



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

IMPACTO DE LA EXTRACCIÓN SELECTIVA DE ARBOLADO SOBRE EL CRECIMIENTO RADIAL EN BOSQUES DE CONÍFERAS DEL ESTADO DE MÉXICO

FABIOLA ROJAS GARCÍA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTORA EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO
2020**

La presente tesis titulada: **IMPACTO DE LA EXTRACCIÓN SELECTIVA DE ARBOLADO SOBRE EL CRECIMIENTO RADIAL EN BOSQUES DE CONÍFERAS DEL ESTADO DE MÉXICO**, realizada por la alumna FABIOLA ROJAS GARCÍA bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

Consejo Particular

CONSEJERO



DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

ASESOR



DR. VALENTÍN JOSÉ REYES HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. GREGORIO ÁNGELES PÉREZ

ASESOR



DR. GENARO GUTIÉRREZ GARCÍA

ASESOR



DR. BERNARDUS H.J. DE JONG

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 8 de junio de 2020.

IMPACTO DE LA EXTRACCIÓN SELECTIVA DE ARBOLADO SOBRE EL CRECIMIENTO RADIAL EN BOSQUES DE CONÍFERAS DEL ESTADO DE MÉXICO

Fabiola Rojas-García, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

Los anillos de crecimiento son un registro histórico natural de procesos ecológicos, que incluye las respuestas fisiológicas y estructurales del xilema, a factores abióticos, interacciones bióticas y prácticas de manejo forestal. El objetivo general del presente trabajo fue evaluar los impactos multiescalares de las prácticas de manejo forestal sobre el crecimiento radial de bosques de coníferas del Estado de México al interior de la ecorregión del Eje Volcánico Transmexicano. El crecimiento de un árbol puede abordarse desde diferentes escalas que involucran los niveles rodal—árbol individual—anillo de crecimiento—célula del xilema. Las técnicas dendroecológicas permiten evaluar el crecimiento de los árboles remanentes después de intervenciones de manejo en escalas de tiempo amplias. Se analizó el efecto de una corta de saneamiento sobre el crecimiento radial del arbolado residual de *Pinus hartwegii*, y se encontró una respuesta favorable a la intervención con un aumento estadísticamente significativo del incremento de área basal explicado por una disminución de la competencia. Adicionalmente, se evaluó el efecto de un aprovechamiento forestal sobre la formación de madera en árboles remanentes de *Abies religiosa*, se encontró que las anchuras de anillo aumentaron significativamente después de la corta. La madera tardía después de la intervención presentó traqueidas con lúmenes de mayor diámetro y paredes celulares de menor grosor, estos cambios suscitaron variaciones en la microdensidad de la madera, con un aumento en la densidad mínima y una disminución de la densidad máxima. El conocimiento dendroecológico de un bosque contribuye a optimizar la producción maderable y favorecer la conservación de los ecosistemas forestales.

Palabras clave: anillos de crecimiento, competencia, dendroanatomía, dendroecología, manejo forestal

IMPACT OF THE SELECTIVE EXTRACTION OF TREES ON RADIAL GROWTH IN CONIFER FORESTS OF THE STATE OF MEXICO

Fabiola Rojas-García, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

Tree rings are natural historical records of ecological processes, including the physiological and structural responses of xylem, to abiotic factors, biotic interactions, and forest management practices. The general objective of this work was to evaluate the multi-scale impacts of the execution of forest management practices on the radial growth of coniferous forests of the State of Mexico within the ecoregion Trans-Mexican Volcanic Belt. Tree growth can be approached from different scales involving stand — individual tree — tree ring — xylem cell levels. Dendroecological techniques allow the assessment of growth in remaining trees after management interventions on broad time scales. The effect of a sanitation cut on the radial growth of the residual *Pinus hartwegii* forests was analyzed, and a favorable response to the intervention was found with a statistically significant increase in the basal area increment explained by a decrease in competition. The effect of a forest harvest on the wood formation in the remaining trees of *Abies religiosa* was evaluated, it was found that the ring widths increased significantly after the cutting. Latewood presented decrease in cell wall thickness and an increase in the length of the tracheid lumen, after the intervention, these changes caused variations in the wood microdensity, with an increase in the minimum density and a decrease in the maximum density. The dendroecological knowledge of the forests contributes to optimizing timber production and promoting the conservation of forest ecosystems.

Key words: competition, dendroanatomy, dendroecology, forests management, tree rings.

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, por aceptarme entre sus estudiantes y brindarme la formación en Bosques sólida que anhelaba. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por otorgarme una beca de Postgrado. Al financiamiento parcial para el desarrollo de esta tesis otorgado por el Proyecto CONAFOR-UAEMex 3668/2014E.

A mi Consejo de Particular de Doctorado: Dr. Armando Gómez Guerrero, Dr. Valentín José Reyes Hernández, Dr. Gregorio Ángeles Pérez, Dr. Genaro Gutiérrez García, Dr. Bernardus H.J. de Jong. Agradezco de forma extensa su disposición a colaborar conmigo en esta etapa de mi formación académica y todas sus recomendaciones.

Dr. Armando Gómez, gracias por su guía siempre amable, gracias por *su confianza y respaldo* en el complejo proceso de graduarme. Gracias por sus apoyo moral y científico para poder concluir este trabajo de tesis.

Dr. Genaro Gutiérrez, *gracias por todas las pláticas académicas y de vida*, desde el laboratorio de Sinecología y la compartida asignatura de Maderas y cortezas, gracias por tu cordialidad y contagioso entusiasmo por el trabajo científico.

Dr. Valentín Reyes, gracias por tu apoyo y por brindarme tu amistad desde que fui aceptada en el Postgrado Forestal, *gracias por las divertidas charlas y críticas a las pseudo-ciencias y el coaching*.

Dr. Gregorio Ángeles gracias por escucharme y por ser buen amigo desde el Congreso Mexicano de Ecología (2008), donde tu afabilidad me hizo pensar que *eras un estudiante del COLPOS*.

Dr. Ben de Jong, gracias por ser mi primer Jefe en ECOSUR y *por enseñarme que lo más importante es trabajar en lo que te haga muy feliz*.

A la Dra. Ofelia Plascencia, gracias por aceptar ser mi sinodal y por tener *siempre una sonrisa para todos los alumnos del Posgrado Forestal*.

Al Dr. Ángel Endara Agramont, *the Bolivian Power*, gracias por recibirme en tu equipo de trabajo, el Grupo de Alta Montaña del ICAR. Hermanito, gracias por tantos años de amistad y como dice Nico *tequeloglave*.

A la Dra. Teresa Terrazas gracias por su disposición y ayuda en esta *segunda vuelta a la Anatomía de Maderas*, y a la Dra. Alicia Rojas por su ayuda en el laboratorio.

Al Grupo de Alta Montaña del ICAR, gracias a ustedes *todas y cada una de las salidas al volcán fueron divertidas*: Santiago Vázquez, Giovanni Estrada, Abigail Luna, Antonio García, Christian Guadarrama, Francisco García, Denisse Rodríguez, Alan Deuri (†), Arantxa Espinosa, San-Sanjuanero, Teresa Torres, Daniel Carbajal, Leticia Bermúdez, Luis León, Yacov Quinteros, Martha Cedillo, Jorge Escobar, JJonathan Aguirre, Gerardo Jasso, Mayra Parsa, Laura Heredia y Carla García.

Dedico esta tesis a:

Dios

Señor absoluto del saber y del poder.

Gracias por ayudarme a disponer y encaminar mis pensamientos en esta prueba.
Gracias por tu misericordia, gracias por mi familia y la fuerza que me das todos los días.

Mi Familia

Mis Lindos Carmen y Juan Luis, quienes me han enseñado que el *felices por siempre* sí existe, pero que hay que construirlo todos los días. Qué el amor verdadero se refleja en acciones. Qué han sabido defender su amor en la salud y la enfermedad, en la pobreza y la prosperidad, en las más grandes tristezas y en todas las alegrías. Gracias por el inconmensurable amor que nos dan todos los días. Gracias por respaldar mis sueños y decisiones.

Lupita, gracias por ser mi Maestra y mi ejemplo a seguir. Recuerdo cuándo a mis cinco años, en el patio de la casa con una tabla y gises de yeso me enseñaste a leer y escribir. Celebro tu vida, arquetipo de honestidad, orden, responsabilidad y cariño a la familia. Gracias a ti aprendí a no darme por vencida, y gracias a ti he tenido la fortaleza para terminar esta tesis. *Por los recuerdos las gracias yo te doy.* Estás en mi corazón y gracias a eso sonrió, aunque cueste trabajo. Te extraño siempre.

Vicente, eres el ser más protector que la vida me ha permitido conocer, un excelente amigo, y envidiable cómplice. *¿Otro cómo tú, pus di´onde?* Dios acertó en darnos el mejor hermano mayor del mundo. Gracias por compartir las botanas de miedo, el futbol, el baile, los chistes, tus ingeniosos acrósticos y las carreteritas de tres golpes en el patio. Gracias a ti llegó una tercera hermana a mi vida, Lucy, un inspirador modelo de superación.

Lety, eres mi primer recuerdo, tu sonrisa, tus enojos, tus carcajadas. Bebé cuándo lo necesites puedo leerte *Mujercitas*, para mí siempre es un privilegio. Gracias por ser mi compañera en todos los secretos, las coreografías, los juegos y cuándo me acerque a Dios. *No puedes detener los cambios, como no puedes detener la puesta de los soles*, veo con mucho orgullo tu papel de mamá y tengo la seguridad de que *la fuerza te acompañará* a Eder y a ti como maestros Jedi.

Alejandra, Juan Luis y Maximiliano, cada uno representa un milagro que agradezco a Dios todos los días. Gracias por revolucionar nuestro hogar y nuestras vidas. Ustedes me han enseñado que *puedes convertirte en madre para siempre desde que aceptas el amor de un niño*. Me siento sumamente orgullosa de ser su tía, y presenciar cómo se han *desarrollado en formas cada vez más bellas y admirables*. Mihijitos me llenan el alma de emoción, de risas y de amor. Los tres han sumado factores en mi ser que si pudiera hacer un cálculo estaría en deuda con ustedes para toda la vida. *¡Los adoro con todo mi corazón!*

Mis familiares

A mis tíos y primos, *gracias por estar*: Yolanda y Cristóbal; Mauricio; Rosa, Héctor y Jorge; Daniel (†), Caro, Georgina, Beto y Malena; Chayo y sus hombres; Luchita, Marcela y Rocío⁺³; Miguel, Chucho y Lupe; Edgar y Lusbia, Fátima.

