativa en el AMF a lo largo del fuste (de 8° a 34°). Esto es un reto para la industria maderera puesto que la proporción de madera juvenil cambia debido al crecimiento rápido, y esto pudiera tener un impacto negativo en rendimientos de madera para uso estructural. Los componentes del modelo mostraron que el AMF explicó el 90% de la variación datos.

Hein et al. (2012) usaron espectroscopía en infrarrojo cercano (NIR) para estimar el AMF de celulosa de la pared celular en madera juvenil de Eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*). Se usaron treinta discos de madera de 30 mm de espesor obtenidos de madera de Eucalipto de seis años. El AMF fue estimado por difracción de rayos X usando el difractómetro Gemini-S, Agilent Technologies, Yarnton, UK. El método propuesto por Yamamoto et al. en 1993 se aplicó para estimar el AMF con base en su patrón de difracción de rayos X. Se encontraron valores de AMF de 4.1° a 19.5° para esta especie. Como conclusiones, fue posible determinar calibraciones para estimar el AMF en madera de eucalipto con base en

los espectros de NIR. La asociación de difracción de rayos X y espectroscopia NIR para evaluar el AMF en estas maderas presentó dos ventajas: velocidad y precisión para distinguir entre las clases de maderas evaluadas. Las calibraciones para AMF a partir de NIR producen estimaciones con error estándar de aproximadamente 1.31°.

Tabet et al. (2012) sugieren un modelo de regresión para la edad contra el ángulo microfibrilar para la madera de *Acacia mangium*. Además de estimar la edad óptima en la que se produce mayor cantidad de celulosa cristalina. Se utilizó un difractómetro de rayos X Philips X-Pert PRO PW3040/60 para determinar el ángulo microfibrilar promedio. Se aplicó un rayo focalizado a la sección transversal de las muestras que se cortaron en 200 µm de grosor x 2 mm de largo en un microtomo. Para determinar el AMF se tomó el pico más alto de intensidad de difracción al aplicar el rayo X y luego se estimó usando la ecuación de Meylan de 1967. Como resultados se obtuvieron modelos de regresión y los valores de AMF entre 3° y 15°, se recomienda mayor investigación en AMF, dureza, densidad e intensidad como variables para hacer otros modelos.

Winck et al. (2012) midieron el AMF empleando la técnica de la orientación de las puntuaciones y de los campos de cruzamiento en la pared de las traqueidas, determinaron la densidad básica y verificaron la correlación entre ambas variables. Como resultado se obtuvo que en los árboles de *Pinus taeda* evaluados, el AMF disminuye desde la médula (56.2°) y la densidad básica aumenta en el mismo sentido. Existe una relación moderada y negativa entre el AMF y la densidad básica ($R=-0.59$), por lo que estas propiedades, acompañadas de otros caracteres de la madera podrían ser excelentes indicadores de su calidad.

Zhen-fu et al. (2012) utilizaron difracción de rayos X para medir el AMF y la cristalinidad de la madera de *Pinus elliottii* de una plantación. Los resultados muestran que el AMF disminuye desde la médula a la corteza (32° en la médula a 14° en la corteza). Observaron que el AMF de la madera tardía es más pequeño que el de la madera temprana en el mismo anillo. El AMF se incrementa desde la base hacia la parte alta del árbol (de 35° en la base a 22° en la copa). La

cristalinidad aumenta desde la médula hacia la corteza y se mantiene (30% en la médula a 50% en la corteza).

Brennan et al. (2012) realizaron una comparación entre el AMF, hinchamiento longitudinal y composiciones de la pared celular de cuatro tipos de madera. Para ello, se plantaron árboles de *Pinus radiata* en un invernadero: rectos para producir madera normal, inclinados a 45° para producir madera de reacción y de compresión y completamente inclinados para madera flexionada. Se examinaron las relaciones entre el hinchamiento longitudinal de las muestras, su AMF y su composición. Para calcular el AMF se utilizó un difractómetro de rayos X. Se calculó el AMF luego de obtener el perfil de difracción azimutal, de acuerdo con el enfoque de varianza de Evans en 1999. Aunque no hubo una diferencia significativa en el AMF ($p = 0.243$) entre los cuatro tipos de madera, la madera de compresión tuvo el mayor hinchamiento (AMF promedio = 35.9°). Un contenido de lignina mayor al 32% y el contenido de residuo de galactosilo mayor al 6% fueron características que sobresalieron en la madera de compresión. Encontraron que existe relación entre el contenido de lignina y el hinchamiento longitudinal y también hay relación entre el contenido de residuo de galactosilo y el hinchamiento longitudinal.

Alves et al. (2011) caracterizaron radialmente la anatomía de la madera de *Eucalyptus grandis* a fin de identificar la zona de transición entre la madera juvenil y la madera madura. Para determinar el AMF, se obtuvieron cortes histológicos del plano tangencial con cerca de 10 μm para cada muestra de los tres árboles. Los ángulos se determinaron usando el método de microscopía de luz polarizada en un microscopio con una platina con disco giratorio de 360°. Todas las dimensiones así tomadas, desde las dimensiones de las fibras, diámetro de los vasos, porcentaje de elementos anatómicos y AMF se analizaron para verificar cómo estas variables se relacionan en los dos tipos de madera (juvenil y madura). Como resultados se obtuvieron valores de AMF entre 23.8 a 30.2° y se determinó que la transición entre madera juvenil y madura ocurre entre el quinto y el onceavo año

de crecimiento y en cuanto al porcentaje de fibras, vasos, parénquima axial y rayos, no se presentó variación en el sentido médula-corteza.

Tabet y Abdul (2010) estudiaron un método para determinar el ángulo microfibrilar usando rayos X de ángulo corto. Se usaron muestras de *Acacia mangium* de una plantación de 10 años. Se encapsularon en plástico para evitar su secado en la cámara al vacío del equipo de rayos X. Se utilizó un aparato SAXS (Generador de rayos X HMBG-SWAX, SAXS PW 3830) para determinar el AMF en cada uno de los ocho árboles investigados. Los resultados mostraron que el AMF varió de 18° a una distancia de 10 mm desde el centro de la médula hasta 30.6° a 90 mm de la médula.

Donaldson (2008) afirma que el AMF es quizá la variable ultraestructural más sencilla de medir en la pared celular. Debido a que la celulosa es cristalina, el AMF de la capa S2 puede ser medido por difracción de rayos X. El SilviScan® ha producido grandes bases de datos para un rango de especies maderables usando núcleos como muestras. En coníferas, el AMF es grande en la madera juvenil y pequeño en la madera madura. El AMF es más grande en la base del árbol para un número dado de anillos de crecimiento desde la médula y disminuye con la altura. En las latifoliadas, ocurren patrones similares, pero con mucha menor variación y AMF más pequeños en la madera juvenil.

El interés de los estudios se concentra en el AMF de la capa S2 de la pared celular, la cual domina las propiedades de resistencia a la tracción de las traqueidas y fibras, sin embargo, poca atención se ha dado a las capas S1 y S3 que pueden influir a la resistencia a la compresión y otras propiedades laterales. La importancia comercial del AMF radica en la relación con la calidad de la madera y está bien establecida para las maderas de coníferas, pero no así para las latifoliadas. Se requiere mayor caracterización de éstas, así como investigaciones que correlacionen el AMF con la longitud de las traqueidas, diámetro de lumen, química y grosor de la pared celular (Donaldson, 2008).

Baettig et al. (2007) estudiaron la posibilidad de utilizar fuentes policromáticas de rayos X en experimentos relacionados con la madera, en que normalmente se

requiere de fuentes monocromáticas. Se utilizaron dos equipos de rayos X diseñados en Nancy, Francia. En ellos se realizó un experimento de determinación de la evolución espaciotemporal del contenido de humedad de la madera y de densidad, tanto en madera húmeda como en la seca, mediante la transmisión de rayos X en la cámara de secado multipropósito. Como resultado, se determinó que existe factibilidad técnica de utilizar radiaciones policromáticas o rayos X provenientes directamente desde tubos, sin pasar por monocromatizadores. Se probó que hay una pérdida mucho más lenta en el interior de la madera que en su periferia. Además, se cree haber encontrado una alternativa promisoriosa para la estimación del ángulo microfibrilar de la madera, usando un dispositivo de relativa simplicidad.

Lichtenegger et al. (1999) aplicaron la tecnología de dispersión de ángulo pequeño de rayos X para la determinación sistemática del AMF de la capa S2 de la pared celular en función de la distancia desde la médula. El espesor del haz de rayos X fue de 200 μm . Se usaron muestras de *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Quercus rubur* y *Fagus sylvatica*. Se compararon las variaciones del AMF desde la médula hacia la corteza y se discutieron las diferencias a fin de encontrar una optimización mecánica de la madera en función del AMF. Como principales resultados se obtuvo que, aunque hubo diferencias considerables en el AMF entre anillos de crecimiento, el AMF disminuye desde la médula hacia la corteza en los cuatro árboles. Además, los AMF de las dos especies de latifoliadas fueron generalmente menores a los de las otras dos especies de coníferas. Los valores medios de AMF fueron para *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Quercus rubur* y *Fagus sylvatica* de 19.9, 29, 23.3 y 13.9° respectivamente. Se sugiere una interpretación de esos resultados en términos de una optimización mecánica para diferentes valores de AMF.

