

# **EFFECTO DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL EN LA FORMACIÓN DE MADERA EN ARBOLES REMANENTES DE *Abies religiosa***

## **FOREST HARVESTING EFFECT ON WOOD FORMATION IN REMNANT TREES OF *Abies religiosa***

***Fabiola Rojas-García***<sup>1,\*</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-9832-4705>

***Armando Gómez-Guerrero***<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-7261-1279>

***Teresa Terrazas***<sup>3</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-7749-5126>

***Angel Endara-Agramont***<sup>4</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-8413-6551>

***Genaro Gutiérrez-García***<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-2299-1194>

***Valentín Reyes-Hernández***<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-1804-412X>

***Gregorio Ángeles-Pérez***<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-9550-2825>

***Bernardus de Jong***<sup>5</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-3264-2759>

### **RESUMEN**

El manejo forestal puede modificar la estructura y la calidad de la madera. En este estudio se evaluó el efecto de un aprovechamiento forestal sobre la formación de madera en árboles remanentes. En un bosque de *Abies religiosa* (oyamel) intervenido con un aclareo del 50 % de área basal durante 2014, se inventariaron 10 sitios de muestreo (1000 m<sup>2</sup>). Se analizaron mediante técnicas dendrocronológicas 80 núcleos de crecimiento provenientes de 40 árboles remanentes. Se evaluó la microdensidad y las características celulares de la madera

<sup>1</sup>Universidad Rosario Castellanos. Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Texcoco, México.

<sup>3</sup>Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Ciudad de México, México.

<sup>4</sup>Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Toluca, México.

<sup>5</sup>El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Campeche. Campeche, México.

\*Autor para correspondencia: fabiosxt01981@gmail.com

Recibido: 12.02.2022 Aceptado: 26.06.2024

tardía. Los anillos de crecimiento de *Abies religiosa* (oyamel) presentaron una buena delimitación entre madera temprana y madera tardía en la cronología de 90 años desarrollada. El aprovechamiento forestal incrementó en 42,4 % el ancho de anillo; la microdensidad varió de 189 kg·m<sup>-3</sup> a 417 kg·m<sup>-3</sup> (= 335 kg·m<sup>-3</sup>); las traqueidas presentaron una disminución de 8,02 % en el espesor de la pared celular y el diámetro del lumen aumentó un 29,8 %. Se identificó una fila de canales traumáticos fechada en 2014, posiblemente relacionados con el estrés de la corta. Las modificaciones en la anatomía de la madera causaron una variación en la microdensidad de la madera, que repercute en la cuantificación volumétrica y de biomasa a nivel del rodal.

**Palabras clave:** *Abies religiosa*, aprovechamiento forestal, dendroanatomía, dendroecología, espesor de la pared celular, traqueida, madera tardía, microdensidad de la madera.

## ABSTRACT

Forest management can modify the structure and quality of wood. In this study, the effect of a forest exploitation on the formation of wood in remaining trees was evaluated. In a forest of *Abies religiosa* (oyamel) intervened with a thinning of 50 % of the basal area during 2014, 10 sampling sites (1000 m<sup>2</sup>) were inventoried. 80 growth cores from 40 remaining trees were analyzed using dendrochronological techniques. Microdensity and cellular characteristics of latewood were evaluated. The growth rings of *Abies religiosa* (oyamel) showed a good delimitation between early wood and late wood in the 90-year chronology developed. Forest harvesting increased ring widths by 42,4 %; the microdensity varied from 189 kg·m<sup>-3</sup> to 417 kg·m<sup>-3</sup> ( $\mu= 335 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); the tracheids presented a decrease of 8,02 % in the thickness of the cell wall and the length of the lumen increased by 29,8 %. A row of traumatic canals dated to 2014 was identified, possibly related to cutting stress. The modifications in the anatomy of the wood caused a variation in the microdensity of the wood, which affects the volumetric and biomass quantification at the stand level.

**Keywords:** *Abies religiosa*, dendroanatomy, dendroecology, forest management, latewood, thickness cell wall, tracheid, wood microdensity.

## INTRODUCCIÓN

La formación de madera puede verse afectada por las condiciones ambientales, incluido el clima, edad cambial, disponibilidad de recursos y prácticas de manejo (Zobel y Sprague 1998). El número y el tamaño de las células del xilema determinan el ancho del anillo de crecimiento y la proporción de madera temprana y tardía en un árbol. Así mismo, las células de xilema pueden presentar cambios en el espesor de la pared celular, que dan como consecuencia variaciones en la densidad de madera (Auty *et al.* 2014).

Las características de los anillos de crecimiento (ancho y densidad de la madera) y de los elementos traqueales (diámetro del lumen y espesor de la pared) revelan detalles de la historia natural de un individuo y del ecosistema (van Leeuwen *et al.* 2011).

Los bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham.) son perennifolios, con cobertura mayor a 85 % y con altura de arbolado hasta de 40 m (Calderón de Rzedowski y Rzedowski 2005). Los bosques de oyamel se presentan generalmente en altitudes entre 2700 m y 3600 m, a veces sobrepasando un poco estos límites, casi siempre sobre suelos profundos a lo largo del Eje Volcánico Transmexicano (Sáenz-Romero *et al.* 2012). Estos bosques, junto con el género *Pinus*, son las coníferas más importantes en la producción forestal de México. A pesar de su importancia económica se conoce poco sobre su respuesta a la remoción de arbolado en prácticas de manejo forestal.

