

# EFEECTO DEL ÁNGULO MICROFIBRILAR EN LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA MADERA DE *Pinus pseudostrobus* VAR. *apulcensis*

## EFFECT OF MICROFIBRIL ANGLE ON TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF *Pinus pseudostrobus* VAR. *apulcensis* WOOD

**Jahaziel Saucedo-Ibarra<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0003-0894-6397>

**Amparo Borja-de la Rosa<sup>1,\*</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-6127-0501>

**José Tarcísio-Lima<sup>2</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-3513-9198>

**Alejandro Corona-Ambríz<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0003-0005-7480>

**Roberto Machuca-Velasco<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0001-9840-7439>

### RESUMEN

El ángulo microfibrilar es la inclinación de las microfibrillas de celulosa en la pared celular en relación al eje vertical de la célula. Esta característica contribuye en explicar las variaciones en propiedades físicas y mecánicas de la madera y fibra procesada. *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* es una especie forestal nativa de México con importancia económica e industrial. Se seleccionaron al azar 10 árboles sanos de esta especie en una plantación en Texcoco, Estado de México, México. De cada árbol se extrajo un tarugo a 1,3 m de altura de fuste. Se midió el ángulo microfibrilar, la densidad básica (DB), la longitud de traqueidas y la contracción volumétrica con el objetivo de determinar el efecto del ángulo microfibrilar sobre dichas características tecnológicas en esta madera. Se obtuvo un ángulo microfibrilar promedio de 28,8°; densidad básica promedio de 430 kg/m<sup>3</sup>; longitud de traqueidas promedio de 3516 μm y contracción volumétrica promedio de 10,3 %. Se ajustaron modelos aditivos generalizados entre el ángulo microfibrilar como variable explicativa y cada una de las tres variables respuesta por separado. Finalmente se ajustó un modelo aditivo generalizado para conocer el comportamiento de la densidad básica, longitud de traqueidas y contracción volumétrica en función del ángulo microfibrilar. Este modelo generado tuvo una capacidad explicativa de 88,2 %. La variable mejor explicada por el ángulo microfibrilar fue la longitud de traqueidas (capacidad explicativa de 83,3 %). Sería interesante observar si este comportamiento se presenta en otras especies de pino mexicanas.

**Palabras clave:** Angulo microfibrilar, densidad básica, contracción volumétrica, longitud de traqueidas, modelo aditivo generalizado.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Texcoco, México.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Lavras. Departamento de Ciências Florestais. Minas Gerais, Brasil.

\*Autor de correspondencia: mborjad@chapingo.mx

Received: 22.04.2021 Accepted: 15.07.2022

## ABSTRACT

Microfibril angle (MFA) is the inclination of the cellulose microfibrils within the cell wall relative to the vertical axis of the cell. This characteristic contributes to explaining the variations in the physical and mechanical properties of processed wood and fiber. *Pinus pseudostrabus* var. *apulcensis* is a forest species native to Mexico with great economic and industrial importance. 10 healthy trees of this species were randomly selected on a plantation in Texcoco, Mexico, and from each tree a core was extracted at 1,30 m stem height. Microfibril angle, basic density (BD), tracheid length (TL) and volumetric contraction (VC) were measured in order to determine the effect of MFA on said technological characteristics in this wood. An average MFA of 28,8 ° was obtained; Average BD of 430 kg/m<sup>3</sup>; Average TL of 3516 μm and an average VC of 10,3 %. Generalized additive models (GAM) were adjusted between the MFA as the explanatory variable and each of the three response variables separately. Finally, a generalized additive model was adjusted to know the behavior of BD, TL and VC as a function of MFA. This generated model had an explanatory capacity of 88,2 %. The best explained variable by MFA was TL (explanatory capacity of 83,3 %). It would be interesting to see if this behavior occurs in other Mexican pine species.

**Keywords:** MFA, basic density, volumetric shrinkage, tracheid length, generalized additive model.

## INTRODUCCIÓN

*Pinus pseudostrabus* 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 rápido y produce madera adecuada para usos diversos, por ello se considera apropiada para el establecimiento de plantaciones comerciales (López-Upton 2002). Su densidad básica varía de 400 kg/m<sup>3</sup> a 480 kg/m<sup>3</sup>. Esta propiedad se relaciona con el producto final, dicha madera es utilizada en celulosa para papel, muebles infantiles, rústicos, arcones, puertas, ventanas, molduras, plataformas para zapatos, artesanías, grabados, cerillos (De la Paz-Pérez y Olvera 1981, Bermejo y Eguiluz 1993). 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 que conforman la pared celular de las plantas. Estas microestructuras son paralelas entre ellas, cambiando la orientación de las mismas de un plano al siguiente (Barnett y Bonham 2004). A la inclinación relacionada al eje vertical de la célula 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). La microscopía de luz polarizada es un método confiable, tal como lo es la difracción de rayos X (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 microfibrillas compuestas de celulosa, constituidas a su vez de moléculas de glucosa unidos por enlaces beta-1,4, 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 sólida 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 explicar las variaciones 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. Por ejemplo, en la madera estructural, el ángulo microfibrilar es determinante en el módulo de elasticidad, en la anisotropía de la contracción, en la resistencia a la compresión de la madera, la contracción longitudinal y como indicador de rigidez; en cuanto a la pulpa para papel, el ángulo microfibrilar se relaciona con la resistencia a la tracción (Treacy *et al.* 2000, Deresse *et al.* 2003, Gherardi-Hein y Tarcísio-Lima 2012).