Literatura citada

- Aghayere, A. and Vigil, J. (2007) Structural Wood Design: A practice-oriented approach using the ASD method. John Wiley & Sons. Canada. 407 pp.
- Alves, L.M., de Figueiredo, J., Scaramussa, M., de Souza, M., García R. y Monteiro de Carvalho, A. (2011). Radial variation of wood anatomical characters of *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden and age transition between adult and juvenile Wood. *Scientia Forestalis* 39(92): 411-418.
- Auty, D., Gardiner, B., Achim, A., Moore, J.R., Cameron, A.D. (2013). Models for predicting microfibril angle variation in Scots pine. *Annals of Forest Science*, 70:209-218.
- Auty, D., Moore, J., Achim, A., Lyon, A., Mochan, S. y Gardiner, B. (2017). Effects of early respacing on the density and microfibril angle of Sitka spruce wood. *Forestry*, 91:307-319.
- Baettig, R., Perré, P. y Rémond, R. (2007). Aplicación de espectrometría de rayos X para el estudio de la madera: algunos resultados iniciales. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 9(3): 271-283.
- Bao, F.C., Jjiang Z.H., Jiang X.M., Lu X.X. and Luo X.Q. (1998) Comparative studies on wood properties. *Scientia Silvae Sinicae*, 34(2) 63-75.
- Bierman, C.J. (1996). *Handbook of Pulping and Papermaking*. 2nd Edition. Academic Press. 754 p.
- Brennan, M., McLean, J.P., Altaner, C.M., Ralph, J. y Harris, P.J. (2012). Cellulose microfibril angles and cell-wall polymers in different wood types of *Pinus radiata*. *Cellulose*, 19; 1385-1404.
- Brown, R.M. & Saxena, I.M. (2007). *Cellulose: Molecular and Cellular Biology*. Springer. 355 p.
- de Lima; L.E., Lopes, S., Ribeiro, B.M., Guimaraes, R.M., Junqueira, C. y Lima, J. (2018). Prediction of microfibril angle for *Eucalyptus microcorys* wood by fiber length and basic density. *Madera. Ciencia y tecnología*, 20(4):553-562.
- Dvorak, W.S. and Donahue, J.K. (1992) CAMCORE cooperative research review 1980-1992. Department of Forestry, North Carolina State University, Raleigh, USA, 93 pp.
- Eguiluz P., T. (1988) Distribución natural de los pinos en Mexico. Centro de Genética Forestal, Chapingo, Mexico, Nota Técnica No. 1. 6 pp.
- Hein, P. R. G., Chaix, G., Clair, B., Brancheriau, L., & Gril, J. (2015). Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along *Eucalyptus* trunks grown under contrasting growth conditions. *Trees*, 30(3), 871–882.

- Hein, P.R., Lima, J., Trugilho, P.F. y Chaix, G. (2012). Estimativa do Angulo Microfibrilar em Madeira de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* por Meio da Espectroscopia no Infravermelho Próximo. *Floresta e Ambiente*, 19(2): 194-199.
- Hirvonen, J., Kourosch, S., Palovuori, K. y Kallio, P. (2015). Semi-Automatic Measurement of Microfibril Angle on a Microrobotic Platform. Conference paper. 5 pp.
- Knapic, S., Grahn, T., Lundqvist, S. y Pereira, H. (2018). Juvenile Wood Characterization of *Eucalyptus botryoides* and *E. maculate* by using SilviScan. *BioResources*, 13(2): 2342-2355.
- Lichtenegger, H., Reiterer, A., Stanzl-Tschegg, S.E. y Fratzl, P. (1999). Variation of Cellulose Microfibril Angles in Softwoods and Hardwoods – A Possible Strategy of Mechanical Optimization. *Journal of Structural Biology*, 128:257-269.
- Lima, J., de Oliveira, A. y Rezende, C. (2014). Microfibril angle of *Eucalyptus grandis* wood in relation to the cambial age. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(4): 487-494.
- Loock, E.E.M. (1977) The pines of Mexico and British Honduras. Department of Forestry, Pretoria, South Africa, Bulletin No. 35, 246-249.
- Lube, V., Lazarescu, C., Mansfield, S.D. y Avramidis, S. (2016). Wood microfibril angle variation after drying. *Holzforschung*, 70(5):485-488.
- Mannan, S., Zaffar, M., Pradhan, A. y Basu, S. (2016). Measurement of microfibril angles in bamboo using Mueller matrix imaging. *Applied optics*, 55(32): 8971-8977.
- Nick, P. (2002). *Plant Microtubules: Potential for Biotechnology*. Springer.
- Özparpucu, M., Gierlinger, N., Cesarino, I., Burgert, I., Boerjan, W. y Ruggeberg, M. (2019). Significant influence of lignin on axial stiffness of poplar wood at low microfibril angle under wet conditions. *Journal of Experimental Botany*, erz 180. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz180>
- Paz, O.P. y Olvera, C.P. (1981) Anatomía de la madera de 16 especies de coníferas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Ciudad de México, Mexico, Boletín Técnico No. 69, 111 pp.
- Perry, J.P. Jr. (1991) The pines of Mexico and Central America. Timber Press, Portland, Oregon, USA, 231 pp.
- Rowell, R.M. (2005). *Wood Chemistry and Wood Composites*. Taylor & Francis Group. 470 p.
- Schimleck, L., Evans, R., Jones, P.D., Daniels, R.F., Peter, G.F. y Clark III, A. (2005). Estimation of microfibril angle and stiffness by near infrared

- spectroscopy using sample sets having limited wood density variation. *IAWA Journal*, 26(2): 175-187.
- Standley, P.C. (1926) Trees and shrubs of Mexico. Contributions from the United States National Herbarium, Washington, DC, USA, Volume 23, 1721 pp.
- Tabet, T.A. Abdul, F. y Abdulla, N. (2012). Modeling Microfibril Angle and Tree Age in Acacia Mangium Wood Using X-Ray Diffraction Technique. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 2(5): 338-341.
- Tabet, T.A. y Abdul, F.H. (2010). Estimation of the Cellulose Microfibril Angle in *Acacia mangium* Wood Using Small-Angle X-Ray Scattering. *Journal of Agricultural Science*, 2(4):139-148.
- Tanabe, J., Ishiguri, F., Tamura, A., Takashima, Y., Ohshima, J.... y Yokota, S. (2018). Within-tree radial and among-family variations in wood density, microfibril angle, and mechanical properties in *Picea glehnii*. *Silva Fennica*, 52(2):10.14214/sf.9914.
- Vanerek, J., Martinek, R., Cada, P. y Kuklik, P. (2016). The influence of microfibril angle on the wood stiffness parameters. *Procedia Engineering*, 195: 259-264.
- Verrill, S., Kretschmann, D., Herian, V., Wiemann, M. y Alden, H. (2010). Concerns about variance approach to the x-ray diffractometric estimation of microfibril angle in wood. *Research Paper*, Madison, WI, Departament of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 92 pp.
- Via, B.K., So, C.L., Shupe, T.F., Groom, L.H. y Wikaira, J. (2009). Mechanical response of longleaf pine to variation in microfibril angle, chemistry associated wavelengths, density, and radial position. *Composites: Part A*, 40: 60-66.
- Wang, H. Yu, Z., Zhang, X., Ren, D. y Yu, Y. (2017). The combined effects of initial microfibrillar angle and moisture contents on the tensile mechanical properties and angle alteration of wood foils during tension. *Holzforschung*, 71(6):491-497.
- Wanju, L., Hankun W., Hao W., Yan, Y. (2014) Moisture dependence of indentation deformation and mechanical properties of masson pine (*Pinus massoniana* Lamb) cell walls as related to microfibrillar angle. *Wood and Fiber Science*, 46(2): 228-236
- Wang, Y., Liu, C., Zhao, R., McCord, J. y Rials, T. (2016). Anatomical characteristics, microfibril angle and micromechanical properties of cottonwood (*Populus deltoides*) and its hybrids. *Biomass and Bioenergy*, 93:72-77.
- Wink, R.A., Fassola, H.E. y Área, M.C. (2015). Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de *Pinus taeda*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(2): 391-406.
- Wink, R.A., Fassola, H.E., Tomazello, M. y Area, M.C. (2012). Caso de estudio: ángulo microfibrilar y su relación con la densidad básica de la madera de

Pinus taeda L. con manejo silvopastoril. Conferencia en el VII Congreso iberoamericano de Investigación en madera y papel.

Wood, S. (2017). Generalized additive models: an introduction with R. 2nd edition. CRC Press, Florida, U.S. 497 p.