La madera del género *Abies* es muy homogénea con variaciones de color conspicuas entre albura y duramen (Esteban *et al.* 2009), y pertenece al listado de maderas blandas del Comité de IAWA (IAWA 2004). Rojas-García y Villers Ruiz (2008) determinaron valores de densidad de la madera de 387 kg·m<sup>-3</sup> en muestras de madera en rodales de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham.) en bosques de alta montaña mexicanos, sus resultados mostraron que la madera de esta especie es moderadamente liviana. En sentido transversal y longitudinal la densidad básica de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham.) presenta un valor mínimo de 140 kg·m<sup>-3</sup>, máximo de 590 kg·m<sup>-3</sup> y un promedio de 360 kg·m<sup>-3</sup> (Goche-Télles *et al.* 2000). Bernal y Terrazas (2000) caracterizaron la variación radial de las dimensiones de las traqueidas de oyamel (*Abies*

*religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) y su relación con variables climáticas. Comprender los impulsores de la variación de la densidad de la madera tanto dentro de un árbol como entre árboles es importante para predecir la calidad de los troncos de madera y mejorar esta calidad mediante un manejo forestal adecuado (Tonouewa *et al.* 2022).

Los esquemas de medición de los parámetros anatómicos de la madera asignados a los anillos de crecimiento de árboles fechados (dendroanatomía o anatomía de los anillos de los árboles) se han dificultado por metodologías que requieren mucho tiempo. Lo anterior resulta en un número bajo de árboles estudiados, así como de anillos y células por anillo (Björklund *et al.* 2020). A pesar del esfuerzo que involucra el análisis anatómico de los anillos de crecimiento, genera información muy puntual sobre el proceso de formación de la madera y su calidad.

El objetivo general de este trabajo fue evaluar el efecto del aprovechamiento forestal sobre la formación de madera en árboles remanentes de un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.). Los objetivos particulares fueron: a) estimar la microdensidad de la madera de los anillos de crecimiento en los árboles remanentes post extracción, b) determinar la presencia de variaciones anatómicas intra-anillo en la madera tardía post extracción.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluó un rodal dominado por oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), ubicado en el Ejido Palo Seco, Municipio Coatepec de Harinas del Estado de México, en las faldas del volcán Nevado de Toluca a 2800 m de altitud, y 19°03'11" latitud Norte y 99°50'04" longitud Oeste. El rodal fue intervenido con un aprovechamiento forestal maderable, con una autorización de corta del 50 % del área basal durante 2014.

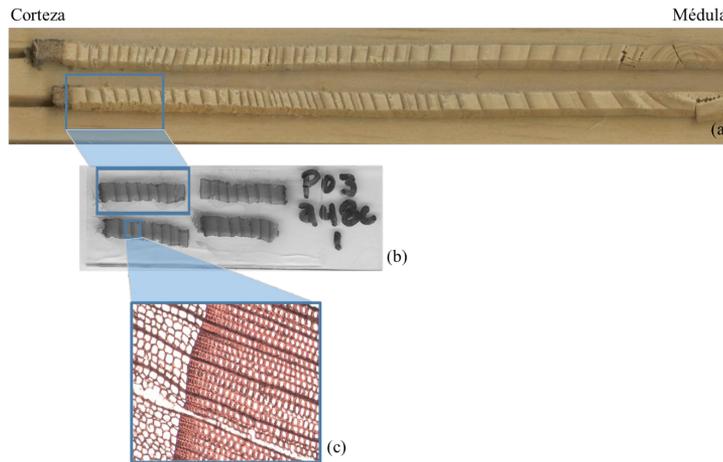
Se establecieron 10 sitios circulares de medición con una superficie de 1000 m<sup>2</sup> en el rodal. En cada sitio, se registró el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) de todos los árboles  $\geq 7,5$  cm, altura total (HT, m), azimut (°) y distancia al centro del sitio (m). Se registró el diámetro de los tocones a 0,30 m del suelo (dt, cm), se utilizó la ecuación desarrollada por García-Cuevas *et al.* (2016), para estimar el DAP de los oyameles en función de las medidas del dt (cm):  $DAP = -1,11149 + 0,922678*(dt)$ . Una vez que se conoció el DAP (cm), se calculó el área basal individual para después sumarla y obtener valores por sitio por hectárea (AB, m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>) (Padmakumar *et al.* 2018). Se analizó el patrón de distribución espacial de los árboles de cada sitio de muestreo mediante la herramienta vecino más cercano promedio (índice ANN, por sus siglas en inglés Average Nearest Neighbor) disponible en el programa ArcGIS (Mitchell 2005).