Mis amigos

A mi familia extendida, *gracias por adoptarme*: Osvaldo Franco, Carla Torres⁺¹ y mi ahijado Santiago Nicolás; Rosa Margarita Sánchez y mi ahijada María Vanesa.

A los amigos que hice en *Prepa 4*, quienes me han acompañado desde entonces: Sara Luz García⁺³, Montse Carmona⁺⁴, Cecy Lozano, Mario Martínez, Mayla Romero (mi madrina), Erick González, Erick Oñate⁺¹, Daniel Ortiz, Isaac Esparragoza y más cuatrerros.

A los amigos que hice cuando estude *Biología*: Rocío Montiel⁺², Fabiola Villela⁺¹, Iván Chirino, Edén Rodríguez, Valentina López⁺², Erika Arrollo⁺², Natalia Cárdenas⁺¹, Mónica Espinosa⁺³, Genaro Gutiérrez⁺¹, Ana Estrada⁺², Paulina Arias, Aless Aguilar⁺², Eduardo Rodríguez, Aldo Bernal, Arturo Ávila, Edgardo Mendoza, Juan Andrés Pérez, Leonardo González, Agustina Harte⁺² y Martín Sánchez, Andrés Ramírez, Alejandra Uribe, Edith Figueroa, Mireille Martell y Gabriela Santibañez.

Al M. en C. Julio César Wong González (†), *Peewee* gracias por tu amistad y tantas sonrisas compartidas en Ciencias, La Malinche, el CCA, el IGG, Yavesía, Oaxaca, Zacatecas 'n, el PMC, Mérida, Tabasco, Pachuca, COLPOS y Campeche. *¡Eres una estrella que sabe sonreír!*

A las Doctoras Lourdes Villers Ruiz, Irma Trejo Vázquez y Cecilia Nieto de Pascual quienes han sido *mi mayor influencia académica*. Gracias por hacer de esta estudiante, una mujer que ama investigar y que quiere todos los días entender mejor al bosque. Las quiero mucho.

A los amigos conocí en ECOSUR, en la *Ciudad de las dos mentiras*: Vanessa Maldonado, Alex Ponce, Laura Fernández, Ben de Jong, Susana Ochoa y Pablo Martínez.

A la amiga que gané en la experiencia *sui generis* en INIFAP: Ana Wegier⁺².

A mis alumnos, a quienes acompañé en su formación profesional: Itai Mijangos, Alejandra Hernández, Elizabeth González, Giovanni Hazel Santoyo, Víctor Ramos y Azucena Santiago.

A dos amigos que tuve la fortuna de conocer en el Programa Mexicano del Carbono *Sector 7G* donde aprendimos a ser *un excelente empleado con una sonrisa en los labios y una canción en el corazón*: Víctor Manuel Salas-Aguilar y Cristóbal Sánchez-Sánchez.

A los amigos que he podido conocer gracias al COLPOS: Ángel Endara⁺¹, Almita Velázquez, Gregorio Ángeles⁺¹, Esther Espinosa, Vinisa Saynes, Bruno Chávez, José Antonio Hernández-Moreno (uno de los cuatro fantásticos), Bernardo Marino, Alejandra Ochoa, Fabiola Torres, Elia Ambrosio, Cristina Neri, Frinet Medrano, Luz Olivares, Héctor Trujillo, Nohemí Escamilla, Dorian Palacios, Gisela Morgado, Bossuet Cortés y Gabriela Rodríguez.

A la comunidad del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, *especialmente agradezco a los profesores* Dr. Jesús Vargas, Dr. Héctor De los Santos, Dr. Alejandro Velázquez, Dr. Miguel Ángel López, Dr. Aurelio Fierros, Dr. Jorge Etchevers y Dr. Fernando Paz. También expreso mi agradecimiento a Guadalupe Sánchez y Carlos Luna quienes *me brindaron su apoyo en todo momento*.

A los amigos que hice en la estancia en la UAEMex: Santiago Vázquez⁺², Giovanni Estrada⁺⁴, Luis Ángel López-Mathamba, Abigail Luna, Antonio García, Christian Guadarrama, Daniel Carbajal y Cristina Salas.

A la comunidad del Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales *donde me sentí integrada* y de quienes recibí amistad y compañerismo Dr. Humberto Thomé, Dr. William Gómez, Dr. Gabino Nava, Dr. Francisco Herrera, Dr. Sergio Franco, Dra. Angélica Espinoza, Dr. Carlos Arriaga, Lourdes Maya, Laura Martínez, Laura Carrillo, Alma Luna, Jenny González, Annie López, Graciela Campuzano, Alicia Estrada e Iván García.

A los amigos sin origen común, *semper* presentes: Iván Montoya⁺³, Fernando Bracho, Patricia García⁺¹, José Luis Esteban⁺², Carlos Mendoza, Malena Rueda, Ana Ibarra⁺¹, Jacob Velázquez, Federico Jiménez, Gabriela Castillo, y Arturo Estrada Vite.

A todas las casas que me han recibido: Jardín de Niños José María Morelos y Pavón, SEP; Escuela Primaria Club de Leones No. 4, SEP; Escuela Secundaria Diurna No. 38 Josefa Ortiz de Domínguez, SEP; Escuela Nacional Preparatoria No. 4 Vidal Castañeda y Nájera, UNAM; Facultad de Ciencias, UNAM; Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM; Instituto de Geografía, UNAM; Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM; Instituto de Biología, UNAM; Unidad Villahermosa, ECOSUR; Postgrado en Ciencias Forestales, COLPOS e Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, UAEMex.

A mis profesores de diferentes grados, *imposible agradecer tanto* Profesora Blandina Villanueva, Biól. Angélica Soto, Dra. Olimpia Jiménez (†), Dra. Lourdes Villers, y al *perseguido por la sabiduría* Dr. Zenón Cano-Santana.

Al *Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca*, y a cada persona que me dio los buenos días en las salidas de campo. Reconozco las facilidades otorgadas por el M.C. Mario Castañeda, Director del ANP. De forma amplia agradezco a las autoridades de las localidades donde trabajé que siempre me brindaron su hospitalidad y acompañamiento Bienes Comunales de Calimaya, al Ejido Palo Seco, y al Ejido Santa María del Monte.

A todos los ecosistemas que la vida me ha permitido conocer. En específico agradezco a los *bosques templados*, que me han permitido disfrutar del aroma incomparable de los bosques de pino, el musgo revistiendo el suelo del bosque de oyamel, las formas majestuosas de los encinos, el resurgir de los ailes, las distintas texturas de las cortezas de los árboles, la luz que se infiltra a través del dosel, la ostensible sucesión de Fibonacci, las caídas de agua pura, las increíbles adaptaciones a la nieve y la sorpresa de encontrar un animalito que corre, reptar o vuela.

Finalmente, agradezco a todas las personas que día a día luchan por la salud humana y la conservación de los ecosistemas. *Dios los bendiga*.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS	2
HIPÓTESIS.....	2
REFERENCIAS.....	3
CAPITULO I. APLICACIONES DE LA DENDROECOLOGÍA EN EL MANEJO FORESTAL, UNA REVISIÓN	5
1.1 RESUMEN.....	5
1.2 ABSTRACT.....	6
1.3 INTRODUCCIÓN	7
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.5 MATERIALES Y MÉTODOS	9
1.6 RESULTADOS.....	10
1.7 DISCUSIÓN.....	18
1.7.1 Uso de la dendroecología en la planeación forestal	18
1.7.2 Prácticas de manejo forestal y dendroecología	20
1.7.3 Monitoreo forestal y dendroecología.....	21
1.7.4 Perspectivas del manejo forestal asistido por dendroecología	23
1.7.5 La disciplina dendroecológica como herramienta para el manejo forestal en México	25
1.8 CONCLUSIONES	26
1.9 REFERENCIAS.....	26
CAPITULO II. IMPACTO DE LA EXTRACCIÓN SELECTIVA SOBRE EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES REMANENTES DE UN BOSQUE DE <i>Pinus hartwegii</i>	35
2.1 RESUMEN.....	35
2.2 ABSTRACT.....	36

2.3	INTRODUCCIÓN	37
2.4	OBJETIVOS.....	38
2.5	MATERIALES Y MÉTODOS	38
2.5.1	Área de estudio	38
2.5.2	Inventario para medición de extracción forestal	39
2.5.3	Análisis estructural	41
2.5.4	Análisis de competencia.....	42
2.5.5	Muestreo destructivo de árboles individuales	43
2.5.6	Fechado y medición de la anchura de anillos de crecimiento	44
2.5.7	Estandarización de crecimiento mediante el incremento en área basal.....	45
2.6	RESULTADOS	46
2.6.1	Análisis estructural	47
2.6.2	Análisis de competencia.....	51
2.6.3	Estandarización de crecimiento mediante el incremento en área basal.....	52
2.7	DISCUSIÓN.....	54
2.8	CONCLUSIONES	60
2.9	REFERENCIAS.....	60
CAPITULO III. EFECTO DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL EN LA FORMACIÓN DE		
MADERA EN ÁRBOLES REMANENTES DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.....		
3.1	RESUMEN.....	66
3.2	ABSTRACT.....	67
3.3	INTRODUCCIÓN	68
3.4	OBJETIVOS.....	70
3.5	MATERIALES Y MÉTODOS	70
3.5.1	Área de estudio.....	70
3.5.2	Inventario forestal y muestreo destructivo de árboles individuales	71
3.5.3	Fechado, medición de la anchura y microdensidad de anillos de crecimiento.....	72
3.5.4	Evaluación anatómica.....	73
3.6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
3.6.1	Aprovechamiento forestal desde un enfoque dendroecológico.....	74
3.6.2	Aprovechamiento forestal desde un enfoque dendroanatómico.....	76