Zhen-fu, L., Xue-feng, Z., Biao, P y Xiao-hong, Y. (2012). Analysis of wood microfibril angle and crystallinity of *Pinus elliottii* plantation. *Journal of Anhui Agricultural University*, 39(5):774-776.

Zobel, B.J. and Jett, J.B. (2012). *Genetics of Wood Production*. Springer Science & Business Media. 337 pp.

CAPÍTULO 3. EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA MADERA SOBRE EL ÁNGULO MICROFIBRILAR DE *PINUS PSEUDOSTROBUS* VAR. *APULCENSIS*

EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA MADERA SOBRE EL ÁNGULO MICROFIBRILAR DE *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*

Effect of the technological characteristics of wood on the microfibril angle of *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*

Jahaziel Saucedo-Ibarra¹, Amparo Borja-de la Rosa¹, José Tarcísio Lima², Alejandro Corona-Ambriz¹ y Roberto Machuca-Velasco¹

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.

²Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil.

RESUMEN

Se seleccionaron 10 árboles al azar en una plantación de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* de 36 años establecida en la Universidad Autónoma Chapingo en Texcoco, Estado de México. Se extrajo un núcleo por cada árbol a 1.30 m de altura de fuste. Se midió el ángulo microfibrilar en traqueidas individuales por medio de microscopía de luz polarizada, se obtuvo un ángulo promedio de 28.8°. Se determinó la densidad básica de la madera a través de la medición del volumen en estado verde y peso posterior en estado anhidro. La densidad básica promedio fue de 0.43 g/cm³. La longitud de traqueidas se midió con un microscopio estereoscópico con sistema de microfotografía marca Leica® EZ4HD, se obtuvo una longitud de traqueidas promedio de 3,516 µm. La contracción volumétrica se obtuvo con el volumen en estado verde y volumen en estado anhidro, registrándose una contracción volumétrica promedio de 10.3%. Finalmente, se ajustó un modelo aditivo generalizado para conocer el comportamiento del ángulo microfibrilar en

función de la densidad básica, la longitud de traqueidas y la contracción volumétrica. El modelo tuvo una capacidad explicativa de 88.2%.

ABSTRACT

10 trees were randomly selected from a *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* plantation established at Universidad Autónoma Chapingo in Texcoco, State of Mexico. One core was extracted for each tree at 1.3 m stem height. Microfibrillar angle was measured in individual tracheids using polarized light microscopy, a mean angle of 28.8° was obtained. Basic density was determined by measuring its volume in green state and subsequent weight in anhydrous state; its mean was 0.43 g/cm³. Tracheid length was measured with a stereoscopic microscope with microphotography system, a mean length of 3,516 µm was obtained. Volumetric contraction was determined measuring the volume in green state and later measuring the volume in anhydrous state, an average of 10.3% was obtained. Finally, a generalized additive model was fitted to know microfibrillar angle response as a function of basic density, tracheid length and volumetric contraction. The model had a deviance explained (explaining capacity) of 88.2%.

INTRODUCCIÓN

Pinus pseudostrobus var. *apulcensis* es una especie nativa de México, con presencia en bosques templados y en plantaciones comerciales en los estados del centro y sur del país. Tiene gran importancia económica e industrial pues se usa en la fabricación de pulpa para papel, triplay, cajas de empaque, molduras, muebles y artesanías (Conafor, 2010). Es una especie de crecimiento relativamente rápido y produce madera de excelente calidad, por ello se considera apropiada para el establecimiento de plantaciones comerciales (López-Upton, 2002). En cuanto a su trabajabilidad, Martínez y Martínez-Pinillos (1996) clasifican

esta madera como buena en cuanto a barrenado, buena en escopleado y excelente en moldurado.

Las microfibrillas de celulosa son las unidades básicas de la pared celular de las plantas. Estas microestructuras tienen una orientación paralela entre ellas en las capas de la pared secundaria. A esta inclinación se le llama ángulo microfibrilar (AMF) (Lima et al, 2014). Para interpretar los efectos que el AMF tiene en la calidad de la madera es importante usar métodos de medición consistentes y precisos (Chauhan et al., 2006). El método de medición del AMF por microscopía de luz polarizada es confiable pues en comparación con otros métodos reconocidos, como difracción de rayos X, se observan buenas correlaciones entre los valores promedio (Meylan, 1967; Peter et al., 2003).

El primer registro de estudios sobre la inclinación de las microfibrillas data de 1864, cuando el científico alemán Karl von Nägeli observó estriaciones en la pared celular de las traqueidas de *Abies excelsa* y concluyó que esas estriaciones indican la orientación de las moléculas de la celulosa en la pared celular, alineadas y paralelas entre ellas en micelios cristalinos (Barnett y Bonham, 2004). Desde mediados del siglo pasado, se sabe que esta característica influye en la rigidez de la madera (Cave, 1968) y que afecta sus propiedades, especialmente en coníferas (Barber y Meylan, 1964). En la década de los noventa, Butterfield (1998) concluyó que el AMF es la característica fundamental que explica la baja calidad de la madera de coníferas en plantaciones de rápido crecimiento. En estudios recientes, Donaldson (2008) menciona que la orientación y la organización de las microfibrillas de celulosa contribuyen en las propiedades físicas de la madera y de la fibra procesada. Tabet y Abdul Aziz (2013) afirman que la inclinación de las microfibrillas de

celulosa de la pared celular en la madera de coníferas influye significativamente en sus propiedades mecánicas.

La relación entre el AMF y la calidad de la madera ha quedado demostrada en diversos trabajos. Kojima y Yamamoto (2004) encontraron que la deformación longitudinal de la madera es altamente afectada por la inclinación de las microfibrillas, y Lube *et al.* (2015) encontraron que el AMF se incrementa al reducir el contenido de humedad en el secado. Además, se encontró que el Módulo de Elasticidad en la madera depende de dicha característica (Vanerek et al., 2017). Por tal motivo, es importante estudiar el efecto del AMF en las características tecnológicas de las especies comerciales más importantes, esto permitirá tener conocimiento a nivel microscópico de la madera como materia prima, con lo cual la industria forestal pueda emplearla de forma más eficiente.

En México, el *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2017* reporta que, del total de la producción forestal maderable del país, el 70.9% corresponde al género *Pinus* spp. con 6.3 millones de m³r y de esta producción el 73.7% se destina a escuadría (Semarnat, 2020). Por tal razón, es importante realizar estudios sobre la microestructura de la madera de este género y examinar la relación que guarda con sus características tecnológicas y calidad. Se requiere conocimiento que explique la influencia que ejerce una microestructura como el ángulo microfibrilar sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del AMF sobre la densidad básica (DB), la longitud de traqueidas (LT) y la contracción volumétrica (CV) en la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de las muestras

Primero se seleccionaron al azar 10 individuos sanos de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* de una plantación de 36 años ubicada en la Universidad Autónoma Chapingo en las coordenadas 19° 29' 33.3'' de latitud norte y 98° 53' 36.4'' de longitud oeste, a 2,242 m de altitud. Después, de cada individuo se extrajo un núcleo de madera a una altura de 1.30 m del fuste con un taladro de Pressler marca Haglöf® de 12 pulgadas de longitud y 12 mm de diámetro de corte (Figura 1).



Figura 1. Obtención de los núcleos de 10 árboles sanos de la especie *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*.

Finalmente, en el Laboratorio de Anatomía de la Madera, cada núcleo se dividió transversalmente cada cinco anillos, para hacer un total de ocho zonas de estudio por cada árbol: médula, anillo 5, anillo 10, anillo 15, anillo 20, anillo 25, anillo 30 y corteza (Figura 2). A su vez, cada parte se dividió horizontalmente en dos partes: la parte superior para medir el AMF y la longitud de traqueidas (Figura 2-B), mientras que la parte inferior para determinar la densidad básica y la contracción volumétrica (Figura 2-C).

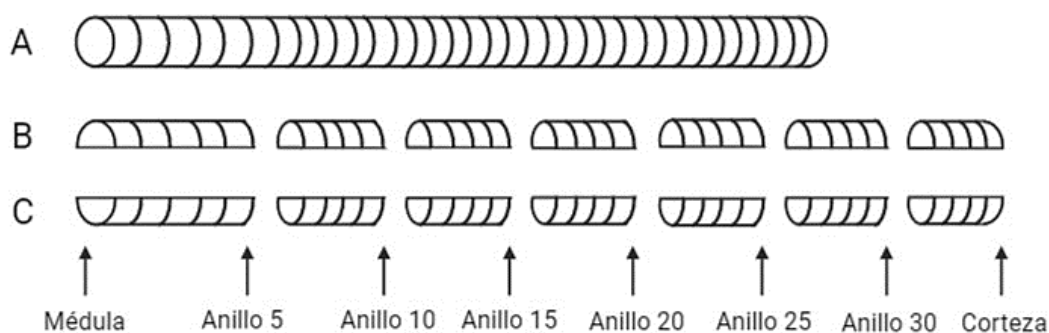


Figura 2. Diagrama que muestra las ocho zonas de estudio por cada núcleo (viruta).