Se colectaron dos núcleos de madera con el uso de un taladro de Pressler a 1,3 m del suelo (Abrams y Hock 2006), de los dos árboles remanentes más cercanos al árbol cortado, un núcleo se colectó de forma perpendicular y otro paralelo a la pendiente. Se analizaron 80 núcleos que corresponden a 40 árboles al interior de los 10 sitios de muestreo. Los núcleos de madera se montaron con pegamento sobre guías de madera alineados de modo que las traqueidas quedarán completamente verticales y se sujetaron con cinta adhesiva para evitar su torcedura durante el secado al aire libre. Los núcleos se procesaron con una lijadora orbital del grano mayor al menor (lija de papel con medidas de grano 150, 360, 600, y 1500), para observar de manera clara los anillos de crecimiento. Se realizaron cronologías por medio de técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley 1996). El conteo de los anillos se realizó en el estereomicroscopio para el fechado-cruzado de núcleos de madera (Yamaguchi 1991).

Las muestras de madera se digitalizaron con un scanner de alta resolución (LA2400 Scanner Calibrated for Image Analysis with Regents Instruments Software®). El ancho de los anillos de crecimiento y los valores de microdensidad se obtuvieron con el programa WinDendro (Regent Instruments Canada 2016). Se midió el ancho de los anillos de crecimiento (mm), el ancho de la madera temprana (mm) y el ancho de la madera tardía (mm). Los valores de microdensidad analizados fueron densidad del anillo (kg·m<sup>-3</sup>), densidad de madera temprana (kg·m<sup>-3</sup>), densidad de madera tardía (kg·m<sup>-3</sup>), densidad mínima de anillo (kg·m<sup>-3</sup>) y máxima del anillo (kg·m<sup>-3</sup>). Los valores de ancho de anillo y microdensidad se promediaron primero entre los dos núcleos de crecimiento muestreados por árbol y después entre árboles para poder obtener finalmente una cronología de ancho de anillos y microdensidad para cada uno de los 10 sitios de muestreo. Se realizó la verificación del fechado con el programa COFECHA (Holmes 1983).

Se obtuvo una sección de cada núcleo de crecimiento a fin de evaluar entre 2 y 3 cm de la muestra más cercanos a la corteza, debido a que corresponde a la sección con registro de los años más recientes y de interés para el presente estudio. Las secciones se separaron en recipientes de plástico para fijar las muestras en una solución de glicerina-alcohol etílico-agua (GAA, 1:2:3), durante 30 días. Las muestras se cortaron de 20 a 40 µm

de espesor con un micrótopo de deslizamiento en el plano transversal. Se tiñeron con safranina y se montaron en resina sintética, siguiendo el método convencional para madera (Johansen 1940) (Figura 1).



**Figura 1:** (a) Núcleos de crecimiento de *Abies religiosa* utilizados para el análisis dendrocronológico (b) segmento utilizado para análisis dendroanatómico cercano a la corteza y (c) corte microscópico.

Se midió el diámetro del lumen de la traqueida (mm) y el espesor de pared celular de las traqueidas de los anillos de crecimiento (mm) formados post cosecha con el analizador de imágenes WinCell (Regent Instruments Canada 2016). Se buscó la presencia de variaciones anatómicas intra-anillo en la madera tardía (Pritzkow *et al.* 2014). Se hizo un análisis de varianza para conocer si existían diferencias significativas en el ancho del anillo, el diámetro del lumen de la traqueida y el espesor de pared celular de las traqueidas, de dos períodos de cuatro años de crecimiento, el primero de 2010-2013 como previo al aprovechamiento forestal y 2014-2017 como posterior a la intervención en el rodal (Trujillo-Martínez *et al.* 2020).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los aclareos pueden modificar características importantes de la formación de la madera que se reflejan en la calidad de esta (Hernández-López *et al.* 1996). Las características dasométricas del rodal aprovechado de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) del Ejido Palo Seco se presentan en la Tabla 1. El patrón de distribución de los árboles previo al aprovechamiento fue menor que el promedio de una distribución hipotética aleatoria, por ello el índice ANN fue menor que 1 y se considera que la distribución de los árboles era agrupada ( $p \leq 0,001$ ). Después de la intervención, el patrón de distribución de los árboles fue mayor que la distribución hipotética aleatoria, por lo que el índice ANN fue mayor que 1, y se considera que los árboles están dispersos ( $p \leq 0,001$ ) (Castellanos *et al.* 2010).

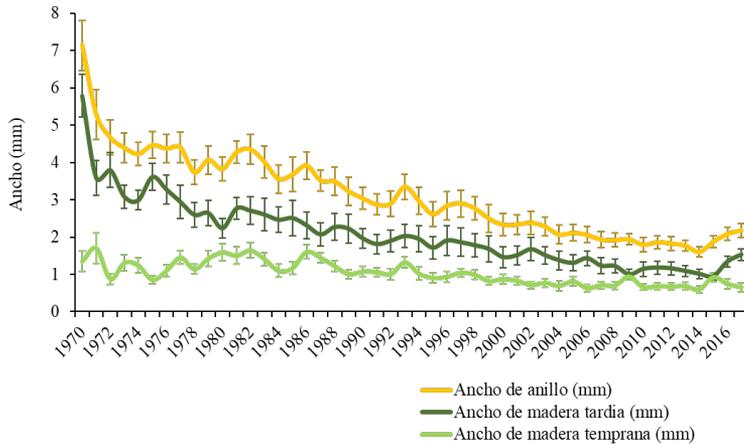
**Tabla 1:** Características dasométricas de un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) con aprovechamiento forestal.