3.7	CONCLUSIONES	80
3.8	REFERENCIAS	81
	CONCLUSIONES GENERALES.....	86

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Especies con crecimiento secundario incluidas en investigaciones dendroecológicas.	12
Cuadro 1.2. Prácticas de manejo forestal que han utilizado herramientas dendroecológicas....	15
Cuadro 2.1. Índices utilizados para evaluar competencia.....	43
Cuadro 2.2. Principales variables dendrométricas de los sitios de muestreo para estimar extracción forestal.....	46
Cuadro 2.3. Patrón de distribución de los sitios de muestreo antes y después de la intervención de saneamiento.....	47
Cuadro 2.4. Índices de densidad en rodales de <i>Pinus hartwegii</i>	51
Cuadro 2.5. Índices de competencia dependientes de la distancia entre un tocón y árboles remanentes de <i>Pinus hartwegii</i>	51
Cuadro 2.6. Incremento en área basal para dos períodos de crecimiento, antes y después de la extracción por saneamiento forestal, en dos exposiciones del APFFNT. Los rectángulos segmentados representan a los núcleos de crecimiento y el IAB de cada año.....	55
Cuadro 3.1. Características dasométricas de un bosque de <i>Abies religiosa</i> con aprovechamiento forestal.....	74
Cuadro 3.2. Relación de las con las características anatómicas de <i>Abies religiosa</i> con los valores de microdensidad de la madera ($p \leq 0.001$).....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución espacial de estudios que utilizan la dendroecología como herramienta en manejo forestal. El tamaño de los círculos refiere el número de estudios revisados.	15
Figura 1.2. Extensión en el tiempo de cronologías desarrolladas en trabajos donde se utiliza la dendroecología como herramienta en manejo forestal.	17
Figura 2.1. Localización de los sitios de medición de extracción forestal	40
Figura 2.2. Extracción de núcleos de crecimiento de árboles vivos y tocones	44
Figura 2.3. Distribución diamétrica de los sitios de medición de extracción forestal en dos exposiciones del APFFNT. Las barras en la escala negativa indican la categoría donde se removió arbolado. Las barras de error, hacen referencia al error estándar.	48
Figura 2.4. Perfil de estructura vertical en sitios de extracción forestal en dos exposiciones del APFFNT.....	50
Figura 2.5. Series de crecimientos estandarizadas en incremento en área basal sobrepuestas a variables climáticas en dos exposiciones del APFFNT.	53
Figura 3.1. Localización del sitio de estudio, rodal de <i>Abies religiosa</i> con aprovechamiento forestal.....	71
Figura 3.2. Variables climáticas y anchuras de anillos de crecimiento en un bosque de <i>Abies religiosa</i>	75
Figura 3.3. Cronologías de las traqueidas de madera tardía de árboles remanentes después del aprovechamiento forestal en rodales de <i>Abies religiosa</i> y su relación con perfiles de microdensidad.	78

INTRODUCCIÓN GENERAL

El análisis de anillos de crecimiento es una herramienta valiosa y confiable para fechar eventos ambientales y antropogénicos, incluido el clima (Aquino-Ramírez et al., 2019), perturbaciones (Zhang, Drobyshev, Gao, Zhao, & Bergeron, 2014), disponibilidad de luz y nutrientes (Drever & Lertzman, 2001), competencia (Dobner, Nicoletti, & Arce, 2018) o manejo (de Miranda et al., 2018). El análisis de estos eventos puede ser a diferentes escalas proporcionando información extensa sobre la dinámica de crecimiento forestal a escala inter e intra-anual (Babst et al., 2014).

La heterogeneidad de los eventos fechables en los anillos de crecimiento ha diversificado la disciplina dendrocronológica, para dar paso al desarrollo de sub-disciplinas científicas que facilitan una variedad de oportunidades de investigación para mejorar la comprensión de un bosque (Lüttge, 2017). Dendroecología (Amoroso, Daniels, Baker, & Camarero, 2017), dendrobioquímica (Locosselli & Buckeridge, 2017), y dendroanatomía (Björklund, Seftigen, Fonti, Nievergelt, & von Arx, 2020) son sub-disciplinas que pueden proporcionar información sobre la magnitud y la variabilidad del balance global de carbono forestal y la investigación ambiental paralela. La presente investigación se fundamentó en el estudio de los procesos ecológicos en un bosque por medio del análisis de anillos de crecimiento de los árboles, conocido como dendroecología (Schweingruber, 1996).

Las especies estudiadas fueron *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* pertenecientes a los dos géneros con mayor importancia en los aprovechamientos maderables de México (CONAFOR, 2012). Estas especies se distribuyen en los bosques de alta montaña de la ecorregión Eje Volcánico Transmexicano (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, & Lindig-Cisneros, 2012; Viveros-Viveros et al., 2009), ubicación que además les confiere especial interés en la modelación de respuestas al cambio climático. Los bosques evaluados se localizan en el volcán Nevado de Toluca, Estado de México (Rojas-García, Fredericksen, Vazquez Lozada, & Endara Agramont, 2019).

El crecimiento de un árbol puede abordarse desde diferentes escalas involucrando los niveles rodal—árbol individual—anillo de crecimiento—célula del xilema. La aproximación multiescalar implica la fusión de metodologías dendrocronológicas, dendroecológicas y dendroanatómicas.

Es por esta razón que el paso inicial es hacer un inventario forestal detallado, seguido de la extracción de núcleos de madera para la medición y el fechado de anillos de crecimiento.

Este trabajo se integró por tres capítulos con un formato de artículo científico. El primer capítulo consistió en una revisión sobre el uso de los métodos dendroecológicos como herramienta en manejo forestal. El segundo capítulo analizó el crecimiento radial en los árboles remanentes de *Pinus hartwegii* en el que se efectuó una corta de saneamiento forestal. El tercer capítulo analizó el crecimiento radial y las características anatómicas del xilema después de un aprovechamiento forestal en un bosque de *Abies religiosa*.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo fue evaluar los impactos multiescalares de la ejecución de prácticas de manejo forestal sobre el crecimiento radial de bosques de coníferas en el Eje Volcánico Transmexicano.

Los objetivos particulares fueron:

- 1) Conocer los efectos de la reducción de la competencia después de cortas de saneamiento sobre el crecimiento radial del arbolado residual.
- 2) Identificar los cambios que ocurren en la madera a nivel celular después de un aprovechamiento forestal, y su efecto en los perfiles de microdensidad.

HIPÓTESIS

La presente investigación plantea las siguientes hipótesis:

- 1.1) un saneamiento forestal reduce la competencia entre los árboles, y por consecuencia ocasiona un incremento en las anchuras de anillos de crecimiento de los árboles circundantes al tocón del individuo removido
- 1.2) los árboles más próximos al árbol removido presentarán mayores incrementos en crecimiento radial
- 2.1) los árboles remanentes de un aprovechamiento forestal acumulan un mayor número de elementos traqueales

2.2) las traqueidas después de un aprovechamiento forestal presentarían menor grosor de pared celular y mayor apertura de lumen en la madera tardía

2.3) la densidad de la madera de los anillos post cosecha será menor que la previa a la cosecha de árboles vecinos.

REFERENCIAS

- Amoroso, M., Daniels, L., Baker, P., & Camarero, J. J. (2017). *Dendroecology Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies*. Switzerland: Springer Nature.
- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-Zamora, H. L., Gomez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V. J., & Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25(2). doi:10.21829/myb.2019.2521773
- Babst, F., Alexander, M. R., Szejner, P., Bouriaud, O., Klesse, S., Roden, J., . . . Trouet, V. (2014). A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle. *Oecologia*, 176(2), 307-322. doi:10.1007/s00442-014-3031-6
- Björklund, J., Seftigen, K., Fonti, P., Nievergelt, D., & von Arx, G. (2020). Dendroclimatic potential of dendroanatomy in temperature-sensitive *Pinus sylvestris*. *Dendrochronologia*, 60. doi:10.1016/j.dendro.2020.125673
- CONAFOR. (2012). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe de Resultados 2004-2009*. Jalisco, México: Coordinación General de Planeación e Información-Gerencia de Inventario Forestal y Geomática de la Comisión Nacional Forestal Retrieved from <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/infys/temas/resultados-2004-2009>
- de Miranda, D. L. C., Higuchi, N., Trumbore, S. E., Latorraca, J. V. F., do Carmo, J. F., & Lima, A. J. N. (2018). Using radiocarbon-calibrated dendrochronology to improve tree-cutting cycle estimates for timber management in southern Amazon forests. *Trees*, 32(2), 587-602. doi:10.1007/s00468-018-1658-3
- Dobner, M., Nicoletti, M. F., & Arce, J. E. (2018). Influence of crown thinning on radial growth pattern of *Pinus taeda* in southern Brazil. *New Forests*. doi:10.1007/s11056-018-9669-x
- Drever, C. R., & Lertzman, K. P. (2001). Light-growth responses of coastal Douglas-fir and western redcedar saplings under different regimes of soil moisture and nutrients. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(12), 2124-2133. doi:10.1139/x01-149
- Locosselli, G. M., & Buckeridge, M. S. (2017). Dendrochemistry, a missing link to further understand carbon allocation during growth and decline of trees. *Trees*, 31(6), 1745-1758. doi:10.1007/s00468-017-1599-2
- Lüttge, U. (2017). From dendrochronology and dendroclimatology to dendrochemistry. *Trees*, 31(6), 1743-1744. doi:10.1007/s00468-017-1608-5
- Rojas-García, F., Fredericksen, T. S., Vazquez Lozada, S., & Endara Agramont, A. R. (2019). Impact of timber harvesting on carbon storage in montane forests of central Mexico. *New Forests*. doi:10.1007/s11056-019-09714-z

- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98-106. doi:10.1016/j.foreco.2012.03.004
- Schweingruber, F. H. (1996). *Tree rings and environment dendroecology*. Switzerland: Haupt.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas Hernández, J., López Upton, J., Ramíre Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257, 836-842. doi:10.1016/j.foreco.2008.10.021
- Zhang, Y., Drobyshev, I., Gao, L., Zhao, X., & Bergeron, Y. (2014). Disturbance and regeneration dynamics of a mixed Korean pine dominated forest on Changbai Mountain, North-Eastern China. *Dendrochronologia*, 32(1), 21-31. doi:10.1016/j.dendro.2013.06.003

CAPITULO I. APLICACIONES DE LA DENDROECOLOGÍA EN EL MANEJO FORESTAL, UNA REVISIÓN¹

The use of dendroecology in forest management: a review

1.1 RESUMEN

La dendroecología es una sub-disciplina de la dendrocronología, que se refiere al estudio de los procesos ecológicos en un bosque por medio del análisis de anillos de crecimiento de los árboles de un rodal. Esta sub-disciplina es útil para comprender la dinámica de crecimiento en condiciones naturales y de manejo. El objetivo del presente estudio fue hacer una revisión sobre la aplicación de la dendroecología como herramienta en manejo forestal. Se identificaron 78 trabajos que involucraron 118 especies. Los países donde se ha realizado un mayor número de estudios dendroecológicos son Estados Unidos de América, España y Argentina. Las prácticas de manejo que fueron mayormente beneficiadas con el uso de métodos dendroecológicos son la estimación del tiempo de turno en la fase de planeación; el aclareo en la fase de ejecución; y las evaluaciones de crecimiento y rendimiento, así como los impactos de plagas y enfermedades sobre el crecimiento en la fase de monitoreo. La investigación en manejo forestal se sustenta principalmente en el seguimiento de parcelas permanentes de medición, y puede ser fortalecida por el análisis de anillos de crecimiento. Los métodos dendrocronológicos proporcionan información relevante sobre la estructura del bosque, el estado fitosanitario, las tasas de crecimiento de especies arbóreas y su variación temporal. Las experiencias de la investigación dendroecológica llevada a cabo en otros países pueden aplicarse también en México, incluyendo el estudio de especies latifoliadas. El uso de la dendroecología como herramienta para el manejo forestal contribuiría a optimizar la producción maderable y favorecería la conservación de los ecosistemas forestales en el país.