Determinación del AMF

Se realizaron cortes tangenciales de 15 μm de grosor en cada zona de estudio con un microtomo marca Leica® modelo SM 2000R. Los cortes se colocaron en un frasco de vidrio, se les agregó una mezcla en partes iguales de ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno y se pusieron en el horno de secado a 60°C por 72 horas. Posteriormente el material se agitó para disociarlo completamente, y se lavó con agua destilada hasta eliminar la mezcla.

Para medir el AMF se utilizó un microscopio de luz polarizada marca Labomed® LxPOL con platina móvil y goniómetro graduado de 0° a 360° (Figura 3). Se siguió la metodología propuesta por Preston (1974), que consiste en observar al microscopio de luz polarizada la pared celular de la traqueida y ubicarla en el eje vertical del ocular. Posteriormente se realiza un giro lento de la platina hacia la derecha o izquierda y se detiene cuando la pared celular observada se oscurece completamente. Finalmente, se mide y se registra el ángulo que se identificó con el goniómetro entre estos dos puntos. Se realizaron 30 mediciones por cada zona de observación.

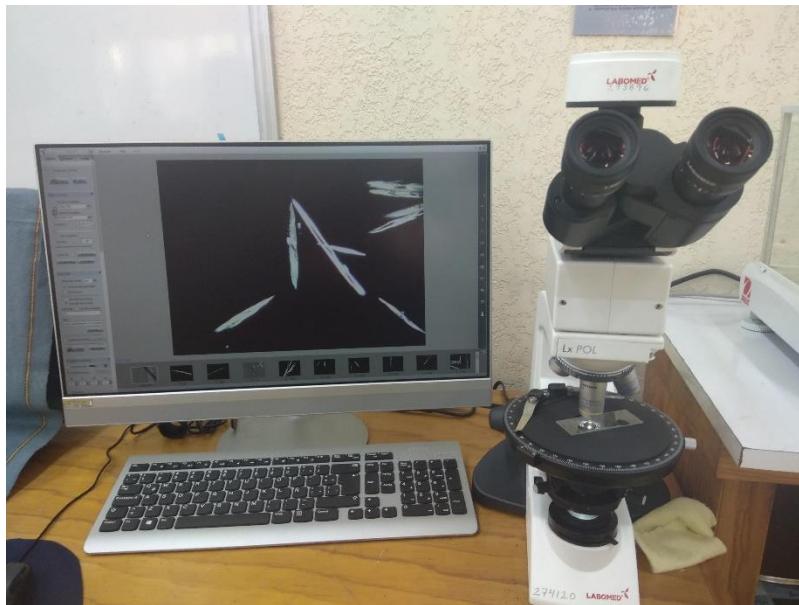


Figura 3. Medición del AMF. Se utilizó un microscopio marca Labomed® LxPOL con software para análisis de imágenes conectado a la cámara.

Determinación de longitud de traqueidas

Para determinar la longitud de traqueidas se empleó la metodología de Franklin (1946). Se obtuvieron astillas de cada una de las ocho zonas de observación, se depositaron en un frasco de vidrio, se les agregó una mezcla de partes iguales de ácido acético glacial y de

peróxido de hidrógeno. Se colocaron en el horno a 60°C por 72 horas, posteriormente el material se agitó vigorosamente y se lavó con agua destilada. Las fibras se colocaron en portaobjetos para su observación y medición. Se midieron 30 fibras por zona de estudio, con un microscopio estereoscópico con sistema de microfotografía marca Leica® EZ4HD, equipado con el software Leica Application Suite versión 3.3.0.

Determinación de densidad básica

El cálculo de la densidad básica se realizó de acuerdo con el método empírico (Valencia y Vargas, 1997). El volumen de las muestras se obtuvo en estado verde por el método de Arquímedes, posteriormente las muestras se depositaron en un horno a 103°C ± 2° hasta alcanzar un peso constante, ambos con una balanza de precisión diezmilésima de gramo. La densidad básica se calculó mediante la fórmula:

$$DB = \frac{P_0}{V_v}$$

Donde:

DB = Densidad básica de la madera (g.cm⁻³)

P₀ = Peso anhidro (g)

V_v = Volumen en estado verde (cm³)

Cálculo de la contracción volumétrica

Para obtener la contracción volumétrica se siguió la metodología de Navarro (2005). Se cortaron prismas rectangulares con cortes típicos de cada una de las zonas de estudio, en cada probeta se midió con un vernier el eje tangencial, radial y axial en estado verde y se

determinó su volumen. Las probetas se introdujeron en la estufa de secado a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ hasta alcanzar un peso constante. Estas se midieron nuevamente considerando los tres ejes y se calculó su volumen. El porcentaje de contracción volumétrica se determinó con la siguiente fórmula:

$$\% \beta_{vt} = \frac{V_v - V_0}{V_v} \cdot 100$$

Donde:

$\% \beta_{vt}$ = Contracción volumétrica en porcentaje

V_v = Volumen en estado verde (cm^3)

V_0 = Volumen en estado anhidro (cm^3)

Modelo estadístico: Modelo Aditivo Generalizado

Los modelos aditivos generalizados permiten obtener ajustes no lineales utilizando múltiples covariables. Estos son el resultado de extender un modelo lineal permitiendo que cada elemento del modelo sea una función no lineal de una covariable, manteniendo la propiedad de aditividad. Por lo tanto, son una combinación lineal de funciones no lineales y, al igual que en los modelos lineales, se pueden incorporar tanto covariables continuas como cualitativas.

En general, el modelo tiene una estructura de la forma:

$$g(\mu_i) = f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{1i}, x_{2i}) + \dots + \epsilon_i$$

donde $\mu_i \equiv \mathbf{E}(Y_i)$ y $Y_i \sim \text{EF}(\mu_i, \phi)$. Y_i es la variable respuesta, $\text{EF}(\mu_i, \phi)$ denota una distribución de la familia exponencial con media μ_i y parámetro de escala ϕ y las $f_j(\cdot)$ son funciones de suavizado con covariables x_{ki} . (Wood, 2017).

Para el análisis de los datos se empleó el paquete estadístico R, se tomó al AMF como variable respuesta y la densidad básica, la longitud de traqueidas, y la contracción volumétrica como variables explicativas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1. Estadísticos descriptivos para AMF, DB, LT y CV

	Ángulo microfibrilar (°)	Densidad básica (g.cm ⁻³)	Longitud de traqueidas (µm)	Contracción volumétrica (%)
Mínimo	16.2	0.33	1,750	5.8
Promedio	28.8	0.43	3,516	10.3
Máximo	48.5	0.7	5,328	15.7
Coefficiente de Variación (%)	24.8	15.6	23.6	19.1

Densidad básica

Se encontró que la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* tiene una densidad básica promedio de 0.43 g.cm⁻³ (Tabla 1). Sotomayor (2008) la reporta en 0.55 g.cm⁻³, mientras que Aragón *et al* (2020) obtuvieron una densidad básica promedio de 0.49 g.cm⁻³. Aunque existen estas discrepancias moderadas entre estos valores, al tomar como referencia la clasificación de la tabla FITECMA, esta madera se encuentra en la categoría de densidad media (Sotomayor, 2008) y también se le describe como de densidad moderadamente liviana (Machuca et al., 2012).

Longitud de traqueidas

La longitud de traqueidas máxima registrada para esta especie fue de 5,328 μm ; la mínima de 1,750 μm y la longitud promedio de 3,516 μm (Tabla 1). En comparación, otras especies de pino mexicanas como *Pinus patula*, reportan una longitud de traqueidas promedio de 3,210 μm . (Escobar-Sandoval et al., 2018; Goché et al., 2011). Una investigación realizada sobre seis especies de pino del norte de México reportó los promedios de longitud de traqueidas de *Pinus arizonica* (3,274 μm), *Pinus cooperi* (4,135 μm), *Pinus durangensis* (3,702 μm), *Pinus herrerae* (4,372 μm), *Pinus leiophylla*, (4,486 μm) y *Pinus teocote* (3,859 μm) (de la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo, 2016). Como se puede observar, los valores promedios obtenidos para esta característica anatómica de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* se acercan al valor promedio de otras especies del género *Pinus*, en particular a *P. arizonica*, *P. durangensis* y *P. patula*.

Contracción volumétrica

Schulgasser y Witztum (2015) realizaron un estudio sobre la relación entre la densidad y la contracción de la madera, en el cual llegaron a la conclusión que cuando la densidad básica es muy baja o se aproxima a cero, la contracción volumétrica se aproxima a 4%. En el caso de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* se encontró de acuerdo con esa afirmación pues el valor mínimo de contracción volumétrica fue de 5.8% en la zona de la médula, que tuvo la menor densidad básica (0.33 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). El valor promedio fue de 10.3% (Tabla 1). A manera de comparación, para *Pinus ayacahuite* se reportó una contracción volumétrica promedio de 12.59% (Goché-Telles et al., 2000) y Riesco y Diaz (2007) reportaron la contracción volumétrica de tres especies de pino: *Pinus pinaster* (13.8%), *Pinus radiata* (10.7%) y *Pinus sylvestris* (12.3%).