Variable	2014	2017
N	484 ± 43,51	342 ± 38,40
AB	63,93 ± 6,06	32,11 ± 4,36
Dg	41,39 ± 3,02	37,34 ± 3,09
HT	20,73 ± 1,13	23,43 ± 2,17
ANN	0,88 ± 0,03	1,43 ± 0,08

Valor promedio ± error estándar N= número de árboles ha<sup>-1</sup>; AB= área basal (m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>); Dg= diámetro medio cuadrático (cm); HT= altura total (m); ANN= vecino más cercano promedio

Los anillos de crecimiento de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham.) presentaron el patrón característico de coníferas con una buena delimitación de madera temprana y madera tardía (Gutiérrez-García y Ricker 2019), a lo largo de la cronología de 90 años desarrollada (Figura 2).

La formación de la madera en términos de cantidad y estructura física puede verse afectado por las condiciones ambientales, incluidos el clima, la disponibilidad de recursos y la silvicultura, así como por la edad cambial (Zobel y Sprague 1998).



**Figura 2:** Ancho de anillos de crecimiento en una cronología de 90 años desarrollada para un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham.). Las barras de bigotes señalan la desviación estándar.

La madera tardía presenta anchos mayores en el anillo de crecimiento en comparación con la madera temprana. Durante la diferenciación de madera temprana y madera tardía intervienen interacciones complejas entre la genética de la planta, su fisiología y las relaciones ecológicas con el entorno ambiental (Fritts 2001). Se compararon dos períodos de crecimiento, previo y después del aprovechamiento. El rodal de oyamel previo al aprovechamiento tuvo un ancho de anillo de  $1,459 \text{ mm} \pm 0,579 \text{ mm}$ , y después de la intervención  $2,228 \text{ mm} \pm 0,803 \text{ mm}$ . Se encontró que el ancho del anillo difirió significativamente después del aprovechamiento forestal ( $F = 43,00$ ;  $g.l. = 217$ ;  $p < 0,0001$ ).

El aprovechamiento forestal, entre otras prácticas del manejo forestal contribuyen a un aumento en el crecimiento del arbolado (Esper et al. 2012, Vernon et al. 2018), en este estudio se presentó un aumento de 42,4 % en el ancho del anillo posterior al aprovechamiento forestal.

En otras especies forestales, el crecimiento máximo se ha presentado entre dos y cuatro años después del aprovechamiento, y a partir del quinto año disminuye hasta alcanzar los niveles previos al aprovechamiento (Rodríguez-Souilla et al. 2023). Las intervenciones silvícolas para manipular las condiciones de los rodales, como los aclareos o la longitud de rotación, también pueden afectar la densidad de la madera y otras propiedades celulares de esta (Macdonald y Hubert 2002, Mansfield et al. 2007).

Se ha buscado determinar los efectos sobre el crecimiento radial de cortas de aclareo en plantaciones de jelecote pine (*Pinus patula* Schltld. & Cham.), donde la intervención produjo una disminución en el ancho del anillo, pero no influyó sobre la densidad básica de la madera, ya que la variación en densidad generalmente se presenta en los primeros años (Goche-Télles et al. 2003). En rodales de la misma especie (naturalmente regenerados), el aclareo ocasionó un aumento en el ancho del anillo y en el ancho de madera temprana, una reducción en el ancho de madera tardía, y una disminución la densidad de la madera (Hernández-López et al. 1996). En general, los efectos del aclareo varían según el tipo, el momento y la intensidad de la intervención, así como la densidad remanente del rodal (Macdonald y Hubert 2002). El aclareo puede influir en la distribución y densidad de los componentes de madera temprana y tardía dentro de los anillos anuales, pero la densidad general del anillo a menudo no se ve afectada (Mörling 2002).

Durante la estación de crecimiento, los árboles de regiones con variación estacional de lluvia equilibran la

demanda y el suministro de agua mediante cambios en la actividad fotosintética los cuales están relacionados con cambios anatómicos en el xilema (Fritts 2001). Durante la época de lluvia, cuando no existen riesgos por cavitación, los árboles producen traqueidas grandes para maximizar la eficiencia hidráulica (madera temprana) (Cuny y Rathgeber 2016).