Palabras clave: aclareo, anillos de crecimiento, prácticas silvícolas, producción de madera, reclutamiento, tiempo de turno.

¹ Este Capítulo fue aceptado para su publicación en la revista Madera y Bosques

1.2 ABSTRACT

Dendroecology is a sub-discipline of dendrochronology, which refers to the study of ecological processes in a forest through the analysis of tree rings in a forest stand. This sub-discipline is useful for understanding the growth dynamics, in natural and managed conditions. The objective of this study was to review the application of dendroecology as a forest management tool. Seventy-eight papers were identified that involved 118 species. The countries where more dendroecological studies have been carried out were United States of America, Spain and Argentina. The management practices that are mostly benefited from the use of dendroecological methods are the estimation of the rotation-time in the planning phase; thinning in the execution phase; and growth and performance assessments, as well as the impacts of pests and diseases on growth in the monitoring phase. Forest management research is mainly based on the monitoring of permanent sampling plots, and can be supported by tree-ring analysis. Dendrochronological methods provide relevant information on forest structure, phytosanitary status, tree-species growth rates and their temporal variation. Dendroecological research experiences carried out in other countries can also be applied in Mexico, including the study of broadleaved species. The use of dendroecology as forest management tool would help to optimize timber production and promote the conservation of forest ecosystems in Mexico.

Key words: thinning, growth rings, silvicultural practices, wood production, forest regeneration, rotation time.

1.3 INTRODUCCIÓN

La dinámica de crecimiento de los ecosistemas forestales está afectada por un conjunto de factores ambientales y de manejo que incluyen al clima, infestaciones de insectos, incendios, competencia entre árboles (natural y resultado del manejo) y características del suelo, entre otros (Chadwick Dearing Oliver & Larson, 1996). En el caso de bosques naturales, el principal factor que regula y limita el crecimiento es el clima (Camarero, Guerrero, & Gutiérrez, 1997), siendo este el factor responsable del proceso de formación de anillos de crecimiento en especies arbóreas.

Las especies leñosas, particularmente las coníferas, forman anillos de crecimiento en aquellas localidades en donde existe una estacionalidad climática pronunciada, es decir en donde se presente una época seca o fría bien definida a lo largo del año (Fritts, 1976). Debido a que un árbol no es influido únicamente por el clima, los anillos de crecimiento pueden ser considerados como un registro histórico natural de procesos ecológicos. Por lo tanto, a partir del análisis de los anillos y de la aplicación de métodos dendrocronológicos es posible reconstruir dichos procesos en el pasado (Fritts & Swetnam, 1989).

La dendroecología es la rama de la dendrocronología que utiliza y analiza anillos de crecimiento fechados, en el estudio de procesos ecológicos (Schweingruber, 1996). La primera conferencia dedicada a las formas de aplicar la información fechada de anillos de crecimiento a estudios ecológicos se celebró en agosto de 1986 en Tarrytown, Nueva York (Fritts & Swetnam, 1989). Esta disciplina es de gran utilidad en estudios de dinámica de poblaciones y comunidades arbóreas, en el análisis de la estructura de edades de los bosques, y en la determinación de los patrones temporales y espaciales de especies (Gutiérrez-Ilabaca, 2002). Los métodos dendroecológicos también han sido utilizados en el estudio de las respuestas ecofisiológicas de las plantas, ya que la estructura anatómica de la madera de una especie es reflejo de su adaptación al ambiente (Schweingruber, Börner, & Schulze, 2008).

Los análisis dendroecológicos permiten conocer la dinámica de rodales por medio del análisis de los patrones de crecimiento, distinguiendo dos enfoques (Gutiérrez-Ilabaca, 2002). El primer enfoque es el de cronosecuencia, el cual asume un muestreo de rodales de diferente estructura, que representan las distintas fases de sucesión del rodal (Kitzberger, Veblen, & Villalba, 2000; Pickett, 1989).

El segundo enfoque es el de reconstrucción histórica de rodales, el cual requiere datos espacial y temporalmente precisos combinando las técnicas dendroecológicas con la historia de un sitio en particular (*e.g.* cofechado de tocones) (Henry & Swan, 1974; Chadwick Dearing Oliver & Stephens, 1977). En un estudio dendroecológico es recomendable la integración de ambos enfoques (Kitzberger et al., 2000).

Se han realizado síntesis con relación a la investigación dendroecológica. Schweingruber (1996) describe los fundamentos biológicos de la dendroecología, entre ellos las funciones orgánicas involucradas en la formación de anillos de crecimiento y su relación con factores abióticos y las interacciones bióticas. Rozendaal y Zuidema (2011) realizaron una revisión sobre la investigación dendroecológica en ecosistemas tropicales, incluyendo mediciones de isótopos estables (^{13}C y ^{18}O); cronologías de perturbaciones de bosques tropicales y modelos de crecimiento. Amoroso, Daniels, Baker, y Camarero (2017) recopilaron el estado del arte de la dendroecología y el uso de análisis de anillos de crecimiento sobre problemas ecológicos en bosques tropicales, templados y boreales. Esta revisión destaca cómo la investigación dendroecológica ha propiciado el avance de la comprensión de las perturbaciones como un atributo vital de los bosques.

El manejo del bosque implica una perturbación en su dinámica, en este caso, producida deliberadamente por el hombre. El manejo forestal comprende la toma de decisiones y actividades encaminadas al aprovechamiento, conservación y fomento de los recursos forestales de manera ordenada; procurando satisfacer las necesidades de la sociedad actual y futura (Aguirre-Calderón, 2015). El manejo forestal involucra la ejecución de un programa de prácticas silvícolas: métodos de regeneración y todas las actividades de cultivo o tratamientos intermedios, que se realizan durante el periodo de administración del bosque (Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González Elizondo, 2018). La dendroecología es una herramienta útil en el manejo forestal ya que proporciona información sobre la dinámica natural de crecimiento de un bosque (von Gadow, Sánchez Orois, & Aguirre Calderón, 2004), y su respuesta a cambios bióticos, abióticos y antrópicos (Xiao et al., 2015).

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo fue realizar una revisión la literatura sobre la investigación dendroecológica como herramienta en manejo forestal. Los objetivos particulares fueron: (1) ubicar la tendencia temporal del uso de la dendroecología en el manejo forestal, (2) identificar las prácticas de manejo que resultan mayormente beneficiadas de la disciplina dendroecológica; y (3) discutir las oportunidades de la integración de la disciplina dendroecológica como herramienta en manejo forestal.

1.5 MATERIALES Y MÉTODOS

Se efectuó una revisión de literatura para localizar publicaciones con información relacionada al uso de técnicas dendrocronológicas en las prácticas de manejo forestal. En el caso de publicaciones convencionales (artículos científicos, capítulos de libro y libros indizados), se utilizaron motores de búsqueda públicos: Thomson Reuters (Web of Science), Elsevier (Scopus, Science Direct), Springer (SpringerLink), Wiley (Wiley Online Library) y páginas electrónicas (SciELO, Redalyc, Dialnet, Google Académico). Adicionalmente, se realizó una búsqueda para localizar publicaciones en la llamada “literatura gris”, como tesis y resúmenes en extenso resultado de reuniones científicas. Para localizar la literatura gris se llevaron a cabo visitas virtuales a instituciones académicas (universidades e institutos de investigación). Se utilizó para ambos casos una serie de palabras clave con operadores lógicos para seleccionar la literatura relevante: dendroecología, técnicas dendroecológicas, paleoecología, manejo forestal + anillos de crecimiento, manejo forestal + dendrocronología.

Los documentos que resultaron de la búsqueda fueron analizados y se elaboró una base de datos para sintetizar y sistematizar la información de cada documento. Inicialmente se describe el año de la publicación y el tipo de documento (artículo, capítulo de libro indizado, memoria de reunión científica). Se recuperó el nombre científico de la especie o grupo de especies estudiadas en cada investigación. Los nombres científicos se evaluaron con el paquete Taxonstand en el ambiente R (Cayuela, Granzow, Albuquerque, & Golicher, 2012), con el fin de conocer la familia botánica y determinar la estructura anatómica de la madera de cada especie (coníferas o latifoliadas). También se registró el hábito de la especie investigada (árbol, arbusto, liana).

Adicionalmente, se registró el continente y país donde se realizó la investigación, y se categorizó la escala espacial en que fueron efectuadas las prácticas de manejo (paisaje, rodal, sitio) (Vargas-Larreta, 2013). Se graficó la línea de tiempo de cada investigación revisada. A cada investigación se le categorizó en una fase de manejo forestal (planeación, ejecución, monitoreo) (Aguirre-Calderón, 2015). Asimismo, se registró la práctica de manejo, las técnicas dendroecológicas utilizadas y los resultados alcanzados en cada investigación.