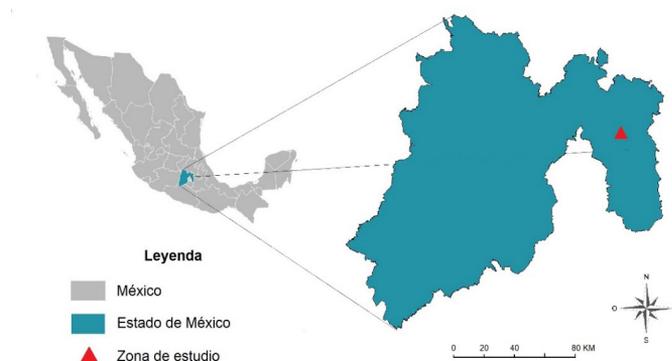
La relación entre el AMF y la calidad de la madera ha quedado demostrada en diversos trabajos. Kojima y Yamamoto (2004) determinaron que la deformación por tracción longitudinal depende en gran medida del AMF, pues su relación es directamente proporcional y Lube *et al.* (2015) encontraron que el AMF se incrementa debido a las deformaciones de las microfibrillas 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. Determinar el AMF es operacionalmente lento por eso existen mediciones de otras características como lo son la densidad básica, longitud de traqueidas y contracciones lineales, con las cuales de manera indirecta se puede conocer el AMF.

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 m<sup>3</sup> rollo y de esta producción el 73,7 % se destina al aserrío (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 ángulo microfibrilar (AMF) sobre la densidad básica (DB), la longitud de traqueidas (LT) y la contracción volumétrica (CV) 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 2242 m de altitud (Figura 1).



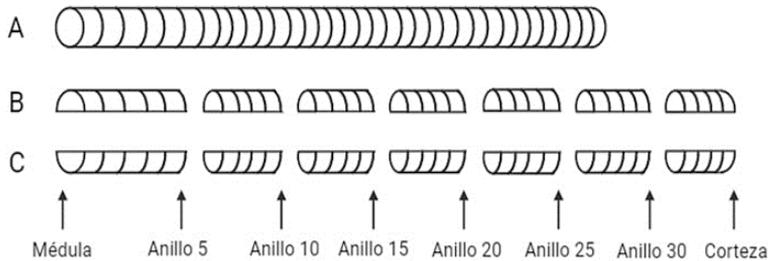
**Figura 1:** Lugar de colecta de árboles de la especie *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*.

Después, de cada individuo se extrajo un tarugo de incremento a una altura de 1,30 m del fuste con un taladro de Pressler marca Haglöf (Långsele, Suecia) de 12 pulgadas de longitud y 12 mm de diámetro de corte (Figura 2).



**Figura 2:** 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: anillo 1, anillo 5, anillo 10, anillo 15, anillo 20, anillo 25, anillo 30 y corteza (Figura 3). A su vez, cada parte se dividió horizontalmente en dos partes: la parte superior para medir el AMF y la longitud de traqueidas (Figura 3b), mientras que la parte inferior para determinar la densidad básica y la contracción volumétrica (Figura 3c).



**Figura 3:** Diagrama que muestra las ocho zonas de estudio por cada núcleo (viruta).

### Determinación del AMF

Se realizaron cortes tangenciales de 15  $\mu\text{m}$  de grosor. Las mediciones se hicieron en el último anillo de cada sección tomando en consideración la dirección medula – corteza con un microtomo marca Leica Biosystems (Nussloch GmbH) 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 24 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 (Labo America Inc.) Lx-POL, con platina móvil y goniómetro graduado de 0° a 360° (Figura 4). 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 4:** Medición del AMF. Se utilizó un microscopio marca Labomed (Labo America Inc.), modelo Lx-POL 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 (1945). 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 Biosystems (Nussloch GmbH), Modelo EZ4HD, equipado con el software Leica Application Suite versión 3.3.0.

### Determinación de densidad básica

Las muestras utilizadas para la densidad básica también lo fueron para la contracción, en ambas propiedades primero se midieron en verde, después se colocaron en la estufa.