Ángulo microfibrilar

De acuerdo con los resultados obtenidos del ángulo microfibrilar, en *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* se encontró una marcada tendencia negativa; es decir, se reduce de la médula a la corteza (ver Figura 2-A). El AMF máximo fue de 48.5°; el ángulo mínimo fue de 16.2° y el ángulo promedio de 28.8° (Tabla 1). Estos valores son semejantes a los que Peter et al (2003) obtuvieron en *Pinus taeda* con un AMF de entre 5° y 50° y en una investigación más reciente realizada por Winck et al. (2015) se encontró un mínimo de 19.2° y un máximo de 44.8° para la misma especie. Erasmus et al. (2018) encontraron un ángulo mínimo de 7° y un ángulo máximo de 31° para *Pinus patula*. Por último, en el trabajo de Donaldson y Xu (2005) para *Pinus radiata* se encontraron valores de AMF de 1° a 59°.

En la Figura 4 se puede observar el comportamiento radial de las características y propiedades de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*.

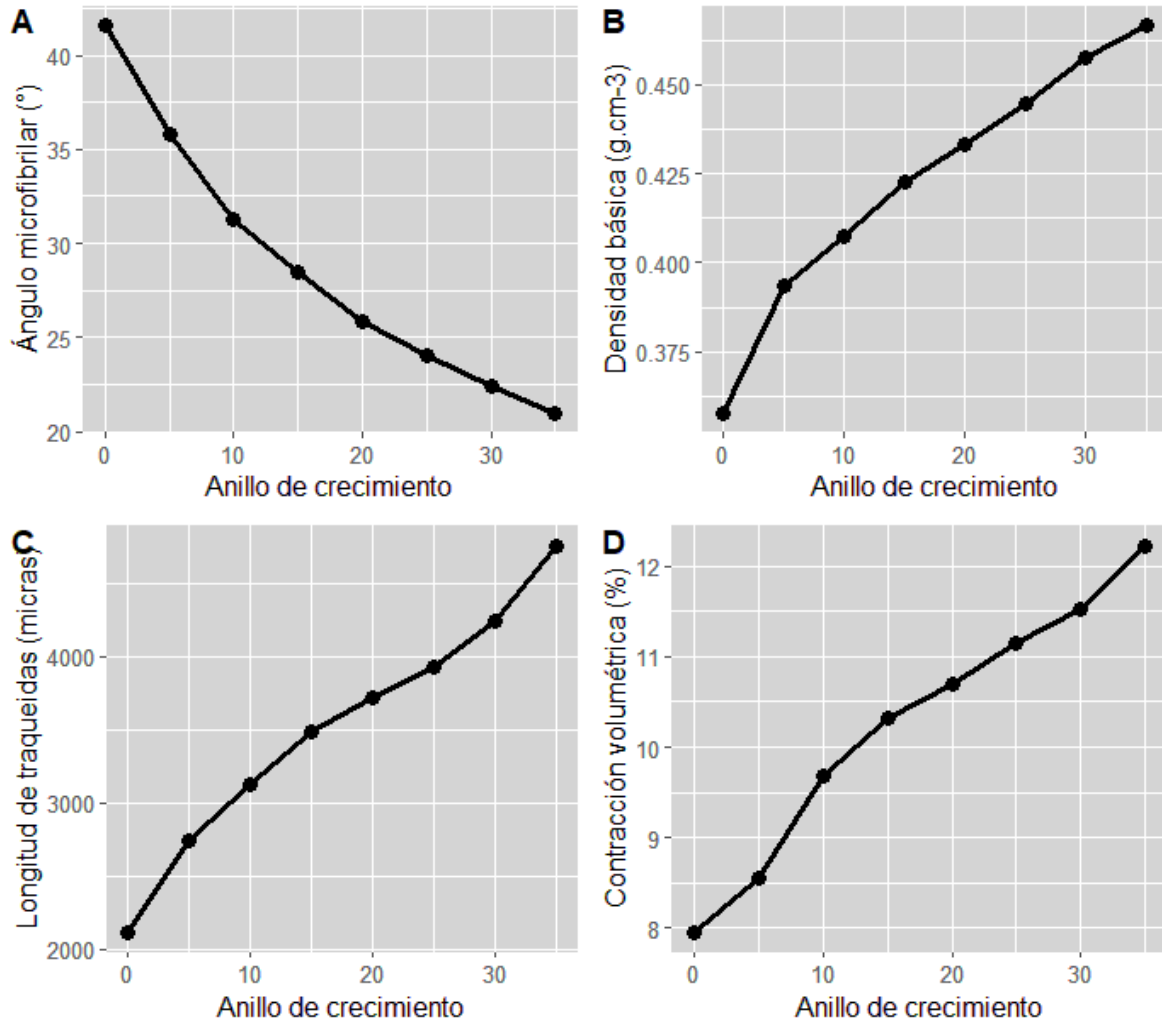


Figura 4. Comportamiento de las características tecnológicas de la madera de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* de manera radial desde la médula (0) hacia la corteza.

Influencia de la densidad básica en el AMF

De acuerdo con Clark y Daniels (2004) y Watt et al. (2011) es común observar una correlación negativa entre el AMF y la densidad básica; sin embargo, Donaldson (2008) reportó que esa correlación suele ser variable. Para determinar la influencia de la inclinación de las microfibrillas sobre la densidad básica de la madera en esta especie, se ajustó un modelo aditivo generalizado entre la DB y el AMF. El modelo aditivo

generalizado resultó significativo (Ver Anexo I) lo cual implica que la densidad básica permite explicar el comportamiento del ángulo microfibrilar; en términos de la devianza se tiene que el 55.9% de la variabilidad total presentada en el ángulo microfibrilar es explicada por la densidad básica.

El modelo mostró claramente una tendencia negativa entre la DB y el AMF. Sin embargo, aún se considera que tal variable no explica satisfactoriamente el comportamiento del AMF. Winck et al (2012) reportaron una correlación para un modelo lineal entre el AMF y la densidad básica en *Pinus taeda* ($R=-0.59$) y para la misma especie, Isik et al (2008) afirmaron que la densidad básica se comportó como un predictor variable del AMF y explicó únicamente el 36% de la variabilidad total de la variable respuesta. En la Figura 5 se presentan los valores ajustados y los valores observados entre la densidad básica y el AMF. En tal figura, se puede observar una tendencia no lineal descendente y después de alcanzar una densidad básica de aproximadamente 0.6 g/cm^3 , el AMF tiende a mantenerse estable.

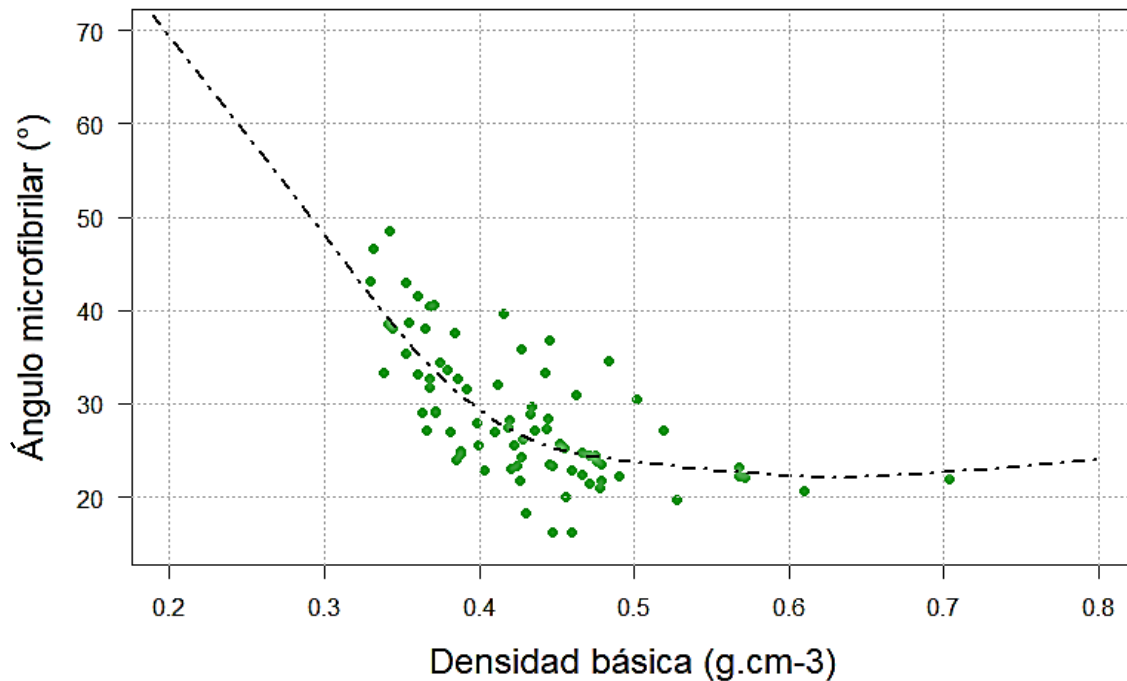


Figura 5. Comportamiento del AMF en función de la densidad básica. Los puntos verdes indican las observaciones y la línea punteada, el modelo.

