

DOI:10.4067/S0718-221X2022005XXXXXX

**EFFECTO 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-Ibarra¹ <https://orcid.org/0000-0003-0894-6397>

Amparo Borja-de la Rosa¹ <https://orcid.org/0000-0002-6127-0501>

José Tarcísio Lima² <https://orcid.org/0000-0002-3513-9198>

Alejandro Corona-Ambriz¹ <https://orcid.org/0000-0003-0005-7480>

Roberto Machuca-Velasco¹ <https://orcid.org/0000-0001-9840-7439>

*Autor de correspondencia: mborjad@chapingo.mx

Received: April 22, 2021

Accepted: July 15, 2022

Posted online: July 16, 2022

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 0,43 g·cm⁻³; 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: Ángulo microfibrilar, densidad básica, contracción volumétrica, longitud de traqueidas, modelo aditivo generalizado

38

39

ABSTRACT

40 Microfibril angle (MFA) is the inclination of the cellulose microfibrils within the cell wall
41 relative to the vertical axis of the cell. This characteristic contributes to explain the variations
42 in physical and mechanical properties of processed wood and fiber. *Pinus pseudostrobus* var.
43 *apulcensis* is a forest species native to Mexico with great economic and industrial
44 importance. 10 healthy trees of this species were randomly selected in a plantation in
45 Texcoco, Mexico, and from each tree a core was extracted at 1,30 m stem height. Microfibril
46 angle, basic density (BD), tracheid length (TL) and volumetric contraction (VC) were
47 measured in order to determine the effect of MFA on said technological characteristics in
48 this wood. An average MFA of 28,8° was obtained; Average BD of 0,43 g·cm⁻³; Average TL
49 of 3516 µm and average VC of 10,3 %. Generalized additive models (GAM) were adjusted
50 between the MFA as explanatory variable and each of the three response variables separately.
51 Finally, a generalized additive model was adjusted to know the behavior of BD, TL and VC
52 as a function of MFA. This generated model had an explanatory capacity of 88,2 %. The best
53 explained variable by MFA was TL (explanatory capacity of 83,3 %). It would be interesting
54 to see if this behavior occurs in other Mexican pine species.

55 **Keywords:** Basic density, generalized additive model, MFA, tracheid length, volumetric
56 shrinkage

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69 **INTRODUCCIÓN**

70 *Pinus pseudostrabus* var. *apulcensis* es una especie nativa de México, con presencia en
71 bosques templados y en plantaciones comerciales en los estados del centro y sur del país.
72 Tiene gran importancia económica e industrial pues se usa en la fabricación de pulpa para
73 papel, triplay, cajas de empaque, molduras, muebles y artesanías (Conafor 2010). Es una
74 especie de crecimiento rápido y produce madera adecuada para usos diversos, por ello se
75 considera apropiada para el establecimiento de plantaciones comerciales (López-Upton
76 2002). Su densidad básica varía de $0,40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a $0,48 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Esta propiedad se relaciona
77 con el producto final, dicha madera es utilizada en celulosa para papel, muebles infantiles,
78 rústicos, arcones, puertas, ventanas, molduras, plataformas para zapatos, artesanías,
79 grabados, cerillos (De la Paz-Pérez y Olvera 1981; Bermejo y Eguiluz 1993). En cuanto a su
80 trabajabilidad, Martínez y Martínez-Pinillos (1996) clasifican esta madera como buena en
81 cuanto a barrenado, buena en escopleado y excelente en moldurado.

82 Las microfibrillas de celulosa son las unidades básicas que conforman la pared celular de las
83 plantas. Estas microestructuras son paralelas entre ellas, cambiando la orientación de las
84 mismas de un plano al siguiente (Barnett y Bonham 2004). A la inclinación relacionada al
85 eje vertical de la célula se le llama ángulo microfibrilar (AMF) (Lima *et al.* 2014). Para
86 interpretar los efectos que el AMF tiene en la calidad de la madera es importante usar métodos
87 de medición consistentes y precisos (Chauhan *et al.* 2006). La microscopía de luz polarizada
88 es un método confiable, tal como lo es la difracción de rayos X (Meylan 1967; Peter *et al.*
89 2003).

90 El primer registro de estudios sobre la inclinación de las microfibrillas data de 1864, cuando
91 el científico alemán Karl von Nägeli observó estriaciones en la pared celular de las traqueidas

92 de *Abies excelsa* y concluyó que esas estriaciones indican la orientación de las microfibrillas
93 compuestas de celulosa, constituidas a su vez de moléculas de glucosa unidos por enlaces
94 beta-1,4, alineadas y paralelas entre ellas en micelios cristalinos (Barnett y Bonham 2004).
95 Desde mediados del siglo pasado, se sabe que esta característica influye en la rigidez de la
96 madera (Cave 1968) y que afecta sus propiedades, especialmente en coníferas (Barber y
97 Meylan 1964). En la década de los noventa, Butterfield (1998) concluyó que el AMF es la
98 característica fundamental que explica la baja calidad de la madera sólida de coníferas en
99 plantaciones de rápido crecimiento. En estudios recientes, Donaldson (2008) menciona que
100 la orientación y la organización de las microfibrillas de celulosa contribuyen en explicar las
101 variaciones en las propiedades físicas de la madera y de la fibra procesada. Tabet y Abdul
102 Aziz (2013) afirman que la inclinación de las microfibrillas de celulosa de la pared celular
103 en la madera de coníferas influye significativamente en sus propiedades mecánicas. Por
104 ejemplo, en la madera estructural, el ángulo microfibrilar es determinante en el módulo de
105 elasticidad, en la anisotropía de la contracción, en la resistencia a la compresión de la madera,
106 la contracción longitudinal y como indicador de rigidez; en cuanto a la pulpa para papel, el
107 ángulo microfibrilar se relaciona con la resistencia a la tracción (Treacy *et al.* 2000; Deresse
108 *et al.* 2003; Gherardi y Lima 2012).

109 La relación entre el AMF y la calidad de la madera ha quedado demostrada en diversos
110 trabajos. Kojima y Yamamoto (2004) determinaron que la deformación por tracción
111 longitudinal depende en gran medida del AMF, pues su relación es directamente proporcional
112 y Lube *et al.* (2015) encontraron que el AMF se incrementa debido a las deformaciones de
113 las microfibrillas al reducir el contenido de humedad en el secado. Además, se encontró que
114 el Módulo de Elasticidad en la madera depende de dicha característica (Vanerek *et al.* 2017).

115 Por tal motivo, es importante estudiar el efecto del AMF en las características tecnológicas
116 de las especies comerciales más importantes, esto permitirá tener conocimiento a nivel
117 microscópico de la madera como materia prima, con lo cual la industria forestal pueda
118 emplearla de forma más eficiente. Determinar el AMF es operacionalmente lento por eso
119 existen mediciones de otras características como lo son la densidad básica, longitud de
120 traqueidas y contracciones lineales, con las cuales de manera indirecta se puede conocer el
121 AMF.