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 °C hasta alcanzar un peso constante, ambos con una balanza de precisión diezmilésima de gramo. La densidad básica se calculó mediante la fórmula (Ecuación 1):

$$DB = \frac{P_0}{V_v} \quad (1)$$

Donde:

DB = Densidad básica de la madera (kg/m<sup>3</sup>)

P<sub>0</sub> = Peso anhidro (kg)

V<sub>v</sub> = Volumen en estado verde (m<sup>3</sup>)

### 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 en estado verde el eje tangencial, radial y axial con un micrómetro con precisión de centésima de milímetro y se determinó su volumen. Las probetas se introdujeron en la estufa de secado a  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  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 (Ecuación 2):

$$\% \beta_{vt} = \frac{V_v - V_0}{V_v} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

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

$V_v$  = Volumen en estado verde ( $\text{m}^3$ )

$V_0$  = Volumen en estado anhidro ( $\text{m}^3$ )

### 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 (Ecuación 3):

$$g(\mu_i) = f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{1i}, x_{2i}) + \dots + \epsilon_i \quad (3)$$

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  $\mu_i$  y parámetro de escala  $\phi$  y las  $f_j(\bullet)$  son funciones de suavizado con covariables  $x_{ki}$  (Wood 2017).

Para el análisis de los datos se empleó el software estadístico R (R Core Team 2021), específicamente se usaron los paquetes `mgcv` y `ggplot2`, 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.

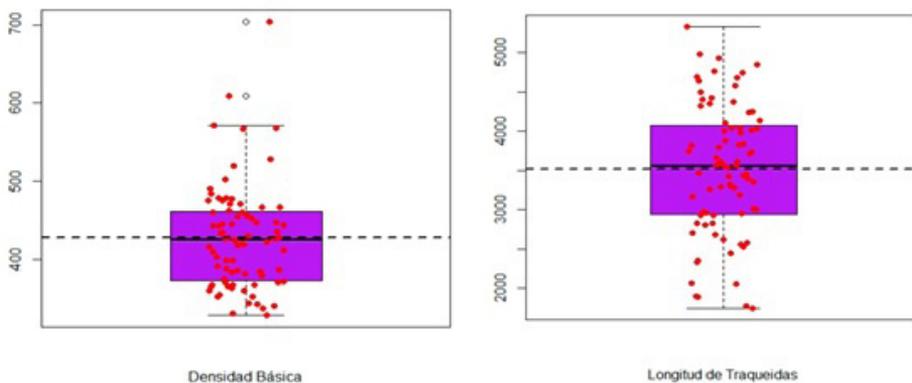
	Densidad básica (kg/m <sup>3</sup> )	Longitud de traqueidas (µm)	Contracción volumétrica (%)	Ángulo microfibrilar (°)
Mínimo	330	1750	5,8	16,2
Promedio	430	3516	10,3	28,8
Máximo	700	5328	15,7	48,5
Coefficiente de Variación (%)	15,6	23,6	19,1	24,8
n	80	80	80	80

### Densidad básica

Se encontró que la madera de *Pinus pseudostrubus* var. *apulcensis* tiene una densidad básica promedio de 430 kg/m<sup>3</sup> (Tabla 1, Figura 5). Sotomayor (2008) la reporta en 550 kg/m<sup>3</sup>, mientras que Aragón *et al.* (2020) obtuvieron una densidad básica promedio de 490 kg/m<sup>3</sup>. Estas discrepancias moderadas entre dichos valores se pueden deber a la calidad de sitio y edad, que son diferentes. 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-Velasco *et al.* 2012).

### Longitud de traqueidas

La longitud de traqueidas máxima registrada para esta especie fue de 5328 µm; la mínima de 1750 µm y la longitud promedio de 3516 µm (Tabla 1, Figura 5). Las diferencias entre los valores mínimos y máximos se pueden deber a la presencia de madera juvenil y madura, la cual no se diferenció en este estudio. En comparación, otras especies de pino mexicanas como *Pinus patula*, reportan una longitud de traqueidas promedio de 3210 µm. (Goche *et al.* 2011, Escobar-Sandoval *et al.* 2018). Una investigación realizada sobre seis especies de pino del norte de México reportó los promedios de longitud de traqueidas de *Pinus arizonica* (3274 µm), *Pinus cooperi* (4135 µm), *Pinus durangensis* (3702 µm), *Pinus herrerae* (4372 µm), *Pinus leiophylla*, (4486 µm) y *Pinus teocote* (3859 µm) (de la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo 2016). Como se puede observar, los valores promedios obtenidos para esta característica anatómica de *P. pseudostrubus* var. *apulcensis* se acercan al valor promedio de otras especies del género *Pinus*, en particular a *P. arizonica*, *P. durangensis* y *P. patula*.