Influencia de la longitud de traqueidas en el AMF

Se ha demostrado que el AMF tiene una correlación de moderada a fuerte con la longitud de traqueidas (Bonham & Barnett 2001; Chiu et al. 2005; Fabisiak et al., 2012; Schimlek et al., 2018). El modelo aditivo generalizado ajustado para esta variable (Figura 6) resultó ser significativo con un nivel de significancia de 0.05 (ver Anexo I). El cual, de acuerdo con la devianza, explica el 83.3% de la variabilidad total que presenta el AMF; por lo tanto, resultó ser mejor modelo que el anterior (DB). Al igual que en el caso anterior, el AMF presentó una tendencia no lineal negativa (Figura 6). Es evidente que, aproximadamente, después de una longitud de 4,500 μm el AMF no presenta grandes cambios, por lo que se puede inferir que se estabiliza en los 21°.

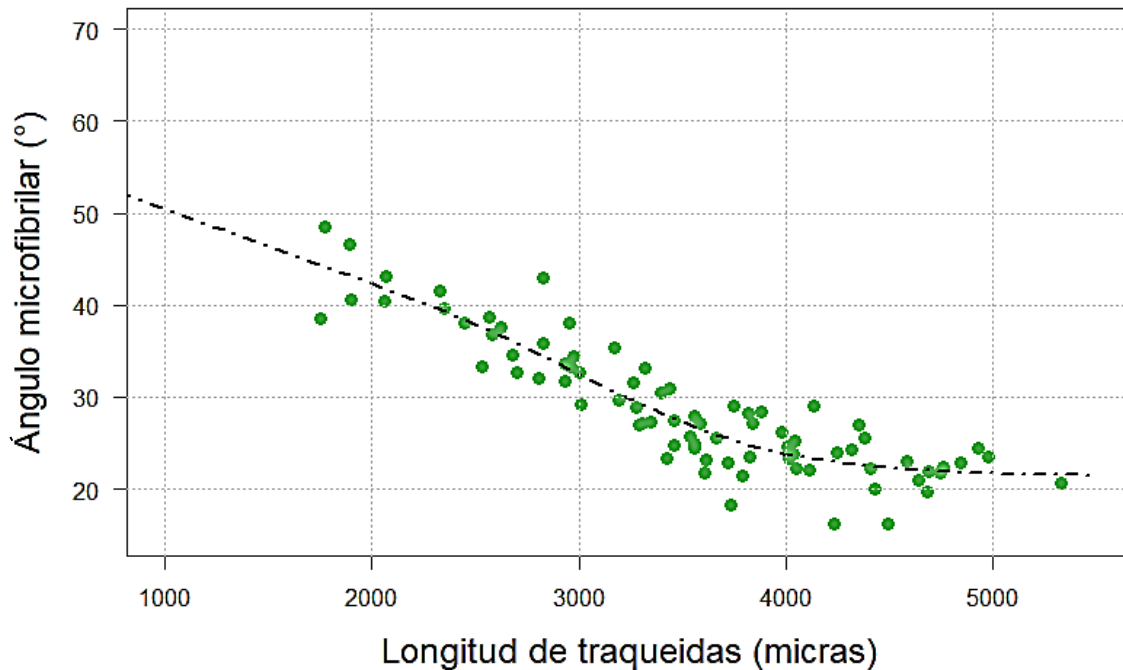


Figura 6. Comportamiento del AMF en función de la longitud de traqueidas. Los puntos verdes indican las observaciones y la línea punteada, el modelo.

Influencia de la contracción volumétrica en el AMF

Considerando la contracción volumétrica como variable explicativa, nuevamente, el modelo ajustado resultó significativo con un nivel de significancia de 0.05. En este caso, de acuerdo con la devianza, la contracción volumétrica explica el 61.2% de la variabilidad total del AMF, siendo mejor que el obtenido con la densidad básica y peor que el obtenido con la longitud de traqueidas. El comportamiento del modelo ajustado se presenta en la Figura 7. Tal comportamiento es semejante al encontrado con la densidad básica y la longitud de traqueidas, descendente no lineal. En donde, después de una contracción volumétrica de aproximadamente 14%, los cambios en el AMF son pequeños. Lo anterior resultó acorde con lo que reportan algunos autores; por ejemplo, Donaldson (2008),

menciona que uno de los parámetros más importantes que afectan la contracción en la madera es el AMF. Por otra parte, Schulgasser y Witztum (2015) concluyeron que la contracción volumétrica de la madera se incrementa conforme aumenta la densidad, lo cual se debe a su microestructura.

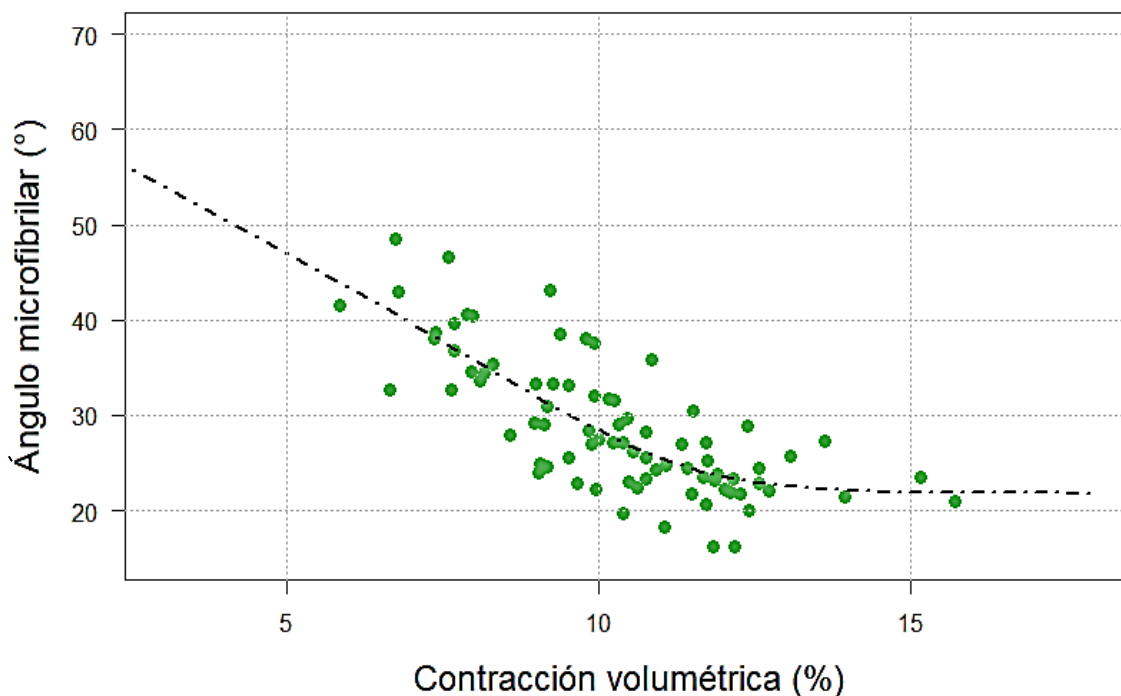


Figura 7. Comportamiento del AMF en función de la contracción volumétrica. Los puntos verdes indican las observaciones y la línea punteada, el modelo.

Influencia de la densidad básica, longitud de traqueidas y contracción volumétrica en el AMF

El AMF es, junto con la densidad, una de las propiedades más importantes para determinar el uso final de la madera (Auty et al., 2012). Diversos trabajos se han hecho con el objetivo de relacionar esta característica ultraestructural con sus propiedades tecnológicas (Jäger et al., 2011; Auty et al., 2017; Esssien et al., 2017; Vega et al., 2020). Considerando que las

tres características tecnológicas (DB, LT y CV) resultaron significativas de manera individual para explicar el comportamiento del AMF, se ajustó un modelo aditivo generalizado con las tres covariables (DB, LT y CV) para obtener un modelo más adecuado para modelar el comportamiento del AMF. Los resultados obtenidos (Ver Anexo I) indican que el modelo fue significativo con un $\alpha = 0.05$ y explica el 88.2% de la variabilidad total que presenta el AMF, de tal manera que resultó ser mejor modelo para explicar el comportamiento del AMF comparado con los modelos ajustados con cada una de las características tecnológicas estudiadas. En las figuras 8 y 9 se muestra el comportamiento del AMF en función de la LT y la CV, manteniendo la DB y la LT fija, respectivamente. En tales figuras se observa que el cambio del AMF es pequeño después de 4,500 μm y 13% respectivamente. Lo anterior implica que a partir de las zonas de estudio cercanas a la corteza (anillos 30 a 36), el AMF se mantiene estable.