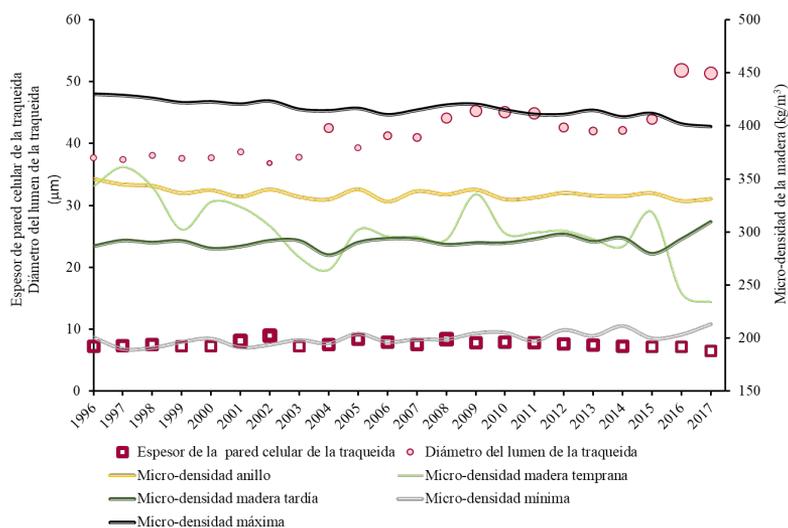
Posteriormente, las traqueidas con un lumen más estrecho y presumiblemente paredes celulares más gruesas favorecen el soporte mecánico de los árboles (madera tardía) (Beeckman 2016), lo que favorece el riesgo de colapso hidráulico.

Los cambios estructurales en la madera como resultado de la aplicación de diferentes prácticas silvícolas podrían tener un impacto en la resistencia de los árboles a las condiciones climáticas adversas durante la estación de crecimiento (Martínez-Meier *et al.* 2015).

Los análisis dendroanatómicos proporcionan información sobre las respuestas funcionales del xilema y las condiciones de crecimiento pasadas con una resolución intra-anual (Prendin *et al.* 2017). El uso de imágenes de alta resolución permite medir todas las traqueidas en una sección transversal del anillo de crecimiento, aumentando así el número de mediciones de traqueidas individuales. En el presente estudio se midieron entre centenas y miles de traqueidas por año en 80 núcleos de crecimiento, en total 25600 traqueidas. En la Figura 3 se presentan los perfiles de microdensidad convencionales y los patrones de diámetro del lumen de la traqueida y espesor de pared celular de las traqueidas de la madera tardía.

Las traqueidas de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schldt. & Cham.) previo al aprovechamiento forestal, presentaban un espesor de pared celular de  $7,715 \text{ mm} \pm 0,202 \text{ mm}$ , y después del manejo de  $7,013 \text{ mm} \pm 0,329 \text{ mm}$ , esto es una disminución del 8,02 %. Esta diferencia fue significativa ( $F = 300,44$ ;  $g.l. = 25599$ ;  $p \leq 0,0001$ ).

Del mismo modo, el diámetro del lumen de la traqueida se modificó después del aprovechamiento ( $F = 195,98$ ;  $g.l. = 25599$ ;  $p \leq 0,0001$ ). Previo a la intervención se midieron lúmenes de  $42,680 \text{ mm} \pm 0,865 \text{ mm}$ , y realizado el aprovechamiento fueron de  $52,221 \text{ mm} \pm 0,767 \text{ mm}$ , esto es un aumento en el diámetro del lumen de la traqueida de 29,84 %.



**Figura 3:** Cronologías de las traqueidas de la madera tardía de árboles remanentes después del aprovechamiento forestal en rodales de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schldt. & Cham.) y su relación con perfiles de microdensidad.

El espesor de pared celular de las traqueidas depende de la cantidad de carbohidratos disponibles y almacenados en las células del parénquima. Es posible que la acumulación de la pared en las traqueidas de los árboles de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schldt. & Cham.) se inicie en agosto y, por lo tanto, el espesor esté determinado por la cantidad de carbohidratos (Bernal y Terrazas 2000).

Las fluctuaciones en el número, el diámetro del lumen de la traqueida y el espesor de pared celular de las

traqueidas producidas por el cambium se imprimen en perfiles de microdensidad de madera (Wilkinson *et al.* 2015) (Tabla 2). La microdensidad de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) resultó en  $189 \pm 0,002 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  como valor mínimo,  $417 \pm 0,001 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  como valor máximo, y un valor promedio de  $0,335 \pm 0,001 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , para series de 90 años en 80 núcleos de crecimiento.

**Tabla 2:** Relación de las características anatómicas de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) con los valores de microdensidad de la madera ( $p \leq 0,001$ ).

Variable	Microdensidad (kg/m <sup>3</sup> )				
	Anillo	Madera temprana	Madera tardía	Anillo máxima	Anillo mínima
Espesor de la pared celular de la traqueida (µm)	-0,097	-0,064	-0,110*	-0,018	0,164*
Diámetro del lumen de la traqueida (µm)	-0,715*	-0,715*	0,157*	0,718	0,718

\*Valores relacionados significativamente.

La reducción del AB en el rodal de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) se reflejó en un aumento en el crecimiento individual, operando a través de rasgos fisiológicos y estructurales. Dichos rasgos fisiológicos respondieron a la reducción en la competencia de árboles (Esper *et al.* 2012).

La densidad de la madera está asociada con la anatomía de la madera, la evidencia demostró que se incrementó la proporción del diámetro del lumen de la traqueida/espesor de pared celular de las traqueidas y, por lo tanto, la madera es más permeable para el transporte de agua (Martínez-Meier *et al.* 2015).