**Figura 5:** Distribución, media, mediana, máximo y mínimo de las observaciones de la densidad básica (DB) y longitud de traqueidas (LT) de la madera de *P. pseudostrubus* var. *apulcensis*.

### Contracción volumétrica

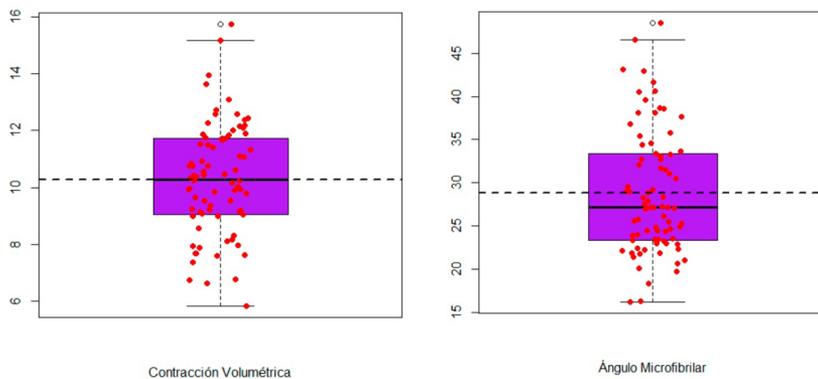
Schulgasser y Witzum (2015) realizaron un estudio sobre la relación entre la densidad y la contracción de la madera en un rango efectivo entre 300 kg/m<sup>3</sup> y 700 kg/m<sup>3</sup> en el cual llegaron a la conclusión que cuando la densidad básica es muy baja, la contracción volumétrica se aproxima a 4 %. En el caso de *Pinus pseudostrubus* var. *apulcensis* se encontró de acuerdo con esa afirmación pues el valor mínimo de contracción volumétrica fue

de 5,8 % en la zona del anillo 1, que tuvo la menor densidad básica ( $330 \text{ kg/m}^3$ ). El valor promedio fue de 10,3 % (Tabla 1, Figura 6). A manera de comparación, para *Pinus ayacahuite* se reportó una contracción volumétrica promedio de 12,59 % (Goche-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 %).

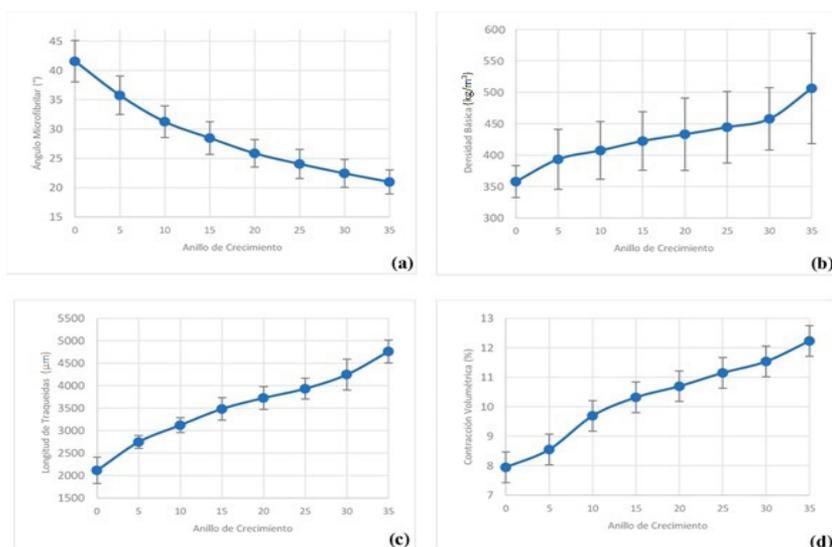
### Ángulo microfibrilar

De acuerdo con los resultados obtenidos del ángulo microfibrilar, en *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* se encontró una marcada tendencia decreciente de médula a corteza (Figura 3a; Figura 6). El AMF máximo fue de  $48,5^\circ$ ; el ángulo mínimo fue de  $16,2^\circ$  y el ángulo promedio de  $28,8^\circ$  (Tabla 1, Figura 6). Estos valores son semejantes a los que Peter *et al.* (2003) obtuvieron en *Pinus taeda* con un AMF de entre  $5^\circ$  y  $50^\circ$  y en una investigación más reciente realizada por Winck *et al.* (2015) se encontró un mínimo de  $19,2^\circ$  y un máximo de  $44,8^\circ$  para la misma especie. Erasmus *et al.* (2018) encontraron un ángulo mínimo de  $7^\circ$  y un ángulo máximo de  $31^\circ$  para *Pinus patula*. Por último, en el trabajo de Donaldson y Xu (2005) para *Pinus radiata* se encontraron valores de AMF de  $1^\circ$  a  $59^\circ$ . Dichos valores son acordes a lo que sugieren Treacy *et al.* (2000) de que los árboles de crecimiento rápido tienen los ángulos de microfibrillas más grandes tanto en madera juvenil como en madera madura.