1.6 RESULTADOS

La estrategia de búsqueda permitió encontrar 124 documentos, de los cuales se eliminaron 30 estudios que hacían referencia únicamente al potencial dendroecológico de alguna especie y no se relacionaban con prácticas de manejo forestal en árboles (Natalini et al., 2016) o arbustos (Oddi & Ghermandi, 2015). Así mismo, se descartaron 19 referencias asociadas al fechado de incendios forestales (Fulé, Covington, & Moore, 1997; Fulé, Villanueva-Díaz, & Ramos-Gómez, 2005).

La recopilación final resultó en 78 documentos que cumplían con los objetivos de la presente revisión, de los cuáles 76 son artículos científicos y dos son trabajos terminales de grado (Romero-Tovar, 2006; Viguera-Moreno, 2012). Se encontraron trabajos de tesis que posteriormente fueron publicados como artículo científico, debido a que correspondía a la misma investigación, se consideró conservar la publicación convencional (Goche-Télles et al., 2003). Si bien, el uso de datos de anillos de árboles para desarrollar planes de manejo forestal no es nuevo (Schöngart, Bräuning, Barbosa, Lisi, & de Oliveira, 2017), esta revisión se concentró en el período 1996 (Motta & Nola, 1996) al 2020 (Trujillo-Martínez, Reyes-Hernández, Gómez-Guerrero, & Borja-de la Rosa, 2020).

Los trabajos científicos analizados involucran 118 especies pertenecientes a 28 familias (**Cuadro 1.1**). Las familias botánicas con mayor número de publicaciones asociadas fueron Pinaceae (40), Fabaceae (20), Fagaceae (12) y Cupressaceae (5). El hábito de las especies descritas corresponde a 73 árboles (Pérez-de-Lis, García-González, Rozas, & Arévalo, 2011) y cuatro especies arbustivas (Villagra et al., 2005).

Las especies analizadas en los estudios tienen distinta estructura celular de su madera, 36 corresponden a coníferas (compuesta por traqueidas y parénquima) (Camarero, Bernal, & Gil-Pelegrín, 2002), 31 estudios incluyen maderas de especies latifoliadas (madera compuesta por vasos, fibras, fibrotraqueidas y parénquima) (Cusatis, Trazzi, Dobner Júnior, & Higa, 2013), y 10 investigaciones incluyeron estudios con especies de ambos grupos (Amos-Binks & MacLean, 2016).

Los estudios relacionados con el uso de la dendroecología como herramienta en manejo forestal se han utilizado con mayor frecuencia en Estados Unidos de América (13) (Abrams, Ruffner, & DeMeo, 1998); seguido de España (12) (Sangüesa-Barreda, Camarero, García-Martín, Hernández, & de la Riva, 2014) y Argentina (8) (Paritsis & Veblen, 2011). Es por esta distribución que en el continente americano se encuentra un mayor número de investigaciones (**Figura 1.1**).

La escala espacial en que fueron desarrolladas la mayoría de las investigaciones revisadas fue a nivel rodal (69) (Boyden, Reich, Puettmann, & Baker, 2009) y un reducido número a nivel paisaje (9) (De Ridder, Van den Bulcke, Van Acker, & Beeckman, 2013).

Los trabajos recopilados se clasificaron en las fases de manejo forestal considerando las propuestas por Aguirre-Calderón (2015). En la fase de planeación se ubicaron 15 documentos, 26 en la fase de ejecución y 37 en la fase de control o monitoreo. El **Cuadro 1.2** presenta una síntesis de las prácticas de manejo que han utilizado como herramienta a la dendroecología.

Cuadro 1.1. Especies con crecimiento secundario incluidas en investigaciones dendroecológicas.

Familia		Especie
Aquifoliaceae	(Latifoliada)	<i>Ilex inundata</i> Poepp. ex Reissek
Araucariaceae	(Conífera)	<i>Agathis robusta</i> (C. Moore ex F. Muell.) F.M. Bailey <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze <i>Araucaria cunninghamii</i> Aiton ex D. Don
Betulaceae	(Latifoliada)	<i>Betula alleghaniensis</i> Britton <i>Betula platyphylla</i> Sukaczew
Bignoniaceae	(Latifoliada)	<i>Tabebuia barbata</i> (E. Mey.) Sandwith
Combretaceae	(Latifoliada)	<i>Combretum glutinosum</i> Perr. <i>Terminalia ivorensis</i> A. Chev. <i>Terminalia macroptera</i> Guill. & Perr. <i>Terminalia superba</i> Engl. & Diels
Cupressaceae	(Conífera)	<i>Austrocedrus chilensis</i> (D. Don) Pic. Serm. & Bizzarri <i>Calocedrus decurrens</i> (Torr.) Florin <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook. <i>Juniperus thurifera</i> L. <i>Thuja plicata</i> Donn ex D. Don
Elaeocarpaceae	(Latifoliada)	<i>Sloanea terniflora</i> (DC.) Standl.
Euphorbiaceae	(Latifoliada)	<i>Piranhea trifoliata</i> Baill.
Fabaceae	(Latifoliada)	<i>Acacia macrostachya</i> Rchb. ex DC. <i>Acacia seyal</i> Delile <i>Albizia subdimidiata</i> (Splitg.) Barneby & J.W. Grimes <i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C. Sm. <i>Anadenanthera colubrina</i> (Allemão) A.C. Sm. <i>Brachystegia eurycoma</i> Harms <i>Caragana korshinskii</i> Kom. <i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke <i>Centrolobium microchaete</i> (Mart. ex Benth.) H.C. Lima <i>Cordyla pinnata</i> (A. Rich.) Milne-Redh. <i>Daniellia ogea</i> (Harms) Rolfe ex Holland <i>Hymenaea courbaril</i> L. <i>Julbernardia</i> Pellegr. <i>Macrolobium acaciifolium</i> (Benth.) Benth. <i>Peltogyne heterophylla</i> M.F. Silva <i>Platymiscium ulei</i> Harms <i>Prosopis caldenia</i> Burkart <i>Prosopis flexuosa</i> DC. <i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir.
Fagaceae	(Latifoliada)	<i>Castanea sativa</i> Mill. <i>Fagus grandifolia</i> Ehrh. <i>Fagus sylvatica</i> L.

Cuadro 1.1 Continuación...

Familia		Especie
Fagaceae	(Latifoliada)	<i>Quercus alba</i> L. <i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb. <i>Quercus montana</i> Willd. <i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl. <i>Quercus prinus</i> Lam. <i>Quercus pyrenaica</i> Steven <i>Quercus robur</i> L. <i>Quercus rubra</i> L. <i>Quercus velutina</i> Lam.
Juglandaceae	(Latifoliada)	<i>Carya glabra</i> (Mill.) Sweet
Lecythidaceae	(Latifoliada)	<i>Eschweilera albiflora</i> (DC.) Miers
Magnoliaceae	(Latifoliada)	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.
Malvaceae	(Latifoliada)	<i>Luehea cymulosa</i> Spruce ex Benth. <i>Pseudobombax munguba</i> (Mart.) Dugand <i>Tilia americana</i> L. <i>Triplochiton scleroxylon</i> K. Schum.
Meliaceae	(Latifoliada)	<i>Cedrela fissilis</i> Vell. <i>Cedrela odorata</i> L. <i>Entandrophragma utile</i> (Dawe & Sprague) Sprague
Moraceae	(Latifoliada)	<i>Ficus boliviana</i> C.C. Berg <i>Ficus insipida</i> Willd.
Myrtaceae	(Latifoliada)	<i>Eucalyptus nitens</i> (Deane & Maiden) Maiden
Nothofagaceae	(Latifoliada)	<i>Nothofagus dombeyi</i> (Mirb.) Oerst. <i>Nothofagus nervosa</i> (Phil.) Krasser <i>Nothofagus obliqua</i> (Mirb.) Oerst. <i>Nothofagus pumilio</i> (Poepp. & Endl.) Reiche
Nyssaceae	(Latifoliada)	<i>Nyssa aquatica</i> L.
Oleaceae	(Latifoliada)	<i>Fraxinus mandshurica</i> Rupr.
Pinaceae	(Conífera)	<i>Abies alba</i> Mill. <i>Abies amabilis</i> Douglas ex J. Forbes <i>Abies balsamea</i> (L.) Mill. <i>Abies concolor</i> Lindl. <i>Abies lasiocarpa</i> Sarg. <i>Abies magnifica</i> A. Murray <i>Abies nephrolepis</i> (Trautv. ex Maxim.) Maxim. <i>Larix decidua</i> Mill. <i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. <i>Picea engelmannii</i> Engelm. <i>Picea jezoensis</i> (Siebold & Zucc.) Carrière <i>Picea mariana</i> (Mill.) Britton, Sterns & Poggenb. <i>Picea rubens</i> Sarg. <i>Pinus albicaulis</i> Engelm.

Cuadro 1.1 Continuación...