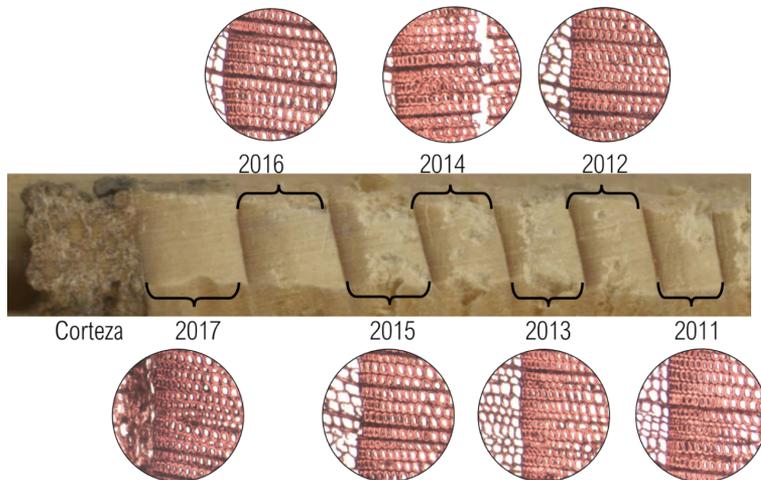
Las fluctuaciones de densidad intra-anales representan cambios abruptos en el perfil de densidad que están coordinados con variaciones temporales en la disponibilidad de agua, y nos dan información sobre la plasticidad de las especies (Campelo *et al.* 2007, Rigling *et al.* 2001). Esta información es relevante para modelar la mortalidad ante cambio climático de las especies vulnerables a eventos de sequía.

El aumento del diámetro del lumen de la traqueida y reducción del espesor de pared celular de las traqueidas en la madera tardía de la madera de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) se expresó en una disminución de la densidad de madera temprana del 9,3 %, y de la densidad máxima del anillo del 1,82 %, así como un aumento de la densidad mínima de anillo del 1,8 %.

Estas modificaciones en la densidad de la madera tienen un origen anatómico, que generalmente producen un mayor volumen de madera con menor densidad (Camarero y Gutiérrez 2017, Livingston *et al.* 2004), con implicaciones en una reducción en las capacidades de almacenamiento de biomasa y carbono del bosque (Padmakumar *et al.* 2018). La medición de espesor de pared celular de las traqueidas y el diámetro del lumen de la traqueida permitió determinar la presencia de variaciones anatómicas intra-anillo en la madera tardía de los árboles remanentes después del aprovechamiento forestal (Figura 4).

En el presente estudio se encontró una fila tangencial de canales traumáticos en 21 % de los núcleos de crecimiento. Este resultado es atípico, ya que el género *Abies* no presenta canales resiníferos en su madera (Esteban *et al.* 2009). La fila de canales traumáticos está fechada en 2014, año en que se efectuó el aprovechamiento forestal. Es posible que durante la extracción del 50 % de AB, se produjeron daños y troceo de ramas en los árboles remanentes, o bien, un cambio abrupto de transpiración que acompañando de baja humedad relativa haya generado una huella fisiológica en los árboles remanentes.

Los canales traumáticos fechados en 2014 tienen un diámetro medio de  $207,69 \text{ mm} \pm 7,97 \text{ mm}$ . Esteban y de Palacios (2009) refieren que los canales de resina axiales traumáticos en filas tangenciales como respuesta a heridas son comunes en algunas de las especies del género *Abies*.



**Figura 4:** Variaciones anatómicas intra-anillo. Se presenta un corte transversal correspondiente a cada año fechado. Durante el 2014 es posible observar una fila tangencial de canales traumáticos.

Díaz-Carranza *et al.* (2021) encontraron filas de canales traumáticos posteriores a la práctica forestal tradicional conocida como ocoteo, en yellow pine (*Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham.), montezuma pine (*Pinus montezumae* Lamb.), macochyaj (*Pinus pseudostrobus* Brongn.) y aztec pine (*Pinus teocote* Schltdl. & Cham.), en bosques de alta montaña del centro de México.

## CONCLUSIONES

El aprovechamiento forestal en un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), con una reducción de poco más del 50 % de AB, resultó en un incremento de hasta un 42,4 % en el ancho de los anillos de crecimiento en la madera de los árboles remanentes.

El análisis anatómico de los anillos de crecimiento posteriores a la intervención ocasionó una reducción en el espesor de la pared celular de las traqueidas y un incremento en los lúmenes, además, se identificó una fila de canales traumáticos fechada en 2014.

Las modificaciones en la anatomía de la madera causaron una variación en los valores de microdensidad de la madera, con un aumento en la densidad mínima y una disminución de la densidad máxima. Estos cambios anatómicos pueden tener una repercusión considerable a nivel rodal en la cuantificación de las existencias volumétricas y de biomasa. Los estudios dendroanatómicos generan información valiosa de la respuesta de las especies forestales ante la medición los cambios en la estructura del rodal.

## DECLARACION DE AUTORIAS

F.R-G.: Conceptualización, Investigación, Metodología (campo), Metodología, (laboratorio), Análisis formal Escritura – borrador original. A.G-G.: Adquisición de fondos, Investigación, Supervisión. T.T.: Investigación, Supervisión, Investigación, Metodología (laboratorio), Software. A.E-A.: Administración de proyecto, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología (campo). G.G-G.: Conceptualización, Investigación, Validación, Análisis formal. V.R-H.: Conceptualización, Investigación, Redacción, Supervisión. G.Á-P.: Investigación, Redacción, Supervisión. B.H. J. J.: Investigación, Redacción, Supervisión.