En la Figura 7 se puede observar el comportamiento radial de las características y propiedades de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*.



**Figura 6:** Distribución, media, mediana, máximo y mínimo de las observaciones de la contracción volumétrica (CV) y ángulo microfibrilar (AMF) de la madera de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*.

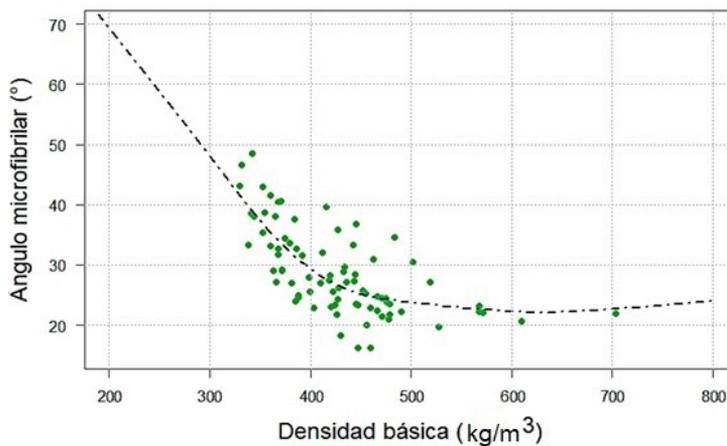


**Figura 7:** Comportamiento de las características tecnológicas de la madera de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* de manera radial desde la médula (0) hacia la corteza.

### Relación entre la densidad básica y 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 (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.

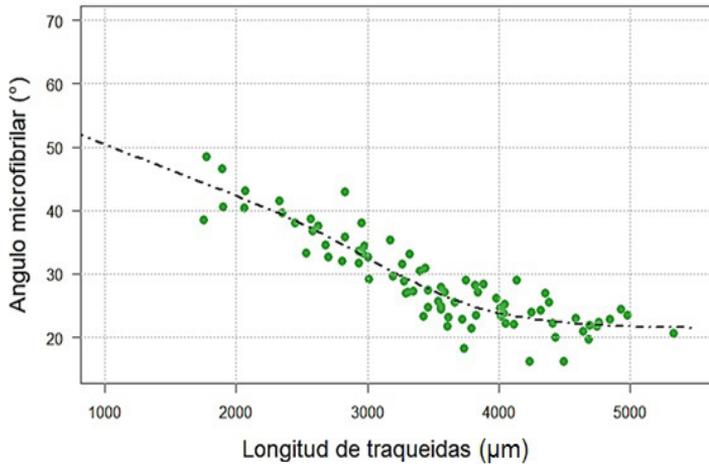
El modelo mostró claramente una tendencia negativa entre la DB y el AMF (Figura 8). Sin embargo, aún se considera que tal variable no explica satisfactoriamente el comportamiento del AMF. Winck *et al.* (2012) reportaron una correlación para un modelo lineal entre el AMF y la densidad básica en *Pinus 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 8 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 600  $\text{kg/m}^3$ , el AMF tiende a mantenerse estable.



**Figura 8:** Comportamiento de la DB en función del AMF. Los puntos verdes indican las observaciones y la línea punteada, el modelo.

### Relación entre la longitud de traqueidas y el AMF

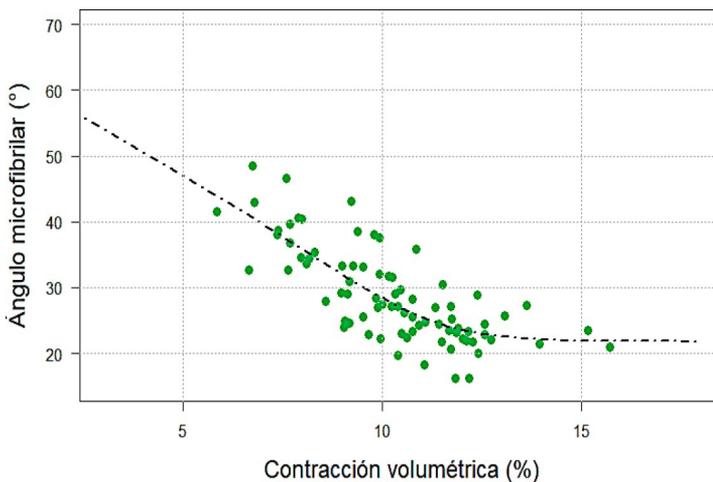
Se ha demostrado que el AMF tiene una correlación de moderada a fuerte con la longitud de traqueidas (Bonham y Barnett 2001, Chiu *et al.* 2005, Fabisiak *et al.* 2012, Schimleck *et al.* 2018). El modelo aditivo generalizado ajustado para esta variable (Figura 9) resultó ser significativo con un nivel 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 9). Es evidente que, aproximadamente, después de una longitud de 4500  $\mu\text{m}$  el AMF no presenta grandes cambios, por lo que se puede inferir que se estabiliza en los 21°.