122 En México, el *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2017* reporta que, del total de
123 la producción forestal maderable del país, el 70,9 % corresponde al género *Pinus* spp. con
124 6,3 millones de m³rollo y de esta producción el 73,7 % se destina al aserrío (Semarnat 2020).
125 Por tal razón, es importante realizar estudios sobre la microestructura de la madera de este
126 género y examinar la relación que guarda con sus características tecnológicas y calidad. Se
127 requiere conocimiento que explique la influencia que ejerce una microestructura como el
128 ángulo microfibrilar sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Por lo anterior,
129 el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del ángulo microfibrilar (AMF) sobre la
130 densidad básica (DB), la longitud de traqueidas (LT) y la contracción volumétrica (CV) de
131 *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*.

132 **MATERIALES Y MÉTODOS**

133 **Obtención de las muestras**

134 Primero se seleccionaron al azar 10 individuos sanos de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*
135 de una plantación de 36 años ubicada en la Universidad Autónoma Chapingo en las

136 coordenadas $19^{\circ} 29' 33,3''$ de latitud norte y $98^{\circ} 53' 36,4''$ de longitud oeste, a 2242 m de
137 altitud (Figura 1).



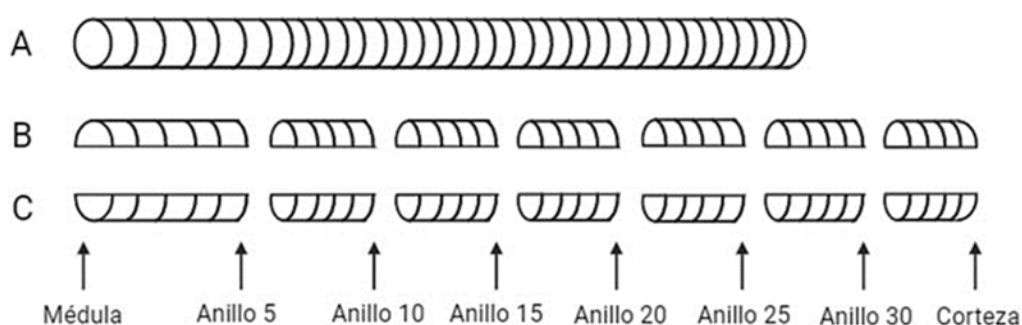
143 **Figura 1:** Lugar de colecta de árboles de la especie *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*.

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



154 **Figura 2:** Obtención de los núcleos de 10 árboles sanos de la especie *Pinus pseudostrobus*
155 var. *apulcensis*.

156 Finalmente, en el Laboratorio de Anatomía de la Madera, cada núcleo se dividió
157 transversalmente cada cinco anillos, para hacer un total de ocho zonas de estudio por cada
158 árbol: anillo 1, anillo 5, anillo 10, anillo 15, anillo 20, anillo 25, anillo 30 y corteza (Figura
159 3). A su vez, cada parte se dividió horizontalmente en dos partes: la parte superior para medir
160 el AMF y la longitud de traqueidas (Figura 3-B), mientras que la parte inferior para
161 determinar la densidad básica y la contracción volumétrica (Figura 3-C).



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

163 **Determinación del AMF**

164 Se realizaron cortes tangenciales de 15 μm de grosor. Las mediciones se hicieron en el último
165 anillo de cada sección tomando en consideración la dirección medula – corteza con un
166 microtomo marca Leica Biosystems (Nussloch GmbH) modelo SM 2000R. Los cortes se
167 colocaron en un frasco de vidrio, se les agregó una mezcla en partes iguales de ácido acético
168 glacial y peróxido de hidrógeno y se pusieron en el horno de secado a 60 °C por 24 horas.
169 Posteriormente el material se agitó para disociarlo completamente, y se lavó con agua
170 destilada hasta eliminar la mezcla.

171 Para medir el AMF se utilizó un microscopio de luz polarizada marca Labomed (Labo
172 America Inc.) LxPOL, con platina móvil y goniómetro graduado de 0° a 360° (Figura 4). Se

173 siguió la metodología propuesta por Preston (1974), que consiste en observar al microscopio
174 de luz polarizada la pared celular de la traqueida y ubicarla en el eje vertical del ocular.
175 Posteriormente se realiza un giro lento de la platina hacia la derecha o izquierda y se detiene
176 cuando la pared celular observada se oscurece completamente. Finalmente, se mide y se
177 registra el ángulo que se identificó con el goniómetro entre estos dos puntos. Se realizaron
178 30 mediciones por cada zona de observación.



185 **Figura 4:** Medición del AMF. Se utilizó un microscopio marca Labomed (Labo America
186 Inc.), modelo LxPOL con software para análisis de imágenes conectado a la cámara.

187 **Determinación de longitud de traqueidas**

188 Para determinar la longitud de traqueidas se empleó la metodología de Franklin (1945). Se
189 obtuvieron astillas de cada una de las ocho zonas de observación, se depositaron en un frasco
190 de vidrio, se les agregó una mezcla de partes iguales de ácido acético glacial y de peróxido
191 de hidrógeno. Se colocaron en el horno a 60 °C por 72 horas, posteriormente el material se
192 agitó vigorosamente y se lavó con agua destilada. Las fibras se colocaron en portaobjetos
193 para su observación y medición. Se midieron 30 fibras por zona de estudio, con un
194 microscopio estereoscópico con sistema de microfotografía marca Leica Biosystems

195 (Nussloch GmbH), Modelo EZ4HD, equipado con el software Leica Application Suite
196 versión 3.3.0.

197 **Determinación de densidad básica**

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

200 El cálculo de la densidad básica se realizó de acuerdo con el método empírico (Valencia y
201 Vargas 1997). El volumen de las muestras se obtuvo en estado verde por el método de
202 Arquímedes, posteriormente las muestras se depositaron en un horno a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta
203 alcanzar un peso constante, ambos con una balanza de precisión diezmilésima de gramo. La
204 densidad básica se calculó mediante la fórmula (Ec. 1):

$$205 \quad DB = \frac{P_0}{V_v} \quad (1)$$

206 Donde:

207 DB = Densidad básica de la madera ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

208 P_0 = Peso anhidro (g)

209 V_v = Volumen en estado verde (cm^3)

210 **Cálculo de la contracción volumétrica**

211 Para obtener la contracción volumétrica se siguió la metodología de Navarro (2005). Se
212 cortaron prismas rectangulares con cortes típicos de cada una de las zonas de estudio, en cada
213 probeta se midió en estado verde el eje tangencial, radial y axial con un micrómetro con
214 precisión de centésima de milímetro y se determinó su volumen. Las probetas se introdujeron

215 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
216 nuevamente considerando los tres ejes y se calculó su volumen. El porcentaje de contracción
217 volumétrica se determinó con la siguiente fórmula (Ec. 2):

$$218 \quad \% \beta_{vt} = \frac{V_v - V_0}{V_v} \cdot 100 \quad (2)$$

219 Donde:

220 $\% \beta_{vt}$ = Contracción volumétrica en porcentaje

221 V_v = Volumen en estado verde (cm^3)

222 V_0 = Volumen en estado anhidro (cm^3)

223 **Modelo estadístico: Modelo Aditivo Generalizado**

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

230 En general, el modelo tiene una estructura de la forma (Ec. 3):

$$231 \quad g(\mu_i) = f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{1i}, x_{2i}) + \dots + \epsilon_i \quad (3)$$

232 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
233 distribución de la familia exponencial con media μ_i y parámetro de escala ϕ y las $f_j(\cdot)$ son
234 funciones de suavizado con covariables x_{ki} . (Wood 2017).