## REFERENCIAS

- Abrams, M.; Hock, W. 2006.** Annual growth rings and the impact of Benlate 50 DF fungicide on citrus trees in seasonally dry tropical plantations of northern Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 227(1-2): 96-101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.019>
- Auty, D.; Achim, A.; Macdonald, E.; Cameron, A.; Gardiner, B. 2014.** Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry* 87(3): 449-458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>
- Beeckman, H. 2016.** Wood Anatomy and Trait-Based Ecology. *IAWA Journal* 37(2): 127-151. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160127>
- Bernal, S.; Terrazas, T. 2000.** Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6(1): 73-86. <https://doi.org/10.21829/myb.2000.611343>
- Björklund, J.; Seftigen, K.; Fonti, P.; Nievergelt, D.; von Arx, G. 2020.** Dendroclimatic potential of dendroanatomy in temperature-sensitive *Pinus sylvestris*. *Dendrochronologia* 60:e125673. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125673>
- Calderón de Rzedowski, G.; Rzedowski, J. 2005.** *Flora fanerogámica del Valle de México*. Pátzcuaro, México: Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. ISBN 9786077607366. 1406p.
- Camarero, J.; Gutiérrez, E. 2017.** Wood density of silver fir reflects drought and cold stress across climatic and biogeographic gradients. *Dendrochronologia* 45: 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.07.005>
- Campelo, F.; Nabais, C.; Freitas, H.; Gutiérrez, E. 2007.** Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Annals of Forest Science* 64(2): 229-238. <https://doi.org/10.1051/forest:2006107>
- Castellanos, J.; Treviño, E.; Aguirre, O.; Jiménez, J.; Velázquez, A. 2010.** Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2): 39-52. <http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v1i2.636>
- Cuny, H.; Rathgeber, C. 2016.** Xylogenesis: Coniferous Trees of Temperate Forests Are Listening to the Climate Tale during the Growing Season But Only Remember the Last Words! *Plant Physiology* 171(1): 306-317. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00037>
- Díaz-Carranza, G.; Andrés, A.; Guillén, S.; Rivas-Arancibia, S.; Montoya, A. 2021.** Dendrometric variables and traumatic resin ducts in pine species associated with wood-stripping: a traditional practice in the conifer forests of Central Mexico. *Botanical Sciences* 100(1): 42-55. <https://doi.org/10.17129/botsci.2822>
- Esper, J.; Benz, M.; Pederson, N. 2012.** Influence of wood harvest on tree-ring time-series of *Picea abies* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 284: 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.047>
- Esteban, L.; de Palacios, P. 2009.** Comparative wood anatomy in Abietoideae (Pinaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 160: 184-196. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.00971.x>
- Esteban, L.; de Palacios, P.; García Fernández, F.; Moreno, R. 2009.** Wood anatomy of the Genus *Abies* a review. *IAWA Journal* 30(3): 231-245. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000217>
- Fritts, H. 2001.** *Tree rings and climate*. London: The Blackburn Press. ISBN 9781930665392. 567p.
- García-Cuevas, X.; Herrera-Ávila, V.; Hernández-Ramos, J.; García-Magaña, J.; Hernández-Ramos, A. 2016.** Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schldtl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37): 95-103. <http://ciencias-forestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/54>

**Goche-Télles, 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 Mexicana de Ciencias Forestales* 6(1): 83-92. <https://chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/doc/rch-scaVI326.pdf>

**Goche-Télles, R.; Velázquez-Martínez, A.; Borja-de la Rosa, A.; Terrazas, T.; Cervantes-Martínez, C.; Trinidad-Santos, A. 2003.** Densidad básica y ancho de anillos de la madera de *Pinus patula* antes y después de un aclareo. *Interciencia* 28(12): 705-709. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33908705.pdf>

**Gutiérrez-García, G.; Ricker, M. 2019.** Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 90(2019): e902676. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>

**Hernández-López, A.; Martínez, M.; Vargas, J.; Velázquez, A.; Ángeles, G. 1996.** Características de los anillos y densidad de la madera a diferentes alturas del fuste en rodales aclareados de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 21(80): 39-55. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/987>

**Holmes, R. 1983.** Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/261223>

**IAWA. 2004.** IAWA list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal* 25(1): 1-70. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000349>

**Johansen, D. 1940.** *Plant microtechnique*. New York, USA: McGraw-Hill. ISBN 9780070325401. 523p.

**Livingston, A.; Cameron, A.; Petty, J.; Lee, S. 2004.** Effect of growth rate on wood properties of genetically improved Sitka spruce. *Forestry* 77(4): 325-334. <https://doi.org/10.1093/forestry/77.4.325>

**Macdonald, E.; Hubert, J. 2002.** A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75(2): 107-138. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.2.107>

**Mansfield, S.; Parish, R.; Goudie, J.; Kang, K.; Ott, P. 2007.** The effects of crown ratio on the transition from juvenile to mature wood production in lodgepole pine in western Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 37(8): 1450-1459. <https://doi.org/10.1139/x06-299>