**Figura 9:** Comportamiento del AMF en función de la longitud de traqueidas. Los puntos verdes indican las observaciones y la línea punteada, el modelo.

### Relación entre la contracción volumétrica y el AMF

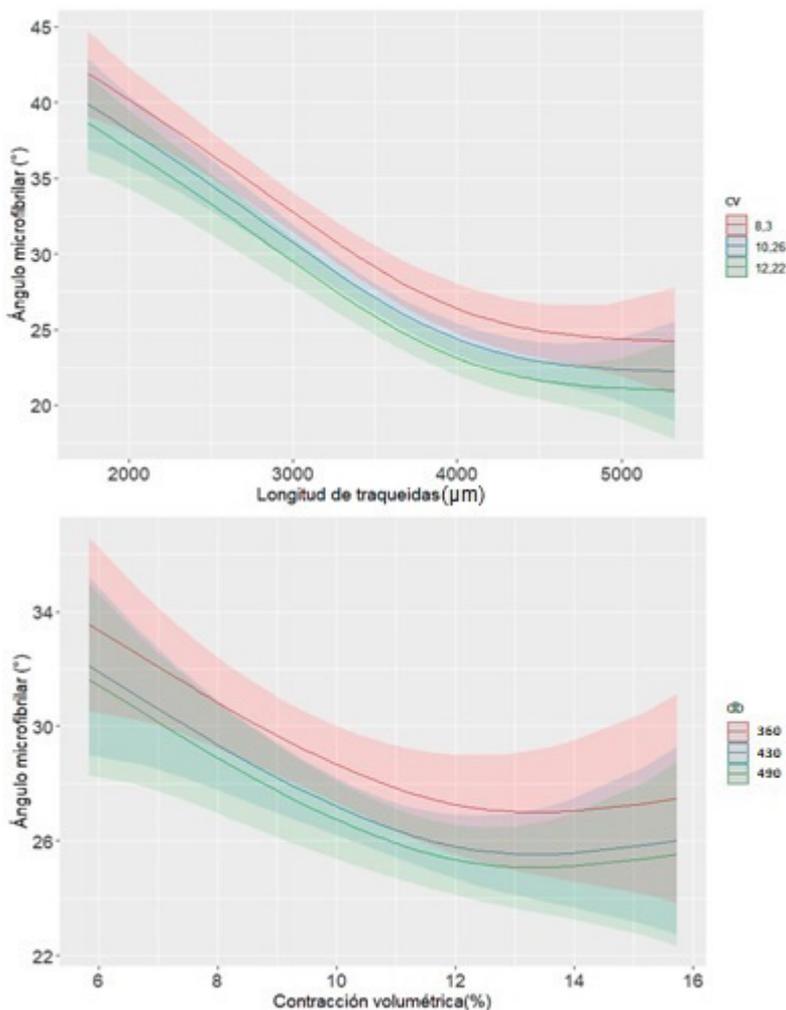
Considerando la contracción volumétrica como variable explicativa, nuevamente, el modelo ajustado resultó significativo con un nivel de significancia de 0,05. En este caso, de acuerdo con la devianza, la contracción volumétrica explica el 61,2 % de la variabilidad total del AMF, siendo mejor que el obtenido con la densidad básica y peor que el obtenido con la longitud de traqueidas. El comportamiento del modelo ajustado se presenta en la Figura 10. 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 Witzum (2015) concluyeron que la contracción volumétrica de la madera se incrementa conforme aumenta la densidad, lo cual se debe a su microestructura.



**Figura 10:** Comportamiento del AMF en función de la contracción volumétrica. Los puntos verdes indican las observaciones y la línea punteada, el modelo.

### Relación del AMF con la densidad básica, longitud de traqueidas y contracción volumétrica

El AMF es, junto con la densidad, una de las propiedades más importantes para determinar el uso final de la madera (Auty *et al.* 2013). Diversos trabajos se han hecho con el objetivo de relacionar esta característica ultraestructural con sus propiedades tecnológicas (Jäger *et al.* 2011, Auty *et al.* 2013, Essien *et al.* 2018, 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 la Figura 11 se muestra el comportamiento del AMF en función de la LT y la CV, manteniendo la DB y la LT fija, respectivamente. En tal figura se observa que el cambio del AMF es pequeño después de 4500  $\mu\text{m}$  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 11:** 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 el AMF se correlaciona con las características tecnológicas de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*. Esta correlación se observa claramente con el modelo aditivo generalizado con tres covariables (DB, LT y CV) pues resultó ser el mejor para explicar su comportamiento en comparación con los modelos ajustados en los que se consideró solo una de las tres covariables en función del AMF.