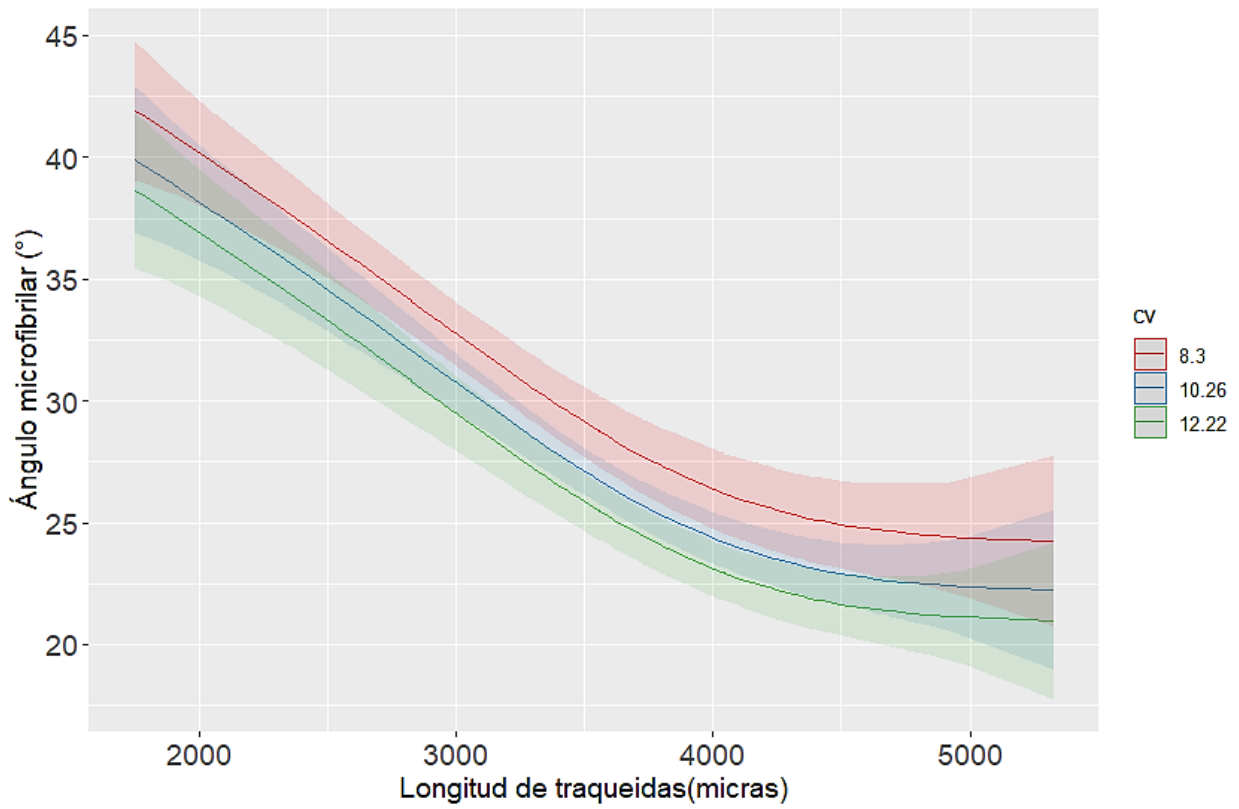


Figura 8. Comportamiento del ángulo microfibrilar en función de la LT y la CV manteniendo la DB fija. Las líneas de colores muestran el modelo para cada valor de CV y sus intervalos de confianza.

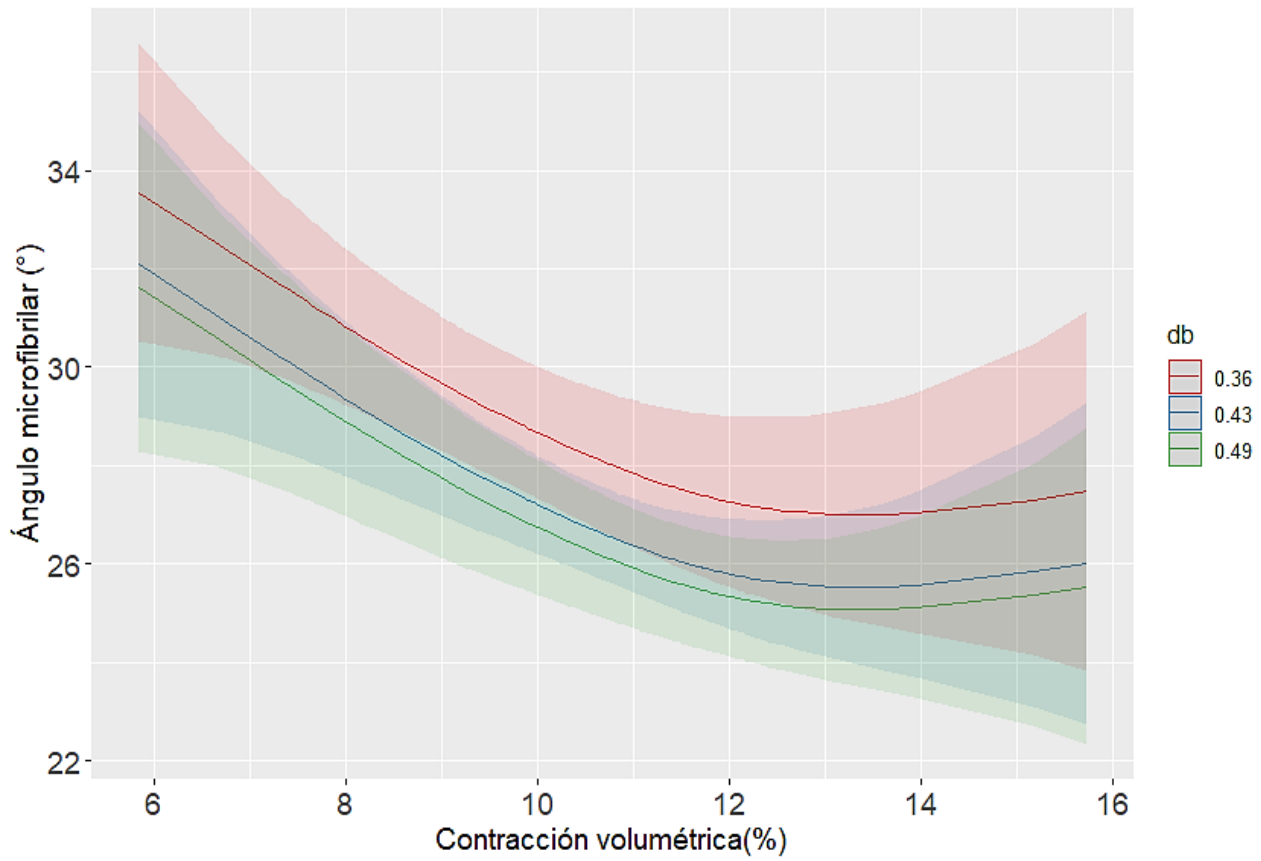


Figura 9. Comportamiento del ángulo microfibrilar en función de la CV y la DB manteniendo la LT fija. Las líneas de colores muestran el modelo para cada valor de DB y sus intervalos de confianza.

CONCLUSIONES

Para finalizar, se exponen las conclusiones derivadas del trabajo de investigación con el propósito de presentar los principales resultados y áreas de oportunidad para el desarrollo de investigaciones futuras.

Este trabajo mostró que las características tecnológicas de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* influyen en el AMF. El ajuste del modelo aditivo generalizado con las tres covariables (densidad básica, longitud de traqueidas y contracción volumétrica) resultó ser mejor que los modelos ajustados considerando solo una de las tres covariables; es decir, se logra explicar el 88.2% de la variabilidad total del AMF.

El modelo aditivo generalizado con la DB explica sólo el 55.9% la variabilidad total del AMF. En el caso del modelo ajustado con CV, éste logró explicar el 61.2% de la variabilidad total y cuando la contracción volumétrica es mayor a 13%, los cambios de AMF son pequeños. Si se tuviera que elegir un modelo con una característica tecnológica (DB, LT o CV), la mejor variable es la longitud de traqueidas debido a que explica el 83.3% de la variabilidad total del AMF. Sería interesante observar si esta tendencia se encuentra presente en otras especies de pino mexicanas. Este conocimiento básico es importante para la industria forestal, ya que puede utilizarlo para obtener una materia prima de calidad, acorde a los requerimientos del mercado.