235 Para el análisis de los datos se empleó el software estadístico R, específicamente se usaron
236 los paquetes mgcv y ggplot2, se tomó al AMF como variable respuesta y la densidad básica,
237 la longitud de traqueidas, y la contracción volumétrica como variables explicativas.

238 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

	Densidad básica ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Longitud de traqueidas (μm)	Contracción volumétrica (%)	Ángulo microfibrilar ($^{\circ}$)
Mínimo	0,33	1750	5,8	16,2
Promedio	0,43	3516	10,3	28,8
Máximo	0,7	5328	15,7	48,5
Coefficiente de Variación (%)	15,6	23,6	19,1	24,8
n	80	80	80	80

240

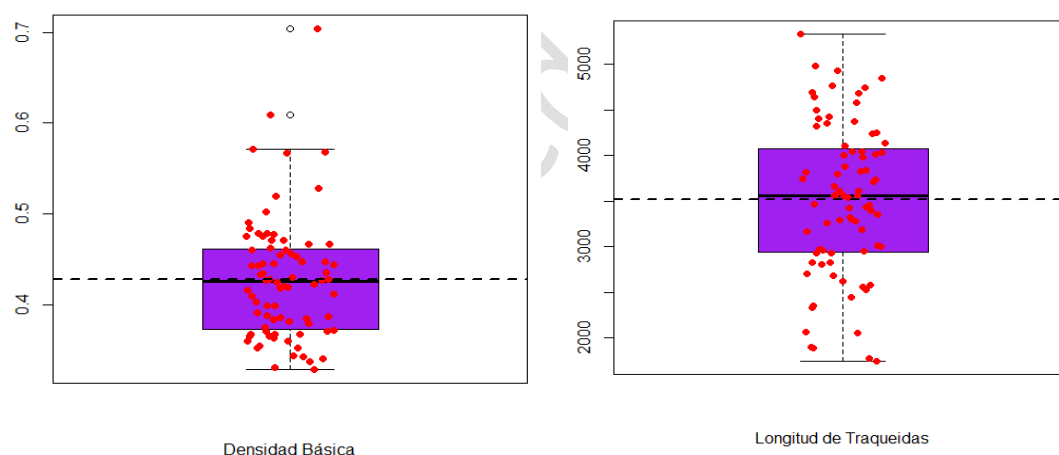
241 Densidad básica

242 Se encontró que la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* tiene una densidad básica
243 promedio de $0,43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Tabla 1; Figura 5). Sotomayor (2008) la reporta en $0,55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,
244 mientras que Aragón *et al.* (2020) obtuvieron una densidad básica promedio de $0,49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.
245 Estas discrepancias moderadas entre dichos valores se pueden deber a la calidad de sitio y
246 edad, que son diferentes. Al tomar como referencia la clasificación de la tabla FITECMA,
247 esta madera se encuentra en la categoría de densidad media (Sotomayor 2008) y también se
248 le describe como de densidad moderadamente liviana (Machuca *et al.* 2012).

249 Longitud de traqueidas

250 La longitud de traqueidas máxima registrada para esta especie fue de $5328 \mu\text{m}$; la mínima de
251 $1750 \mu\text{m}$ y la longitud promedio de $3516 \mu\text{m}$ (Tabla 1; Figura 5). Las diferencias entre los

252 valores mínimos y máximos se pueden deber a la presencia de madera juvenil y madura, la
253 cual no se diferenció en este estudio. En comparación, otras especies de pino mexicanas como
254 *Pinus patula*, reportan una longitud de traqueidas promedio de 3210 μm . (Goché *et al.* 2011;
255 Escobar-Sandoval *et al.* 2018). Una investigación realizada sobre seis especies de pino del
256 norte de México reportó los promedios de longitud de traqueidas de *Pinus arizonica* (3274
257 μm), *Pinus cooperi* (4135 μm), *Pinus durangensis* (3702 μm), *Pinus herrerae* (4372 μm),
258 *Pinus leiophylla*, (4486 μm) y *Pinus teocote* (3859 μm) (de la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo
259 2016). Como se puede observar, los valores promedios obtenidos para esta característica
260 anatómica de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* se acercan al valor promedio de otras especies
261 del género *Pinus*, en particular a *P. arizonica*, *P. durangensis* y *P. patula*.



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

265 **Contracción volumétrica**

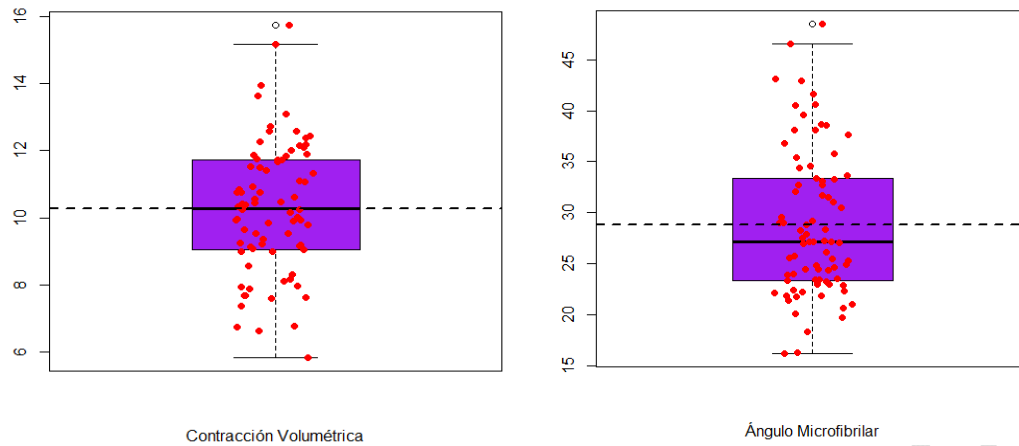
266 Schulgasser y Witztum (2015) realizaron un estudio sobre la relación entre la densidad y la
267 contracción de la madera en un rango efectivo entre $0,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y $0,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en el cual llegaron
268 a la conclusión que cuando la densidad básica es muy baja, la contracción volumétrica se

269 aproxima a 4 %. En el caso de *Pinus pseudostrobus var apulcensis* se encontró de acuerdo
270 con esa afirmación pues el valor mínimo de contracción volumétrica fue de 5,8 % en la zona
271 del anillo 1, que tuvo la menor densidad básica ($0,33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). El valor promedio fue de 10,3
272 % (Tabla 1). A manera de comparación, para *Pinus ayacahuite* se reportó una contracción
273 volumétrica promedio de 12,59 % (Goché-Telles *et al.* 2000) y Riesco y Diaz (2007)
274 reportaron la contracción volumétrica de tres especies de pino: *Pinus pinaster* (13,8 %), *Pinus*
275 *radiata* (10,7 %) y *Pinus sylvestris* (12,3 %).