Si se tuviera que elegir un modelo con solo una característica tecnológica (DB, LT o CV), la variable que el AMF explica mejor es la longitud de traqueidas. Sería interesante observar si este comportamiento se presente en otras especies de pinos mexicanas. De ser así, se podría hacer un modelo general el cual permita calcular el AMF con una alta precisión en función de la LT, por lo tanto, determinar fácilmente esta característica microscópica, cuya medición directa requiere de equipo complejo.

A partir de estos resultados, es posible deducir que el ángulo de las microfibrillas es un indicador directo de diversas propiedades físicas y mecánicas y por lo tanto se debe conocer su magnitud, tanto por mediciones, como es el caso del método de medición por microscopía de luz polarizada o estimado mediante variables independientes que son más fáciles de determinar, como la densidad.

## REFERENCIAS

- Aragón, R.D.; Rodríguez, G.; Vargas, J.J.; Enríquez del Valle, J.R.; Hernández, A.; Campos, 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. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.700>
- Auty, D.; Gardiner, B.A.; 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. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0248-6>
- Barber, N.F.; Meylan, B.A. 1964.** The anisotropic shrinkage of wood. *Holzforschung* 18(5): 146-156. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1964.18.5.146>
- Barnett, J.R.; Bonham, V.A. 2004.** Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews* 79(2): 461-472. <https://doi.org/10.1017/S1464793103006377>
- Bermejo, B.; Eguiluz, T. 1993.** Variación natural del peso específico y longitud de traqueidas en poblaciones de *Pinus pseudostrobus* de la región central de México. *Agrociencia: Serie recursos naturales renovables* 3(2): 23-35
- Bonham, V.A.; Barnett, J.R. 2001.** Fibre length and microfibril angle in Silver birch (*Betula pendula* Roth). *Holzforschung* 55: 159-162. <https://doi.org/10.1515/HF.2001.026>
- Butterfield, B.G. 1998.** Microfibril angle in wood : the proceedings of the IAWA/IUFRO International Workshop on the Significance of Microfibril Angle to Wood Quality. International Association of Wood Anatomists, International Union of Forestry Research Organisations ; University of Canterbury: Christchurch, N.Z
- Cave, I.D. 1968.** The anisotropic elasticity of the plant cell wall. *Wood Science and Technology* 2(4): 268-278. <https://doi.org/10.1007/BF00350273>
- Chauhan, S.; Donnelly, R.; Huang, C.; Nakada, R.; Yafang, Y.; Walker, J.C.F. 2006.** Wood quality: in context. In *Primary wood processing: principles and practice*, Walker, J.C.F. (Ed.), 2nd edition, Springer: New Zealand. 121-158 pp. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7>
- Chiu, C.M.; Lin C.J.; Wang, S.Y. 2005.** Tracheid length and microfibril angle of young *Taiwania* grown under different thinning and pruning treatments. *Wood and Fiber Science* 37: 437-444. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1464>

**Clark, A.; Daniels, R.F. 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. In *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. <https://cutt.ly/CbJSICm>

**De la Paz-Pérez, C.; Dávalos-Sotelo, R. 2016.** Anatomía de la madera de seis especies de *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y Bosques* 22(3): 113-132. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231460>

**De la Paz-Pérez, C.; Olvera C.P. 1981.** Anatomía de la madera de 16 especies de conífera SARH. Boletín Técnico No. 69. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales: México, D.F., Mexico. 111p

**Donaldson, L. 2008.** Microfibril angle: measurement, variation, and relationships - a review. *IAWA Journal* 29(4): 345-386. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000192>

**Donaldson, L.; Xu, P. 2005.** Microfibril orientation across the secondary cell wall of radial pine tracheids. *Trees* 19: 644-653. <https://doi.org/10.1007/s00468-005-0428-1>

**Deresse, T.; Shepard, R.K.; Shaler, S.M. 2003.** Microfibril angle variation in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) and its relation to the strength and stiffness of early juvenile wood. *Forest Products Journal* 53(7/8): 40. [https://jgglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=200902222984028231](https://jgglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902222984028231) 34-

**Erasmus, J.; Kunneke, A.; Drew, D.M.; Wessels, B.C. 2018.** The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density. *Forestry* 91: 247-258. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy005>