**Martínez-Meier, A.; Fernández, M.; Dalla-Salda, G.; Gyenge, J.; Licata, J.; Rozenberg, P. 2015.** Ecophysiological basis of wood formation in ponderosa pine: Linking water flux patterns with wood micro-density variables. *Forest Ecology and Management* 346: 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.021>

**Mitchell, A. 2005.** *La Guía de ESRI para el análisis SIG*. Madrid: ESRI Press. ISBN 1879102064. 186p. <https://books.google.co.cr/books?id=FOj8L-iDMq0C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

**Mörling, T. 2002.** Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Annals of Forest Science* 59(1): 29-40. <https://doi.org/10.1051/forest:2001003>

**Padmakumar, B.; Sreekanth, N.; Shanthiprabha, V.; Paul, J.; Sreedharan, K.; Augustine, T.; Jayasooryan, K.; Rameshan, M.; Mohan, M.; Ramasamy, E.; Thomas, A. 2018.** Tree biomass and carbon density estimation in the tropical dry forest of Southern Western Ghats, India. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 11(4): 534-541. <https://doi.org/10.3832/ifor2190-011>

**Prendin, A.; Petit, G.; Carrer, M.; Fonti, P.; Bjorklund, J.; von Arx, G. 2017.** New research perspectives from a novel approach to quantify tracheid wall thickness. *Tree Physiology* 37(7): 976-983. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx037>

**Pritzkow, C.; Heinrich, I.; Grudd, H.; Helle, G. 2014.** Relationship between wood anatomy, tree-ring widths and wood density of *Pinus sylvestris* L. and climate at high latitudes in northern Sweden. *Dendrochronologia* 32(4): 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.07.003>

**Regent Instruments Canada. 2016.** WinDENDRO for tree-ring analysis (Version 2016). Canadá: Regent Instruments Canada Inc. [https://regentinstruments.com/assets/windendro\\_about.html](https://regentinstruments.com/assets/windendro_about.html)

**Regent Instruments Canada. 2016.** WinCELL for tree-ring analysis (Version 2016). Canadá: Regent Instruments Canada Inc. [https://www.regentinstruments.com/assets/wincell\\_about.html](https://www.regentinstruments.com/assets/wincell_about.html)

**Rigling, A.; Waldner, P.; Forster, T.; Bräker, O.; Pouttu, A. 2001.** Ecological interpretation of tree-ring width and intraannual density fluctuations in *Pinus sylvestris* on dry sites in the central Alps and Siberia. *Canadian Journal of Forest Research* 31(1): 18-31. <https://doi.org/10.1139/x00-126>

**Rodríguez-Souilla, J.; Cellini, J.; Roig, F.; Lencinas, M.; Chaves, J.; Paredes, D.; Parodi, M.; Favoretti, S.; Peri, P.; Martínez-Pastur, G. 2023.** Radial growth response to long-term thinning strategies in *Nothofagus pumilio* forests of Tierra del Fuego. *Bosque* 44(1) : 241-254. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100241>

**Rojas-García, F.; Villers Ruiz, L. 2008.** Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 33(104): 59-86. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/735>

**Sáenz-Romero, C.; Rehfeldt, G.; Duval, P.; Lindig-Cisneros, R. 2012.** *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275: 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>

**Stokes, M.; Smiley, T. 1996.** *An Introduction to Tree-Ring Dating 2nd ed.* USA: University of Chicago Press. <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Introduction-to-Tree-Ring-Dating-Stokes-Smiley/c9b-4c455f4bde25912830405cf8d42bfa1c0fd62>

**Tonouewa, J.; Biaou, S.; Assede, E.; Langbour, P.; Balagueman, O. 2022.** Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis*. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 24(19): 1-25. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100419>

**Trujillo-Martínez, H.; Reyes-Hernández, V.; Gómez-Guerrero, A.; Borja-de la Rosa, A. 2020.** Crecimiento radial de especies de pino en rodales sujetos a cortas de selección en Santa María Lachixío, Oaxaca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 26(1): 123-139. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.064>

**van Leeuwen, M.; Hilker, T.; Coops, N.; Frazer, G.; Wulder, M.; Newnham, G.; Culvenor, D. 2011.** Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review. *Forest Ecology and Management* 261: 1467-1478. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.032>

**Vernon, M.; Sherriff, R.; van Mantgem, P.; Kane, J. 2018.** Thinning, tree-growth, and resistance to multi-year drought in a mixed-conifer forest of northern California. *Forest Ecology and Management* 422: 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.043>

**Wilkinson, S.; Ogee, J.; Domec, J.; Rayment, M.; Wingate, L. 2015.** Biophysical modelling of intra-ring variations in tracheid features and wood density of *Pinus pinaster* trees exposed to seasonal droughts. *Tree Physiology* 35(3): 305-318. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv010>

**Yamaguchi, D. 1991.** A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21(3): 414-416. <https://doi.org/10.1139/x91-053>

**Zobel, B.; Sprague, J. 1998.** *Juvenile wood in forest trees.* Berlin: Springer-Verlag. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-72126-7\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-72126-7_7)