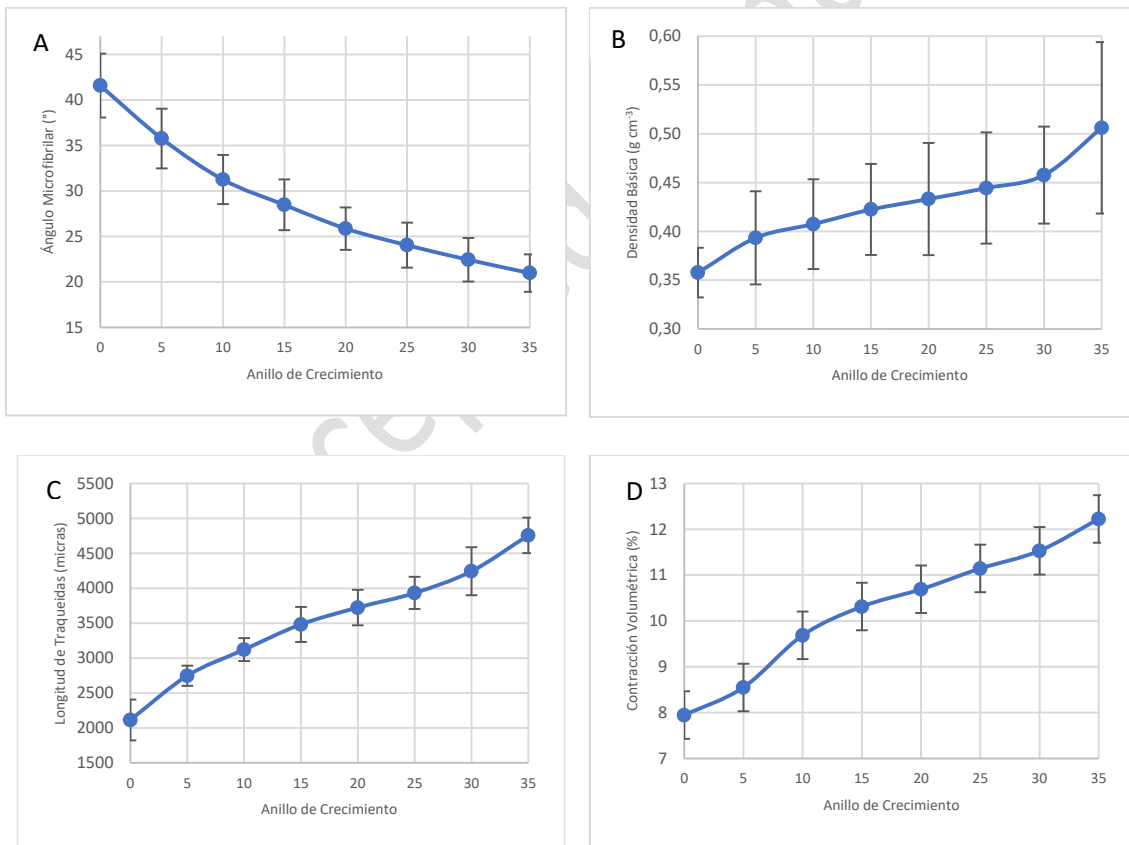
276 **Ángulo microfibrilar**

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

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



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



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

295

296 **Relación entre la densidad básica y el AMF**

297 De acuerdo con Clark y Daniels (2004) y Watt *et al.* (2011) es común observar una
298 correlación negativa entre el AMF y la densidad básica; sin embargo, Donaldson (2008)
299 reportó que esa correlación suele ser variable. Para determinar la influencia de la inclinación
300 de las microfibrillas sobre la densidad básica de la madera en esta especie, se ajustó un
301 modelo aditivo generalizado entre la DB y el AMF. El modelo aditivo generalizado resultó
302 significativo (Anexo I) lo cual implica que la densidad básica permite explicar el
303 comportamiento del ángulo microfibrilar; en términos de la devianza se tiene que el 55,9 %
304 de la variabilidad total presentada en el ángulo microfibrilar es explicada por la densidad
305 básica.

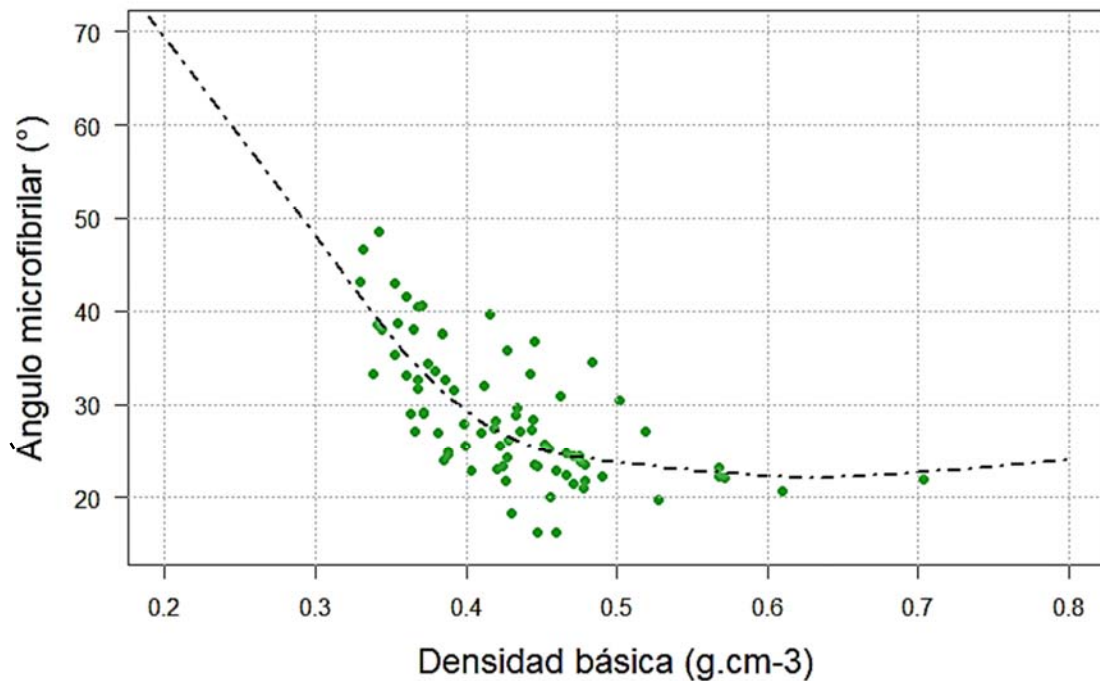
306 El modelo mostró claramente una tendencia negativa entre la DB y el AMF (Figura 8). Sin
307 embargo, aún se considera que tal variable no explica satisfactoriamente el comportamiento
308 del AMF. Winck *et al.* (2012) reportaron una correlación para un modelo lineal entre el AMF
309 y la densidad básica en *Pinus taeda* ($R=-0,59$) y para la misma especie, Isik *et al.* (2008)
310 afirmaron que la densidad básica se comportó como un predictor variable del AMF y explicó
311 únicamente el 36 % de la variabilidad total de la variable respuesta. En la Figura 8 se
312 presentan los valores ajustados y los valores observados entre la densidad básica y el AMF.
313 En tal figura, se puede observar una tendencia no lineal descendente y después de alcanzar
314 una densidad básica de aproximadamente $0,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, el AMF tiende a mantenerse estable.