Familia		Especie
Pinaceae	(Conífera)	<i>Pinus banksiana</i> Lamb. <i>Pinus canariensis</i> C. Sm. ex DC. <i>Pinus cembra</i> L. <i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon <i>Pinus halepensis</i> Mill. <i>Pinus jeffreyi</i> Balf. <i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc. <i>Pinus lambertiana</i> Douglas <i>Pinus montezumae</i> Lamb. <i>Pinus monticola</i> Douglas ex D. Don <i>Pinus nigra</i> J.F. Arnold <i>Pinus patula</i> Schl. et Cham. <i>Pinus pinaster</i> Aiton <i>Pinus pinea</i> L. <i>Pinus ponderosa</i> P. Lawson & C. Lawson <i>Pinus resinosa</i> Aiton <i>Pinus rudis</i> Endl. <i>Pinus strobus</i> L. <i>Pinus sylvestris</i> L. <i>Pinus taeda</i> L. <i>Pinus wallichiana</i> A.B. Jacks. <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco <i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carrière <i>Tsuga heterophylla</i> (Raf.) Sarg. <i>Tsuga mertensiana</i> (Bong.) Carrière
Rosaceae	(Latifoliada)	<i>Sorbus torminalis</i> (L.) Crantz
Rutaceae	(Latifoliada)	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck
Salicaceae	(Latifoliada)	<i>Populus davidiana</i> Dode <i>Populus tremuloides</i> Michx.
Sapindaceae	(Latifoliada)	<i>Acer rubrum</i> L. <i>Acer saccharum</i> Marshall
Sapotaceae	(Latifoliada)	<i>Chrysophyllum argenteum</i> Jacq. <i>Pouteria elegans</i> (A. DC.) Baehni
Simaroubaceae	(Latifoliada)	<i>Ailanthus altissimus</i> (Mill.) Swingle
Zygophyllaceae	(Latifoliada)	<i>Balanites aegyptiaca</i> (L.) Delile

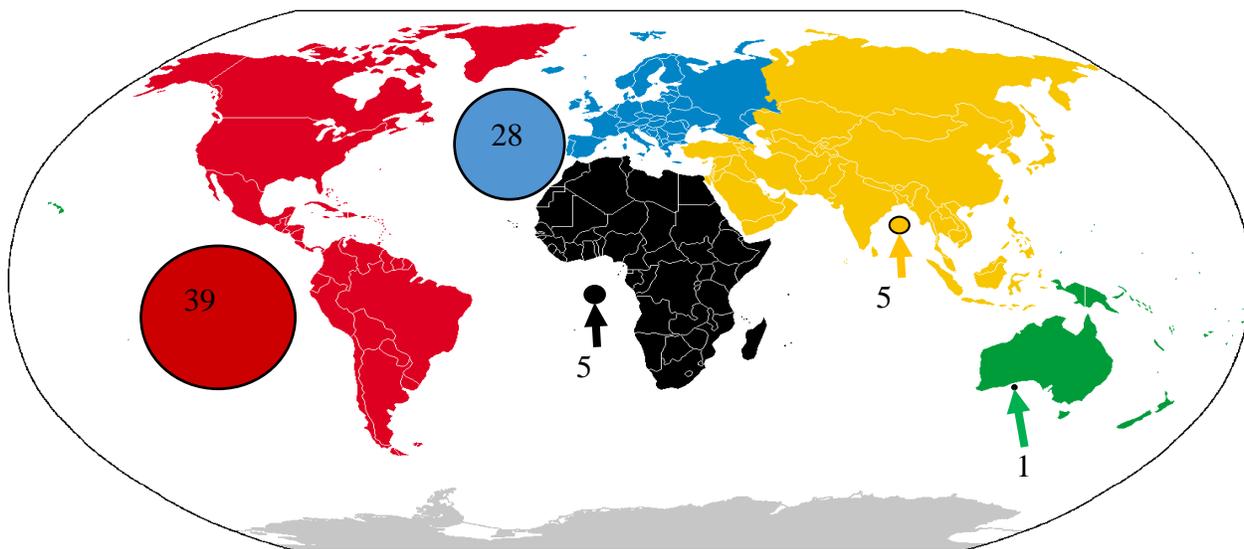


Figura 1.1. Distribución espacial de estudios que utilizan la dendroecología como herramienta en manejo forestal. El tamaño de los círculos refiere el número de estudios revisados.

Se elaboró una línea de tiempo en la que se integran 72 estudios de la presente revisión y la dimensión de las cronologías que se desarrollaron en cada uno de ellos (**Figura 1.2**). En el eje de horizontal se presenta la longitud de la cronología del trabajo, y en el eje vertical, se incluyen las citas de cada estudio.

Cuadro 1.2. Prácticas de manejo forestal que han utilizado herramientas dendroecológicas.

Fase de manejo	Práctica silvícola	Referencias
Planeación (15)	Estimación del turno (13)	Bogino & Villalba, 2008; Brienen & Zuidema, 2006; Cruz-Johnson et al., 2007; Cusatis et al., 2013; Groenendijk, Bongers, & Zuidema, 2017; Hess, Ricken, & Ciarnoschi, 2018; Ligot et al., 2019; López et al., 2013; López et al., 2012; Schöngart, 2008; Tang et al., 2016; Villagra et al., 2005; Xiao et al., 2015
	Mantenimiento de estructura y diversidad (2)	Toïgo et al., 2015; Zeller et al., 2017

Cuadro 1.2. Continuación...

Fase de manejo	de Práctica silvícola	Referencias
Ejecución (26)	Aclareo (18)	Anning & McCarthy, 2013; Dobner, Nicoletti, & Arce, 2018; Druckenbrod et al., 2013; Dukpa et al., 2018; Goche-Télles et al., 2003; Hart et al., 2012; Helama, Salminen, Timonen, & Varmola, 2008; Hernández López et al., 1996; Martín-Benito et al., 2010; Metslaid et al., 2016; Misson, Vincke, & Devillez, 2003; Muñoz et al., 2010; Pérez-de-Lis et al., 2011; Rozas, 2004; Stan & Daniels, 2010; Stojanović et al., 2017; Vernon et al., 2018; Winck et al., 2015
	Corta de selección (6)	Esper et al., 2012; Powers, Pregitzer, Palik, & Webster, 2010; Santilli et al., 2005; Trotsiuk et al., 2018; Trujillo-Martínez et al., 2020
	Extracción por eventos extremos (2)	Klesse et al., 2016; Zhang et al., 2014
Monitoreo (37)	Análisis de tasas de mortalidad (3)	Amoroso & Larson, 2010; Vanoni et al., 2019; Viguera-Moreno, 2012
	Evaluación de árboles semilleros (1)	Lucas-Borja & Vacchiano, 2018
	Evaluación de crecimiento y rendimiento (11)	Allen et al., 2019; April Sahara, Sarr, Van Kirk, & Jules, 2015; Babst et al., 2014; Chauchard & Sbrancia, 2003; Chidumayo, 2019; Maxwell et al., 2014; Mbow, Chhin, Sambou, & Skole, 2013; Olano, Rozas, Bartolomé, & Sanz, 2008; Pretzsch et al., 2014; Rozas & Olano, 2013; Xu et al., 2019
	Evaluación de plantación (4)	Boyden et al., 2009; De Ridder et al., 2013; Jäghagen & Albrektson, 1996; Nock et al., 2016
	Evaluación del reclutamiento (4)	Abrams & Copenheaver, 1999; Abrams et al., 1998; Copenheaver & Abrams, 2003; Rozas, 2003
	Regulación de pastoreo (2)	Dussart, Chirino, Morici, & Peinetti, 2011; Motta & Nola, 1996
	Sanidad forestal (12)	Abrams & Hock, 2006; Amos-Binks & MacLean, 2016; Camarero et al., 2002; Ferrero et al., 2013; Knüsel, Conedera, Rigling, Fonti, & Wunder, 2015; Paritsis & Veblen, 2011; Robson et al., 2015; Sangüesa-Barreda et al., 2014; Sangüesa-Barreda et al., 2015; Wang, Stenström, Boberg, Ols, & Drobyshev, 2017; Zhang et al., 1999

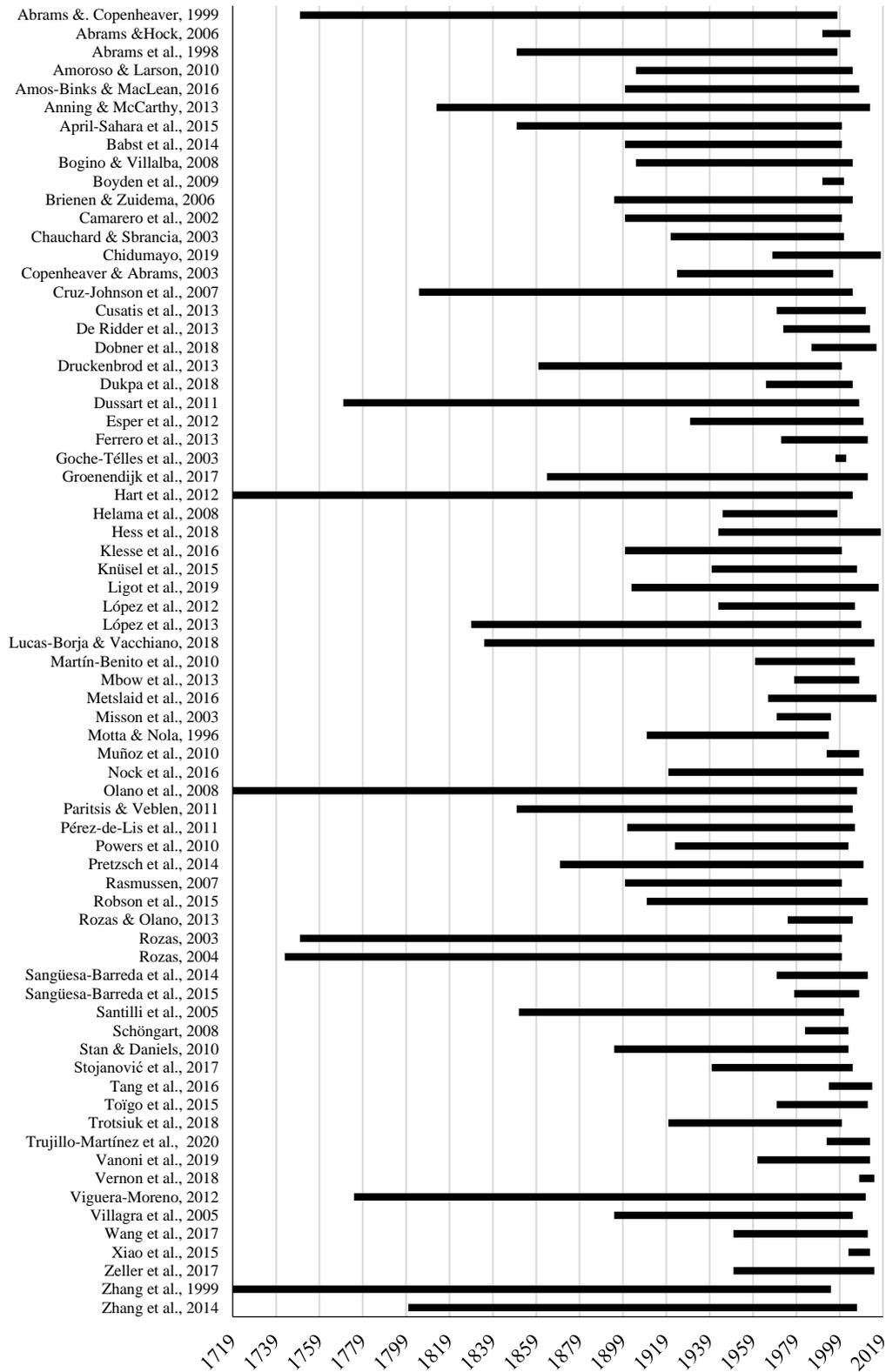


Figura 1.2. Extensión en el tiempo de cronologías desarrolladas en trabajos donde se utiliza la dendroecología como herramienta en manejo forestal.