LITERATURA CITADA

- Aragón P., R. D., Rodríguez O., G., Vargas H., J. J., Enríquez del Valle, J. R., Hernández H., A., & Campos A., G. V. 2020.** Phenotype selection and reproductive characteristics of *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G. Harrison. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(59), 118-140.
- Barber, N. F., and Meylan B. A. 1964.** The anisotropic shrinkage of wood. *Holzforschung*, 18(5):146-56.
- Barnett, J.R. and Bonham, V.A. 2004.** Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews* 79(2): 461-472.
- Bonham, V.A. & J.R. Barnett. 2001.** Fibre length and microfibril angle in Silver birch (*Betula pendula* Roth). *Holzforschung* 55: 159–162.
- Butterfield B. G. (ed). 1998.** *Proceeding of the IAWA/IUFRO Workshop on Microfibril angle in wood*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Cave, I. D. 1968.** The anisotropic elasticity of the plant cell wall. *Wood Science and Technology* 2(4):268-278.
- Chauhan, S.; Donnelly, R.; Huang, C.; Nakada, R.; Yafang, Y.; Walker, J. 2006.** Wood quality: in context. In: Walker J.C.F. (ed) *Primary wood processing: principles and practice*, 2nd ed. Springer, New Zealand.
- Chiu, C-M., C-J. Lin & S-Y. Wang. 2005.** Tracheid length and microfibril angle of young Taiwania grown under different thinning and pruning treatments. *Wood Fibre Sci.* 37: 437-444.
- Clark, A. & R.F. Daniels. 2004.** Modelling the effects of physiographic region on wood properties of planted loblolly pine in the southern US: Connection between forest resources and wood quality: Modelling approaches and simulation software. Fourth Workshop IUFRO Working Party S5.01-04. Harrison Hot Springs, BC, Canada. Sept. 8-15 2002. INRA-Centre de Recherches de Nancy, France. Pp. 54–60.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2010.** SIRE - Paquetes tecnológicos: *Pinus pseudostrobus*. México, 7 pp.
- de la Paz-Pérez Olvera, Carmen, & Dávalos-Sotelo, Raymundo. 2016.** Anatomía de la madera de seis especies de *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y bosques*, 22(3), 113-132.
- Donaldson, L. A. 1993.** Within-and between-tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 22(1):77-86.
- Donaldson, L. 2008.** Microfibril angle: measurement, variation, and relationships - a review. *IAWA Journal* 29(4): 345-386.
- Erasmus, J., Kunneke, A., Drew, D. M. and Wessels, B. C. 2018.** The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density. *Forestry* 91, 247–258.

- Escobar-Sandoval, M. C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Espinosa-Zaragoza, S., & Borja-de la Rosa, A. 2018.** Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y bosques*, 24(2)
- Franklin, G. L. 1945.** Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature* 155(3924): 51-51.
- Goche-Télles, J.R., Fuentes-Salinas, M., Borja-de la Rosa, A. y Ramírez-Maldonado, H. 2000.** Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 6(1): 83-92.
- Goche T., J. R., Velázquez M., A., Borja de la Rosa, A., Capulín G., J., & Palacios M., C. 2011.** Variación radial de la densidad básica en *Pinus patula* Schltdl. et Cham. de tres localidades en Hidalgo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(7), 71-78.
- Isik, F., Gumpertz, M., Li, B., Goldfarb, B., Sun, X. 2008.** Analysis of cellulose microfibril angle using a linear mixed model in *Pinus taeda* clones. *Can. J. For. Res.* 38: 1676-1689.
- Jäger, A., Bader, T., Hofstetter, K., & Eberhardsteiner, J. 2011.** The relation between indentation modulus, microfibril angle, and elastic properties of wood cell walls. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6), 677–685.
- Kojima, Y., Yamamoto, H. 2004.** Effect of microfibril angle on the longitudinal tensile creep behavior of wood. *Journal of Wood Science* 50, 301–306.
- Lima, J. T.; Ribeiro, A. O.; Narciso, C. R. P. 2014.** Microfibril angle of *Eucalyptus grandis* wood in relation to the cambial age. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(4), 487-494.
- López-Upton J. 2002.** *Pinus pseudostrobus* Lindl. In: *Tropical Tree Seed Manual*. J. A. Vozzo (ed). USDA Forest Service. Pp: 636-638.
- Lube, V., Lazarescu, C., Mansfield, S.D. and Avramidis, S. 2015.** Wood microfibril angle variation after drying. *Holzforschung*, 70(5):485-488.
- Machuca-Velasco, R., Borja-de la Rosa, A., Morales-Villalba, E., & Flores V., R. 2012.** Trabajabilidad de la madera de *Pinus oaxacana* Mirov. proveniente de una plantación en el Estado de México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(2), 193-205.
- Martínez, C. J. L., y Martínez-Pinillos, C. E. 1996.** Características de cepillado y lijado de 33 especies de madera. *Madera y Bosques*, 2(2), 11–27.
- Meylan, B.A. 1967.** Measurement of microfibril angle by X-ray diffraction. *Forest Products Journal*. 17:51–58.
- Navarro M., J., Borja de la R., A.M. y Machuca V., R. 2005.** Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de Tierra Colorada, Guerrero, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11(1):73-82.

- Peter, G.F., D.M. Benton & K. Bennett. 2003.** A simple direct method for measurement of microfibril angle in single fibres using differential interference contrast microscopy. *J. Pulp Paper Sci.* 29: 274–280.
- Preston, R. D. 1974.** The Physical Biology of Plant Cell Walls. Chapman & Hall: London. 491 pp.
- Schimleck, L.R., Antony, F., Dahlen, J. and Moore, J. 2018.** Wood and fiber quality of plantation-grown conifers: A summary of research with an emphasis on loblolly and radiata pine. *Forests* 9(6):298.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2020.** *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2017*. México, 288 pp.
- Sotomayor, C. 2008.** Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Morelia, México, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.
- Tabet, T. and F. Abdul Aziz. 2013.** Cellulose microfibril angle in wood and its dynamic mechanical significance. In: *Cellulose - Fundamental Aspects*, Canada. Pp. 113-142.
- Valencia, M., S. y J. Vargas. 1997.** Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1):81-87.
- Vanerek, J., Martinek, R., Cada, P. y Kuklik, P. 2017.** The influence of microfibril angle on the wood stiffness parameters. *Procedia Engineering*, 195: 259-264.
- Vega, M., Hamilton, M., Downes, G., Harrison, P. A., & Potts, B. 2020.** Radial variation in modulus of elasticity, microfibril angle and wood density of veneer logs from plantation-grown *Eucalyptus nitens*. *Annals of Forest Science*, 77(3).
- Watt, M. S., Zoric, B., Kimberley, M. O., & Harrington, J. 2011.** Influence of stocking on radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(7), 1422–1431.
- Winck, R. A., Fassola, H. E., & Área, M. C. 2015.** Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de *Pinus taeda*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(2), 391-406.
- Winck, R.A.; Fassola, H.E.; Tomazello, M.F.; Area, M.C. 2012.** Caso de estudio: Ángulo microfibrilar y su relación con la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* L. con manejo silvopastoril. VII° Edición Congreso Iberoamericano de Investigación Celulosa y Papel.
- Wood, S. 2017.** Generalized additive models: an introduction with R. 2nd. Edition. CRC Press, Florida, U.S. 497 p.

ANEXO I

Estadísticos de resumen

	AMF	DB	LT	CV
Min.	:16.20	Min. :0.3292	Min. :1750	Min. : 5.842
1st Qu.:	23.35	1st Qu.:0.3740	1st Qu.:2948	1st Qu.: 9.059
Median	:27.11	Median :0.4255	Median :3557	Median :10.285
Mean	:28.80	Mean :0.4278	Mean :3516	Mean :10.262
3rd Qu.:	33.31	3rd Qu.:0.4606	3rd Qu.:4062	3rd Qu.:11.719
Max.	:48.50	Max. :0.7038	Max. :5328	Max. :15.732

Resumen del Modelo Aditivo Generalizado AMF vs DB

Family: gaussian
Link **function**: identity

Formula:
amf ~ s(db, bs = "ps", m = 2, k = 10)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	28.8004	0.5426	53.08	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(db)	3.313	9	10.29	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.54 Deviance explained = 55.9%
-REML = 243.53 Scale est. = 23.556 n = 80

Resumen del Modelo Aditivo Generalizado AMF vs LT

Family: gaussian
Link **function**: identity

Formula:
amf ~ s(lt, bs = "ps", m = 2, k = 10)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	28.800	0.334	86.23	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(lt)	3.408	9	41.56	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.826 Deviance explained = 83.3%
-REML = 206.24 Scale est. = 8.9245 n = 80

Resumen del Modelo Aditivo Generalizado AMF vs CV

Family: gaussian
Link **function**: identity

Formula:
amf ~ s(cv, bs = "ps", m = 2, k = 10)

Parametric coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 28.8004 0.5067 56.84 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

edf Ref.df F p-value
s(cv) 2.711 9 13.09 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.599 Deviance explained = 61.2%
-REML = 237.43 Scale est. = 20.543 n = 80

Resumen del Modelo Aditivo Generalizado AMF vs DB + LT + CV

Family: gaussian
Link **function**: identity

Formula:
amf ~ s(db, bs = "ps", m = 2, k = 10) + s(lt, bs = "ps",
m = 2, k = 10) + s(cv, bs = "ps", m = 2, k = 10)

Parametric coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 28.8004 0.2867 100.4 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

edf Ref.df F p-value
s(db) 1.290 9 0.566 0.019103 *
s(lt) 2.974 9 15.782 < 2e-16 ***
s(cv) 2.178 9 1.724 0.000261 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.872 Deviance explained = 88.2%