315

316

317

318

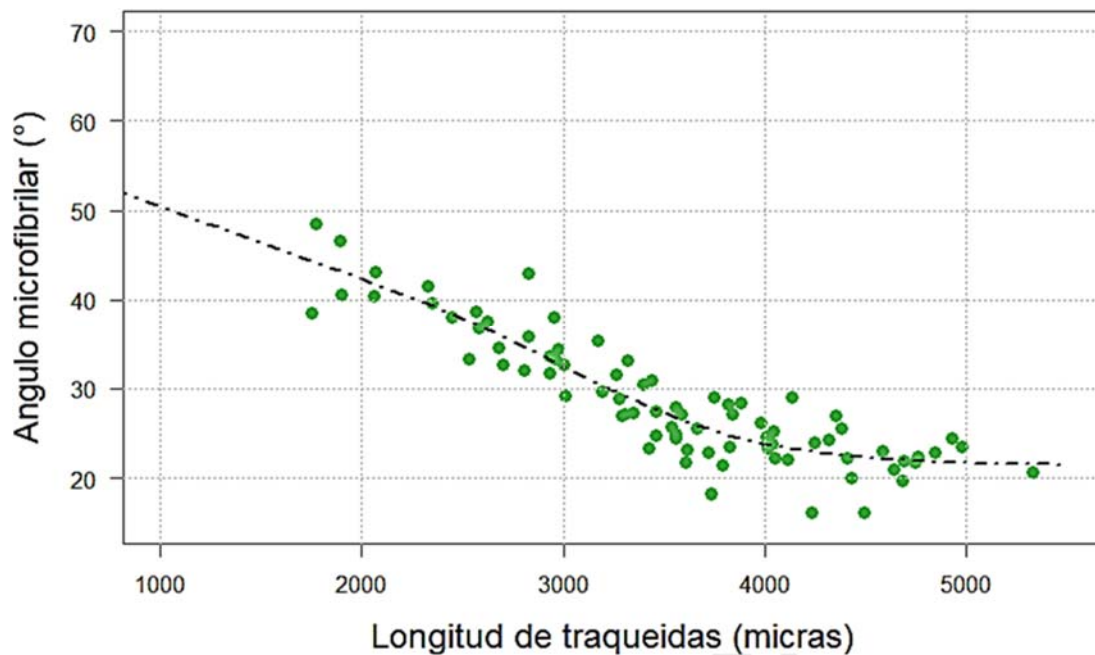


319 **Figura 8:** Comportamiento de la DB en función del AMF. Los puntos verdes indican las
320 observaciones y la línea punteada, el modelo.

321 **Relación entre la longitud de traqueidas y el AMF**

322 Se ha demostrado que el AMF tiene una correlación de moderada a fuerte con la longitud de
323 traqueidas (Bonham y Barnett 2001; Chiu *et al.* 2005; Fabisiak *et al.* 2012; Schimleck *et al.*
324 2018). El modelo aditivo generalizado ajustado para esta variable (Figura 9) resultó ser
325 significativo con un nivel de significancia de 0,05 (ver Anexo I). El cual, de acuerdo con la
326 devianza, explica el 83,3 % de la variabilidad total que presenta el AMF; por lo tanto, resultó
327 ser mejor modelo que el anterior (DB). Al igual que en el caso anterior, el AMF presentó una
328 tendencia no lineal negativa (Figura 9). Es evidente que, aproximadamente, después de una
329 longitud de 4500 μm el AMF no presenta grandes cambios, por lo que se puede inferir que
330 se estabiliza en los 21°.

331



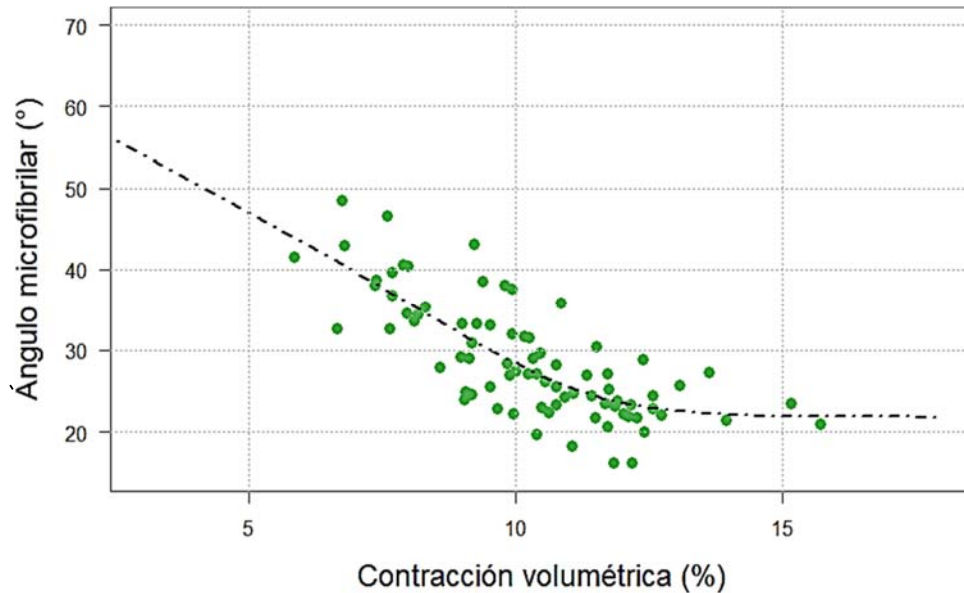
332

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

335 **Relación entre la contracción volumétrica y el AMF**

336 Considerando la contracción volumétrica como variable explicativa, nuevamente, el modelo
337 ajustado resultó significativo con un nivel de significancia de 0,05. En este caso, de acuerdo
338 con la devianza, la contracción volumétrica explica el 61,2 % de la variabilidad total del
339 AMF, siendo mejor que el obtenido con la densidad básica y peor que el obtenido con la
340 longitud de traqueidas. El comportamiento del modelo ajustado se presenta en la Figura 10.
341 Tal comportamiento es semejante al encontrado con la densidad básica y la longitud de
342 traqueidas, descendente no lineal. En donde, después de una contracción volumétrica de
343 aproximadamente 14 %, los cambios en el AMF son pequeños. Lo anterior resultó acorde
344 con lo que reportan algunos autores; por ejemplo, Donaldson (2008), menciona que uno de
345 los parámetros más importantes que afectan la contracción en la madera es el AMF. Por otra

346 parte, Schulgasser y Witztum (2015) concluyeron que la contracción volumétrica de la
347 madera se incrementa conforme aumenta la densidad, lo cual se debe a su microestructura.