1.7 DISCUSIÓN

El manejo forestal consiste en la aplicación de prácticas silvícolas para que un bosque entero se mantenga saludable y vigoroso (Heiligmann, 2002). El rango de prácticas en manejo forestal puede relacionarse con una mejora en la salud del ecosistema, o el aumento en las ganancias de las empresas forestales (Bettinger, Boston, Siry, & Grebner, 2017).

Es evidente que muchos bosques no se encuentran en estado natural y se carece de un análisis histórico completo de las prácticas de manejo aplicadas. La dendroecología utiliza los métodos dendrocronológicos para responder a interrogantes ecológicas, lo que puede derivar en información y mejores instrumentos aplicables en el manejo forestal (Amoroso & Suarez, 2015).

1.7.1 Uso de la dendroecología en la planeación forestal

Los sistemas de manejo forestal sustentable para los bosques requieren información sobre el crecimiento de los árboles. Una de las mayores dificultades para el manejo sostenible de los bosques, es la obtención de datos de crecimiento confiables del arbolado, lo cual es un requisito previo para determinar los volúmenes de cosecha y los ciclos de corta (Schöngart, 2008).

Determinar cuál es la longitud óptima del turno, que corresponde al tiempo requerido para producir los productos del tamaño y características deseadas, es un tema que ha sido debatido largamente. La determinación de la longitud del turno está basada en mediciones de las tasas de crecimiento de la masa forestal, y de forma tradicional se ha realizado mediante análisis troncales, en los cuales se efectúa un conteo de los anillos de crecimiento y en ningún momento se fechan. La presente revisión encontró 13 investigaciones relacionadas con la estimación del turno (Cuadro 2). Para poder estimar el crecimiento futuro de los bosques, las mediciones del crecimiento en el pasado son de gran importancia, como aquellas que entregan los análisis de individuos maduros (Cruz-Johnson, Honeyman-Lucchini, Pezo-Correa, & Schulze del Canto, 2007).

El análisis de anillos de árboles proporciona datos de crecimiento específicos de especies que pueden usarse para permitir o mejorar las proyecciones de disponibilidad de madera durante los siguientes ciclos de corta.

Los datos de crecimiento derivados del análisis de anillos de crecimiento permiten realizar proyecciones específicas para cada especie y, por lo tanto, ayudan a proporcionar la base de conocimientos necesaria para el manejo forestal sostenible (López, Villalba, & Bravo, 2013).

Los escenarios durante la planeación forestal tienen que atender a las características de los bosques, los riesgos involucrados, la visión a largo plazo del administrador de la tierra o el propietario de la tierra (Korjus, 2014). Es conocido que varios factores afectan los procesos demográficos de los bosques, como el crecimiento, la supervivencia y el reclutamiento de nuevos individuos (Rozas, 2003).

Se ha demostrado que el crecimiento de los árboles depende de las condiciones ecológicas del sitio, la genética de los árboles y la competencia con la vegetación circundante, así como el tamaño de los árboles o la ontogenia. Sin embargo, debido a la escasez de datos disponibles, la importancia de tales factores no está clara y, por lo general, se ignora al estimar los rendimientos futuros de la madera. Un método eficaz para llenar este vacío, es el uso de mediciones dendroecológicas en especies pioneras como sugiere Ligot et al. (2019). Aunque, Bogino y Villalba (2008) sugieren que en el desarrollo de estas mediciones deben contemplarse árboles dominantes y codominantes.

Las mediciones del incremento de anchura de anillos, permite evaluar el crecimiento de las especies a lo largo del tiempo, para obtener el ciclo de corta, planificar la producción y manejo de las especies. La estimación del turno con base en un estudio dendroecológico permite hacer una mejor planeación de las cortas, debido a que en algunos casos el turno técnico sugerido en literatura puede ser mayor o menor al biológicamente óptimo (Tang et al., 2016). De igual forma, el crecimiento diamétrico puede ser más lento de lo comúnmente asumido, con variaciones importantes entre especies y entre sitios de crecimiento; además de la sobrestimación o subestimación al no contemplar anillos ausentes y falsos. Por ello, la idea de establecer pautas fijas de manejo similares para todas las especies y sitios, sin considerar las tasas reales de crecimiento, no es la recomendada, poniendo en algunos casos en riesgo la sostenibilidad de los bosques manejados para producción maderable (López, Villalba, & Peña-Claros, 2012).

1.7.2 Prácticas de manejo forestal y dendroecología

Las actividades de extracción de madera son cruciales en la rentabilidad de un aprovechamiento forestal, ya que si no se hacen con eficiencia o adecuada tecnología pueden derivar en problemas de competitividad para los productos ofertados, lo cual tiene un impacto económico directo. La adecuada selección de árboles que cortar, permitirá maximizar las propiedades que impactan la calidad de la madera en caso de producción (Hevia, Álvarez-González, & Majada, 2016)

El crecimiento radial de los árboles dentro de las masas forestales depende en gran medida de las interacciones entre la competencia y las condiciones ambientales. Después de aclareos es posible observar diferencias entre estratos de dosel, debido a la cantidad de luz (energía) que recibe cada árbol (Druckenbrod, Pederson, Rentch, & Cook, 2013; Pretzsch, Biber, Schutze, Uhl, & Rotzer, 2014; Stojanović et al., 2017).

La ejecución de prácticas de aclareo conlleva cambios en la competencia por recursos como el agua y los nutrimentos del suelo que se traducen en modificaciones de las propiedades de la madera. Winck, Fassola, y Área (2015) encontraron en plantaciones de *Pinus taeda* que después del aclareo se presentaron modificaciones en las propiedades anatómicas de la madera, con un incremento en la longitud de traqueidas y el espesor de pared celular.

Se ha buscado conocer los efectos del aclareo en plantaciones de especies de rápido crecimiento que sean tolerantes a un amplio rango de condiciones ambientales. En una plantación de *Eucalyptus nitens*, el aclareo después de ocho años no tuvo efecto significativo sobre la densidad básica de la madera (Muñoz, Neira, & Cancino, 2010).

En plantaciones jóvenes de *Pinus patula*, en Hidalgo, México, el aclareo tuvo una respuesta en la disminución en la anchura del anillo de crecimiento, pero el aclareo no influyó sobre la densidad básica de la madera, ya que la variación en densidad generalmente se presenta en los primeros años de edad (Goche-Télles et al., 2003). Para la misma especie, en plantaciones de Puebla, México, el aclareo tuvo una respuesta en un aumento en la anchura total y de madera temprana, una reducción en la anchura de la madera tardía, y una disminución la densidad de la madera (2 - 5%) (Hernández López, Martínez Reyes, Vargas Hernández, Velázquez-Martínez, & Ángeles, 1996).

La reconstrucción dendroecológica permite asociar la historia del dosel con las prácticas de aclareo ocurridas en el bosque manejado (Hart, Clark, Torreano, & Buchanan, 2012; Rozas, 2004), además permite conocer la eficiencia del uso de agua, lo cual podría ser una herramienta en la toma de decisiones de las especies a ser plantadas con miras a la resistencia o adaptaciones a sequías (Martín-Benito, del Río, Heinrich, Helle, & Cañellas, 2010). El aclareo en conjunto con las quemas prescritas, forman parte de prácticas de manejo del fuego, que además contribuyen a un aumento en el crecimiento del arbolado (Anning & McCarthy, 2013; Vernon, Sherriff, van Mantgem, & Kane, 2018).

Las cortas de selección también se ven reflejadas en un aumento en la anchura de los anillos de crecimiento en árboles individuales, por una disminución de la competencia (Esper, Benz, & Pederson, 2012; Rasmussen, 2007). El análisis dendroecológico de un rodal permite conocer las probables condiciones de un bosque de referencia y con ello tomar decisiones para elegir las prácticas de manejo óptimas (Fulé et al., 1997; Santilli, Pelfini, Citterio, & Turri, 2005).

La afectación natural del bosque derivada de eventos climatológicos extremos que deterioran las copas de los árboles, como los huracanes (Zhang, Drobyshev, Gao, Zhao, & Bergeron, 2014) y nevadas (Klesse, Etzold, & Frank, 2016), también se traduce en la remoción de arbolado posterior a la perturbación natural y una alteración en la dinámica de crecimiento.

1.7.3 Monitoreo forestal y dendroecología

La fase de monitoreo en manejo forestal, puede incluir una continua retroalimentación en las distintas fases de la implementación, lo que permitiría ajustar las actividades y reducir las incertidumbres asociadas a las mismas. Es por ello que incluye el mayor número de investigaciones de la presente revisión (Cuadro 2).

El crecimiento del árbol está regulado por una combinación de factores exógenos y endógenos. La asignación de recursos es sensible a la inversión en la reproducción. Tanto la asignación de recursos como los patrones de producción de semillas también son sensibles a la edad del árbol. Las cronologías estandarizadas de anillos de crecimiento permiten conocer que una producción alta de semillas tiene un efecto negativo en la anchura del anillo de los árboles y debilita las relaciones clima-crecimiento en *Pinus nigra* (Lucas-Borja & Vacchiano, 2018).

La evaluación de crecimiento y rendimiento de una especie es una de las prácticas de monitoreo forestal que más se ha beneficiado de la disciplina dendroecológica (Cuadro 2). A través de la generación de cronologías donde se identifican eventos de liberación y supresión del arbolado es posible reconstruir la historia de la dinámica de crecimiento de un rodal (Abrams et al., 1998). Las evaluaciones de crecimiento y rendimiento sustentados en estudios dendroecológicos, ayudan a comprender la condición actual y generar proyecciones dirigidas a entender diferentes regímenes de manejo (Allen, Keim, & Dean, 2019).

El estudio de los tocones permite a través de técnicas de fechado-cruzado investigar las causas de mortalidad, entre ellas las relacionadas con actividades humanas (Grabner, Wimmer, & Weichenberger, 2004). La mortalidad en árboles es causada por complejas interacciones entre múltiples factores bióticos y abióticos. Los eventos de mortalidad que no son inducidos por perturbaciones naturales, frecuentemente pueden ser identificados en patrones de crecimiento radial de los árboles, que suelen servir como indicadores de la vulnerabilidad a eventos de mortalidad futuros (Vanoni, Cailleret, Hülsmann, Bugmann, & Bigler, 2019).