**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). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>

**Essien, C.; Via, K.B.; Acquah, G.; Gallagher, T.; McDonald, T.; Eckhardt, L.G. 2018.** Effect of genetic sources on anatomical, morphological, and mechanical properties of 14-year-old genetically improved loblolly pine families from two sites in the southern United States. *Journal of Forestry Research* 29: 1519-1531. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0584-3>

**Fabisiak, E.; Moliński, W.; Kúdela, J.; Mania, P. 2012.** A study on the dependence between tracheid lengths and microfibril angle in resonant wood of spruce (*Picea abies* L.). *Annals of Warsaw Agricultural University. Forestry and Wood Technology* 77: 222-226. <http://annals-wuls.sggw.pl/?q=node/724>

**Franklin, G.L. 1945.** Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature* 155: 51. <https://doi.org/10.1038/155051a0>

**Gherardi-Hein, P.R.; Tarcísio-Lima, J. 2012.** Relationships Between Microfibril Angle, Modulus of Elasticity and Compressive Strength in Eucalyptus Wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 14(3): 267-274. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012005000002>

**Goche, J.R.; Velázquez, M.A.; Borja de la Rosa, A.; Capulín, J.; Palacios, 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. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.568>

**Goche-Telles, J.R.; Fuentes-Salinas, M.; Borja-de la Rosa, A.; 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.

**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. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 1676-1689. <https://doi.org/10.1139/X08-010>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.02.007>
- Kojima, Y.; Yamamoto, H. 2004.** Effect of microfibril angle on the longitudinal tensile creep behavior of wood. *Journal of Wood Science* 50: 301-306. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0565-3>
- 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000039>
- 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.; Avramidis, S. 2015.** Wood microfibril angle variation after drying. *Holzforschung* 70(5): 485-488. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0334>
- Machuca-Velasco, R.; Borja-de la Rosa, A.; Morales-Villalba, E.; Flores, 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. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.001>
- Martínez, C.J.L.; Martínez-Pinillos, C.E. 1996.** Características de cepillado y lijado de 33 especies de madera. *Madera y Bosques* 2(2): 11-27. <https://doi.org/10.21829/myb.1996.221383>
- Meylan, B.A. 1967.** Measurement of microfibril angle by X-ray diffraction. *Forest Products Journal* 17: 51-58.
- Navarro, J.; Borja, A.; Machuca, 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. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911110>
- Peter, G.F.; Benton, D.M.; Bennett, K. 2003.** A simple direct method for measurement of microfibril angle in single fibres using differential interference contrast microscopy. *Journal of Pulp and Paper Science* 29: 274-280. <http://hdl.handle.net/1853/31884>
- Preston, R.D. 1974.** *The Physical Biology of Plant Cell Walls*. Chapman & Hall: London. 491p. <https://doi.org/10.1038/255749b0>
- R Core Team. 2021.** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Riesco, M.; G.; Díaz, G. J. 2007.** Características físicas de la madera de pino procedente de raleos en el noroeste de España. *Maderas. ciencia y tecnología* 9(3): 233-244. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2007000300004>
- Schimleck, L.R.; Antony, F.; Dahlen, J.; 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): e298. <https://doi.org/10.3390/f9060298>
- Schulgasser, K.; Witztum, A. 2015.** How the relationship between density and shrinkage of wood depends on its microstructure. *Wood Science and Technology* 49: 389-401. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0699-7>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Semarnat. 2020.** Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2017. México. 288 pp. <http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2020/2017.pdf>
- Sotomayor, C. 2008.** Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera: Morelia, México. <https://cutt.ly/MbJOSAJ>

**Tabet, T.A.; Abdul Aziz, F. 2013.** Cellulose microfibril angle in wood and its dynamic mechanical significance. In *Cellulose - Fundamental Aspects*. Canada. 113-142p. <https://doi.org/10.5772/2705>

**Treacy, M.; Dhubhain, A.N.; Evertsen, J. 2000.** The influence of microfibril angle on modulus of elasticity and modulus of rupture in four provenances of Irish grown Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr). *Journal of the Institute of Wood Science* 15: 211-220.

**Valencia, S.; Vargas, J. 1997.** Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1): 81-87. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>

**Vanerek, J.; Martinek, R.; Cada, P.; Kuklik, P. 2017.** The influence of microfibril angle on the wood stiffness parameters. *Procedia Engineering* 195: 259-264. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.552>

**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). <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00961-1>

**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. <https://doi.org/10.1139/x11-070>

**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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000037>

**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. En VII Edición Congreso Iberoamericano de Investigación Celulosa y Papel. Sao Paulo, Brasil. [http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/2012\\_Angulo\\_fibrilar\\_Pinus.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/2012_Angulo_fibrilar_Pinus.pdf)

**Wood, S. 2017.** *Generalized additive models: an introduction with R*. 2nd. Edition. CRC Press: Florida, U.S 497 p. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>

## ANEXO I

### 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%