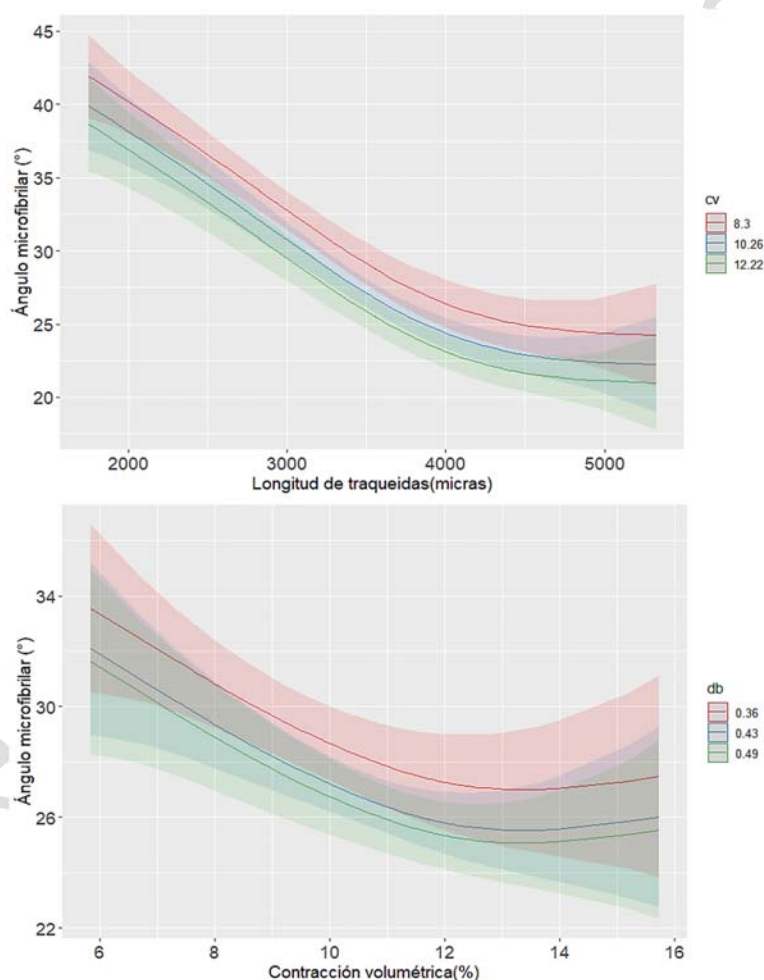


348 **Figura 10:** Comportamiento del AMF en función de la contracción volumétrica. Los
349 puntos verdes indican las observaciones y la línea punteada, el modelo.

350 **Relación del AMF con la densidad básica, longitud de traqueidas y contracción**
351 **volumétrica**

352 El AMF es, junto con la densidad, una de las propiedades más importantes para determinar
353 el uso final de la madera (Auty *et al.* 2013). Diversos trabajos se han hecho con el objetivo
354 de relacionar esta característica ultraestructural con sus propiedades tecnológicas (Jäger *et*
355 *al.* 2011; Auty *et al.* 2013; Essien *et al.* 2018; Vega *et al.* 2020). Considerando que las tres
356 características tecnológicas (DB, LT y CV) resultaron significativas de manera individual
357 para explicar el comportamiento del AMF, se ajustó un modelo aditivo generalizado con las
358 tres covariables (DB, LT y CV) para obtener un modelo más adecuado para modelar el
359 comportamiento del AMF. Los resultados obtenidos (Ver Anexo I) indican que el modelo
360 fue significativo con un $\alpha = 0,05$ y explica el 88,2 % de la variabilidad total que presenta el

361 AMF, de tal manera que resultó ser mejor modelo para explicar el comportamiento del AMF
362 comparado con los modelos ajustados con cada una de las características tecnológicas
363 estudiadas. En las figuras 11 y 12 se muestra el comportamiento del AMF en función de la
364 LT y la CV, manteniendo la DB y la LT fija, respectivamente. En tales figuras se observa
365 que el cambio del AMF es pequeño después de 4500 μm y 13 % respectivamente. Lo anterior
366 implica que a partir de las zonas de estudio cercanas a la corteza (anillos 30 a 36), el AMF
367 se mantiene estable.



368 **Figura 12:** Comportamiento del ángulo microfibrilar en función de la CV y la DB
369 manteniendo la LT fija. Las líneas de colores muestran el modelo para cada valor de DB y
370 sus intervalos de confianza.

371

372 **CONCLUSIONES**

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

376 Este trabajo mostró que el AMF se correlaciona con las características tecnológicas de la
377 madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*. Esta correlación se observa claramente con
378 el modelo aditivo generalizado con tres covariables (DB, LT y CV) pues resultó ser el mejor
379 para explicar su comportamiento en comparación con los modelos ajustados en los que se
380 consideró solo una de las tres covariables en función del AMF.

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

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

392

393

394 **REFERENCIAS**

- 395 **Aragón, R.D.; Rodríguez, G.; Vargas, J.J.; Enríquez del Valle, J.R.; Hernández, A.;**
396 **Campos, G.V. 2020.** Phenotype selection and reproductive characteristics of *Pinus*
397 *pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G. Harrison. *Rev Mex Cienc For* 11(59): 118-
398 140. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.700>.
- 399 **Auty, D.; Gardiner, B.A.; Achim, A.; Moore, J.R.; Cameron, A.D. 2013.** Models for
400 predicting microfibril angle variation in Scots pine. *Ann For Sci* 70: 209-218.
401 <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0248-6>
- 402 **Barber, N.F.; Meylan, B.A. 1964.** The anisotropic shrinkage of wood. *Holzforschung* 18(5):
403 146-56. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1964.18.5.146>
- 404 **Barnett, J.R.; Bonham, V.A. 2004.** Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood
405 fibres. *Biol Rev* 79(2): 461-472. <https://doi.org/10.1017/S1464793103006377>
- 406 **Bermejo, B.; Eguiluz, T. 1993.** Variación natural del peso específico y longitud de
407 traqueidas en poblaciones de *Pinus pseudostrobus* de la región central de México.
408 *Agrociencia Serie Rec Nat Renov* 3(2): 23-35.
- 409 **Bonham, V.A.; Barnett, J.R. 2001.** Fibre length and microfibril angle in Silver birch (*Betula*
410 *pendula* Roth). *Holzforschung* 55: 159–162. <https://doi.org/10.1515/HF.2001.026>
- 411 **Butterfield, B.G. 1998.** *Proceeding of the IAWA/IUFRO Workshop on Microfibril angle in*
412 *wood*. University of Canterbury, New Zealand. 410 pp.
- 413 **Cave, I.D. 1968.** The anisotropic elasticity of the plant cell wall. *Wood Sci Technol* 2(4):
414 268-278. <https://doi.org/10.1007/BF00350273>

- 415 **Chauhan, S.; Donnelly, R.; Huang, C.; Nakada, R.; Yafang, Y.; Walker, J.C.F. 2006.**
416 Wood quality: in context. In *Primary wood processing: principles and practice*, Walker,
417 J.C.F. (Ed.), 2nd edition, Springer, New Zealand. 121-158 pp. [https://doi.org/10.1007/1-](https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7)
418 [4020-4393-7](https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7)
- 419 **Chiu, C-M.; Lin C.J.; Wang, S.Y. 2005.** Tracheid length and microfibril angle of young
420 Taiwania grown under different thinning and pruning treatments. *Wood Fiber Sci* 37: 437-
421 444. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1464>
- 422 **Clark, A.; Daniels, R.F. 2004.** Modelling the effects of physiographic region on wood
423 properties of planted loblolly pine in the southern US: Connection between forest resources
424 and wood quality: Modelling approaches and simulation software. In *Fourth Workshop*
425 *IUFRO Working Party S5.01-04*. Harrison Hot Springs, BC, Canada. Sept. 8-15 2002.
426 INRA-Centre de Recherches de Nancy, France. Pp. 54–60.
- 427 **Comisión Nacional Forestal. CoNaFor. 2010.** SIRE - Paquetes tecnológicos: *Pinus*
428 *pseudostrobus*. México, 7 pp. <https://cutt.ly/CbJSICm>
- 429 **De la Paz-Pérez, C.; Dávalos-Sotelo, R. 2016.** Anatomía de la madera de seis especies de
430 *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y Bosques* 22(3): 113-132.
431 <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231460>
- 432 **De la Paz-Pérez, C.; Olvera C.P. 1981.** *Anatomía de la madera de 16 especies de coníferas*.
433 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. SARH. Boletín Técnico No. 69. México,
434 D.F., Mexico. 111 p.
- 435 **Donaldson, L. 2008.** Microfibril angle: measurement, variation, and relationships - a review.
436 *IAWA J* 29(4): 345-386. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000192>

- 437 **Donaldson, L.; P. Xu. 2005.** Microfibril orientation across the secondary cell wall of radiata
438 pine tracheids. *Trees* 19: 644–653. <https://doi.org/10.1007/s00468-005-0428-1>
- 439 **Deresse, T.; Shepard, R.K.; Shaler, S.M. 2003.** Microfibril angle variation in red pine
440 (*Pinus resinosa* Ait.) and its relation to the strength and stiffness of early juvenile wood.
441 *Forest Prod J* 53(7/8): 34-40.
442 https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902222984028231
- 443 **Erasmus, J.; Kunneke, A.; Drew, D.M.; Wessels, B.C. 2018.** The effect of planting spacing
444 on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density. *Forestry* 91: 247–
445 258. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy005>
- 446 **Escobar-Sandoval, M.C.; Vargas-Hernández, J.J.; López-Upton, J.; Espinosa-**
447 **Zaragoza, S.; Borja-de la Rosa, A. 2018.** Parámetros genéticos de calidad de madera,
448 crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y Bosques*
449 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>
- 450 **Essien, C.; Via, K.B.; Acquah, G.; Gallagher, T.; McDonald, T.; Eckhardt, L.G. 2018.**
451 Effect of genetic sources on anatomical, morphological, and mechanical properties of 14-
452 year-old genetically improved loblolly pine families from two sites in the southern United
453 States. *J For Res* 29: 1519–1531. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0584-3>
- 454 **Fabisiak, E.; Moliński, W.; Kúdela, J.; Mania, P. 2012.** A study on the dependence
455 between tracheid lengths and microfibril angle in resonant wood of spruce (*Picea abies* L.).
456 *Ann Warsaw Agric Univ For Wood Technol* 77: 222-226. [http://annals-](http://annals-wuls.sggw.pl/?q=node/724)
457 [wuls.sggw.pl/?q=node/724](http://annals-wuls.sggw.pl/?q=node/724)

- 458 **Franklin, G.L. 1945.** Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin
459 composites, and a new macerating method for wood. *Nature* 155: 51.
460 <https://doi.org/10.1038/155051a0>
- 461 **Gherardi-Hein, P.R.; Tarcísio-Lima, J. 2012.** Relationships Between Microfibril Angle,
462 Modulus of Elasticity and Compressive Strength in Eucalyptus Wood. *Maderas-Cienc*
463 *Tecnol* 14(3): 267-274. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012005000002>
- 464 **Goche-Télles, J.R.; Fuentes-Salinas, M.; Borja-de la Rosa, A.; Ramírez-Maldonado, H.**
465 **2000.** Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de
466 *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii*. *Rev Chapingo Ser Cienc For Ambient* 6(1): 83-92.
- 467 **Goche, J.R.; Velázquez, M.A.; Borja de la Rosa, A.; Capulín, J.; Palacios, C. 2011.**
468 Variación radial de la densidad básica en *Pinus patula* Schltdl. et Cham. de tres localidades
469 en Hidalgo. *Rev Mex Cienc For* 2(7): 71-78. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.568>
- 470 **Isik, F.; Gumpertz, M.; Li, B.; Goldfarb, B.; Sun, X. 2008.** Analysis of cellulose
471 microfibril angle using a linear mixed model in *Pinus taeda* clones. *Can J For Res* 38: 1676-
472 1689. <https://doi.org/10.1139/X08-010>
- 473 **Jäger, A.; Bader, T.; Hofstetter, K.; Eberhardsteiner, J. 2011.** The relation between
474 indentation modulus, microfibril angle, and elastic properties of wood cell walls. *Composites,*
475 *Part A* 42(6): 677–685. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.02.007>
- 476 **Kojima, Y.; Yamamoto, H. 2004.** Effect of microfibril angle on the longitudinal tensile
477 creep behavior of wood. *J Wood Sci* 50: 301–306. [https://doi.org/10.1007/s10086-003-0565-](https://doi.org/10.1007/s10086-003-0565-3)
478 [3](https://doi.org/10.1007/s10086-003-0565-3)

- 479 **Lima, J.T.; Ribeiro, A.O.; Narciso, C.R.P. 2014.** Microfibril angle of *Eucalyptus grandis*
480 wood in relation to the cambial age. *Maderas-Cienc Tecnol* 16(4): 487-494.
481 <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000039>
- 482 **López-Upton J. 2002.** *Pinus pseudostrobus* Lindl. In *Tropical Tree Seed Manual*. J.A.
483 Vozzo (ed). USDA Forest Service. Pp: 636-638.
- 484 **Lube, V.; Lazarescu, C.; Mansfield, S.D.; Avramidis, S. 2015.** Wood microfibril angle
485 variation after drying. *Holzforschung* 70(5): 485-488. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0334>
- 486 **Machuca-Velasco, R.; Borja-de la Rosa, A.; Morales-Villalba, E.; Flores, R. 2012.**
487 Trabajabilidad de la madera de *Pinus oaxacana* Mirov. proveniente de una plantación en el
488 Estado de México. *Rev Chapingo Ser Cienc For Ambient* 18(2): 193-205.
489 <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.001>
- 490 **Martínez, C.J.L.; Martínez–Pinillos, C.E. 1996.** Características de cepillado y lijado de 33
491 especies de madera. *Madera y Bosques* 2(2): 11–27.
492 <https://doi.org/10.21829/myb.1996.221383>
- 493 **Meylan, B.A. 1967.** Measurement of microfibril angle by X-ray diffraction. *Forest Prod J*
494 17: 51–58.
- 495 **Navarro, J.; Borja, A.; Machuca, R. 2005.** Características tecnológicas de la madera de
496 palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de Tierra Colorada, Guerrero, México. *Rev*
497 *Chapingo Ser Cienc For Ambient* 11(1): 73-82.
498 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911110>

- 499 **Peter, G.F.; Benton, D.M.; K. Bennett. 2003.** A simple direct method for measurement of
500 microfibril angle in single fibres using differential interference contrast microscopy. *J Pulp*
501 *Pap Sci* 29: 274–280. <http://hdl.handle.net/1853/31884>
- 502 **Preston, R.D. 1974.** *The Physical Biology of Plant Cell Walls*. Chapman & Hall: London.
503 491 pp. <https://doi.org/10.1038/255749b0>
- 504 **R Core Team. 2021.** *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation
505 for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- 506 **Schimleck, L.R.; Antony, F.; Dahlen, J.; Moore, J. 2018.** Wood and fiber quality of
507 plantation-grown conifers: A summary of research with an emphasis on loblolly and radiata
508 pine. *Forests* 9(6): 298. <https://doi.org/10.3390/f9060298>
- 509 **Schulgasser, K.; Witztum, A. 2015.** How the relationship between density and shrinkage of
510 wood depends on its microstructure. *Wood Sci Technol* 49: 389–401.
511 <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0699-7>
- 512 **Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Semarnat. 2020.** *Anuario*
513 *Estadístico de la Producción Forestal 2017*. México. 288 pp.
514 <http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2020/2017.pdf>
- 515 **Sotomayor, C. 2008.** *Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de*
516 *maderas mexicanas*. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad
517 Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. <https://cutt.ly/MbJOSAJ>

- 518 **Tabet, T.A.; Abdul Aziz, F. 2013.** Cellulose microfibril angle in wood and its dynamic
519 mechanical significance. In *Cellulose - Fundamental Aspects*, Canada. Pp. 113-142.
520 <https://doi.org/10.5772/2705>
- 521 **Treacy, M.; Dhubhain, A.N.; Evertsen, J. 2000.** The influence of microfibril angle on
522 modulus of elasticity and modulus of rupture in four provenances of Irish grown Sitka spruce
523 (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr). *J Inst Wood Sci* 15: 211-220.
- 524 **Valencia, S.; Vargas, J. 1997.** Método empírico para estimar la densidad básica en muestras
525 pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1): 81-87.
526 <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>
- 527 **Vanerek, J.; Martinek, R.; Cada, P.; Kuklik, P. 2017.** The influence of microfibril angle
528 on the wood stiffness parameters. *Procedia Eng* 195: 259-264.
529 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.552>
- 530 **Vega, M.; Hamilton, M.; Downes, G.; Harrison, P.A.; Potts, B. 2020.** Radial variation in
531 modulus of elasticity, microfibril angle and wood density of veneer logs from plantation-
532 grown *Eucalyptus nitens*. *Ann For Sci* 77(3). <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00961-1>
- 533 **Watt, M.S.; Zoric, B.; Kimberley, M.O.; Harrington, J. 2011.** Influence of stocking on
534 radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a
535 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial. *Can J For Res* 41(7): 1422–1431.
536 <https://doi.org/10.1139/x11-070>
- 537 **Winck, R.A.; Fassola, H.E.; Área, M.C. 2015.** Efecto del raleo sobre las propiedades
538 anatómicas de la madera de *Pinus taeda*. *Maderas-Cienc Tecnol* 17(2): 391-406.
539 <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000037>

540 **Winck, R.A.; Fassola, H.E.; Tomazello, M.F.; Area, M.C. 2012.** Caso de estudio: Ángulo
541 microfibrilar y su relación con la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* L. con manejo
542 silvopastoril. En *VII Edición Congreso Iberoamericano de Investigación Celulosa y Papel*.
543 Sao Paulo, Brasil. [http://www.celso-](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/2012_Angulo_fibrilar_Pinus.pdf)
544 [foelkel.com.br/artigos/outros/2012_Angulo_fibrilar_Pinus.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/2012_Angulo_fibrilar_Pinus.pdf)

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

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559 **ANEXO I**

560

561 **Resumen del Modelo Aditivo Generalizado AMF vs DB**

562

563 Family: gaussian

564 Link **function**: identity

565

566 Formula:

567 $\text{amf} \sim \text{s}(\text{db}, \text{bs} = \text{"ps"}, \text{m} = 2, \text{k} = 10)$

568

569 Parametric coefficients:

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

572 ---

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

574

575 Approximate significance of smooth terms:

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

578 ---

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

580

581 R-sq.(adj) = 0.54 Deviance explained = 55.9%

582 -REML = 243.53 Scale est. = 23.556 n = 80

583

584 **Resumen del Modelo Aditivo Generalizado AMF vs LT**

585

586 Family: gaussian

587 Link **function**: identity

588

589 Formula:

590 $\text{amf} \sim \text{s}(\text{lt}, \text{bs} = \text{"ps"}, \text{m} = 2, \text{k} = 10)$

591

592 Parametric coefficients:

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

595 ---

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

597

598 Approximate significance of smooth terms:

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

601 ---

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

603

604 R-sq.(adj) = 0.826 Deviance explained = 83.3%

605 -REML = 206.24 Scale est. = 8.9245 n = 80

606

607

608 **Resumen del Modelo Aditivo Generalizado AMF vs CV**

609

610 Family: gaussian

611 Link **function**: identity

```

612
613 Formula:
614 amf ~ s(cv, bs = "ps", m = 2, k = 10)
615
616 Parametric coefficients:
617             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
618 (Intercept) 28.8004      0.5067  56.84  <2e-16 ***
619 ---
620 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
621
622 Approximate significance of smooth terms:
623             edf Ref.df      F p-value
624 s(cv) 2.711      9 13.09  <2e-16 ***
625 ---
626 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
627
628 R-sq.(adj) = 0.599  Deviance explained = 61.2%
629 -REML = 237.43  Scale est. = 20.543    n = 80
630
  
```

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

```

631
632 Family: gaussian
633 Link function: identity
634
635 Formula:
636 amf ~ s(db, bs = "ps", m = 2, k = 10) + s(lt, bs = "ps",
637       m = 2, k = 10) + s(cv, bs = "ps", m = 2, k = 10)
638
639 Parametric coefficients:
640             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
641 (Intercept) 28.8004      0.2867 100.4  <2e-16 ***
642 ---
643 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
644
645 Approximate significance of smooth terms:
646             edf Ref.df      F p-value
647 s(db) 1.290      9 0.566 0.019103 *
648 s(lt) 2.974      9 15.782 < 2e-16 ***
649 s(cv) 2.178      9 1.724 0.000261 ***
650 ---
651 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
652
653 R-sq.(adj) = 0.872  Deviance explained = 88.2%
654
  
```

655
 656
 657
 658
 659
 660