El estudio de las tasas de mortalidad, da como resultado un experimento natural que permite estimar el éxito de regeneración que seguiría después de diferentes porcentajes de aclareo, permitiendo la dirección intencional del proceso de regeneración. Amoroso y Larson (2010) evaluaron ocho rodales dominados por *Austrocedrus chilensis* y encontraron que la mortalidad excesiva tuvo un efecto en el reclutamiento y la composición de la regeneración al permitir el establecimiento de diferentes especies dependiendo del grado de mortalidad.

Los anillos de crecimiento proporcionan información sobre los patrones temporales del establecimiento de los árboles y, por lo tanto, sobre las influencias de las alteraciones y las condiciones abióticas en la estructura forestal (Boyden et al., 2009; Nock, Metcalfe, & Hietz, 2016). La evaluación del tamaño de las plántulas se ha relacionado con la talla futura del árbol y la anchura de los anillos de crecimiento, estos caracteres son importantes para la calidad de la madera. Esto sugiere que la capacidad competitiva de un árbol se establece en gran medida al principio del desarrollo del rodal (Jäghagen & Albrektson, 1996). Estos patrones han sido contrastados en plantaciones y bosques naturales (De Ridder et al., 2013).

Los métodos dendroecológicos tienen un amplio potencial para estudiar la dinámica de los rodales jóvenes. Copenheaver y Abrams (2003) evaluaron ocho rodales de *Pinus banksiana* a fin de identificar supresiones y liberaciones a nivel de árbol individual y a nivel rodal. Ellos encontraron que las cronologías de anchuras de anillos son útiles para identificar patrones comunes de crecimiento a nivel de rodal dentro de las plantaciones, pero las cronologías de árboles individuales son más útiles dentro de los rodales regenerados naturalmente. El estudio dendroecológico de patrones de reclutamiento puede contribuir al entendimiento de la sucesión ecológica de especies (Abrams et al., 1998).

Se ubicaron 12 estudios relacionados con sanidad forestal. Sangüesa-Barreda et al. (2015) evaluaron mediante técnicas dendroecológicas la historia de tres plagas (muérdago, insectos, hongos). De forma general, las plagas y enfermedades reducen el crecimiento radial de la madera en las especies forestales: insectos defoliadores (Robson, Conciatori, Tardif, & Knowles, 2015), escarabajos barrenadores (Ferrero, Coirini, & Díaz, 2013) y escarabajos descortezadores (Zhang, Alfaro, & Hebda, 1999). La cronología más larga localizada en la presente revisión fue desarrollada por Zhang et al. (1999), y permitió conocer la relación del incremento de la humedad ambiental en primavera con los brotes de un coleóptero (*Dendroctonus rufipennis* Kirby) y sus efectos sobre el crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Beissn.) Franco. Esta cronología abarcó 581 años (1414-1995) y ubica temporalmente reducciones del crecimiento en las décadas 1720, 1810s-1820s, y 1960s-principios de 1980s (ver Figura 2).

1.7.4 Perspectivas del manejo forestal asistido por dendroecología

Un plan de manejo forestal puede ser óptimo para un rodal individual, pero esto no significa necesariamente que sea óptimo para un paisaje en su conjunto (von Gadow et al., 2004). Por esta razón, se requiere conocer la información precisa de crecimiento, establecimiento y mortalidad (Kitzberger et al., 2000).

Existen varios esquemas de certificación para garantizar un aprovechamiento forestal sostenible, los cuales certifican grandes áreas de producción de bosques. Bajo dichos esquemas, las empresas madereras deben evaluar si las especies no están sobreexplotadas y, si es necesario, adaptar sus actividades de corta.

Sin embargo, la información necesaria para proyectar las intensidades de aprovechamiento (crecimiento, mortalidad y tasas de regeneración de los árboles) es escasa o inexistentes (López et al., 2013).

Los inventarios forestales permiten comprender las condiciones actuales del bosque. Se necesitan proyecciones para estimar la dirección de los recursos forestales bajo diferentes regímenes de manejo (Bettinger et al., 2017). Frecuentemente, las tasas de crecimiento de las especies arbóreas se derivan de mediciones repetidas en parcelas permanentes de medición. El uso del análisis de anillos de crecimiento, permite calcular edades directamente, sin hacer uso de simulaciones, y por lo tanto son más precisas. Además, los patrones de crecimiento obtenidos a partir de mediciones de anillos de crecimiento permiten una evaluación precisa de la variación entre árboles en el crecimiento a largo plazo y la incorporación de esta variación de crecimiento intraespecífica (Brienen & Zuidema, 2006).

La investigación de manejo forestal sustentada básicamente en el monitoreo de parcelas permanentes de medición, y puede ser reforzada con el análisis de anillos de crecimiento que proporciona información relevante sobre la estructura del bosque, daños por agentes externos y las tasas de crecimiento de especies arbóreas. Chauchard y Sbrancia (2003) evaluaron el crecimiento diamétrico para *Nothofagus obliqua*, a partir de tres fuentes de datos: parcelas permanentes de medición, análisis troncales y núcleos de incremento. Los datos que provenían principalmente de las parcelas de muestreo, permitieron obtener modelos de interés para la predicción del incremento diamétrico en el corto plazo, mientras que las series de crecimiento proveniente de núcleos permitieron obtener mejores modelos que permitían una mejor interpretación bajo diferentes condiciones de competencia.

Las futuras condiciones estructurales de los bosques son importantes para evaluar el impacto de los nuevos regímenes forestales en los rendimientos, para determinar los turnos de los rodales existentes (Bettinger et al., 2017). Es por ello que la información generada con métodos dendroecológicos, pueden ayudar en la proyección de la estructura y composición del bosque futuro (Toïgo et al., 2015; Zeller et al., 2017).

1.7.5 La disciplina dendroecológica como herramienta para el manejo forestal en México

Los análisis de anillos de árboles de árboles vivos o muertos pueden describir eventos y procesos que abarcan décadas, siglos y milenios. En términos de escalas espaciales, un estudio dendroecológico puede proporcionar una comprensión detallada de los procesos que ocurren en la escala de árboles individuales, bosques, continentes o globalmente (Amoroso et al., 2017). En este contexto, el uso de la dendroecología como herramienta para el manejo forestal en México tiene un amplio potencial, debido a la diversidad de ecosistemas forestales que presentan especies con anillos de crecimiento, distintas etapas de sucesión y distintos estados de conservación. La revisión efectuada ubica cuatro estudios dendroecológicos relacionados con una práctica de manejo forestal en bosques de *Pinus*, tres corresponden a la fase de ejecución (Goche-Télles et al., 2003; Hernández López et al., 1996; Trujillo-Martínez et al., 2020) y uno a monitoreo (Romero-Tovar, 2006).

Una de las áreas de oportunidad de la dendroecología es el uso de los núcleos de crecimiento colectados en inventarios de manejo, inventarios estatales e incluso el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS). Estas muestras de madera generalmente se utilizan para la estimación de la edad, incremento corriente anual y tiempo de paso, concentrándose en los 2.5 cm de madera inmediatos a la corteza (CONAFOR, 2012). Si bien los objetivos del INFyS, inventarios estatales e inventarios de manejo son diferentes, la evaluación desde la perspectiva dendroecológica de muestras de madera a nivel nacional permitirían conocer tasas de crecimiento de diferentes especies a escala de paisaje y/o de eco-región; mientras que el acercamiento dendroecológico en inventarios estatales o de manejo podría responder a las necesidades específicas de cada entidad federativa en materia de manejo forestal.

Las áreas de oportunidad utilizando métodos dendroecológicos en México, podrían enfocarse en las estimaciones de tasas de crecimiento y tiempos de turno; considerando los índices de sitio en que se desarrollan los bosques. De esta forma, tendrían una evaluación más precisa de los incrementos de biomasa forestal y los reservorios de carbono a través del tiempo. El uso de métodos dendroecológicos, incluyendo el cofchado de las muestras de anillos de crecimiento, podría reducir las incertidumbres en las proyecciones de biomasa, en los incipientes mercados de carbono.

Las experiencias de la disciplina dendroecológica desarrolladas en otros países pueden aplicarse en México, incluso en el estudio de especies latifoliadas, grupo botánico que desde este enfoque no ha sido estudiado. Por otro lado, la revisión bibliográfica indica una disminución del crecimiento, resultado de la presencia de plagas y enfermedades forestales. Asimismo, las cortas de selección promueven el reclutamiento y pulsos de crecimiento importantes en los árboles remanentes. La dendroecología garantiza el control temporal de estos procesos, aunado al adecuado manejo de bosques, que propiciaría las condiciones deseadas de producción y conservación en nuestro país. Los próximos ejes de investigación dendroecológica podrían incluir la caracterización más precisa del crecimiento en especies de interés comercial o de conservación, la planeación de prácticas silvícolas y el diseño de estrategias de restauración, entre las prácticas de ejecución del manejo forestal.

1.8 CONCLUSIONES

Una de las razones clave por las que ha prosperado la dendroecología en las últimas décadas es la relevancia directa de los conocimientos proporcionados para el manejo forestal, en sus tres etapas: planeación, ejecución y monitoreo.

La producción científica relacionada con las edades y los patrones de crecimiento de los árboles a largo plazo es esencial para comprender las condiciones del rodal y la perturbación en los bosques.

La dendroecología tiene amplias áreas de oportunidad, entre ellas la determinación de tasas de crecimiento y turnos para especies forestales, incluyendo especies de coníferas y latifoliadas. Este acercamiento traería beneficios para la generación de escenarios de incrementos de biomasa forestal y los reservorios de carbono ante problemáticas como la presencia de plagas y enfermedades forestales; así como para el diseño de mejores prácticas de manejo forestal sustentable.

1.9 REFERENCIAS

- Abrams, M. D., & Copenheaver, C. A. (1999). Temporal variation in species recruitment and dendroecology of an old-growth white oak forest in the Virginia Piedmont, USA. *Forest Ecology and Management*, 124(2-3), 275—284.
- Abrams, M. D., & Hock, W. K. (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. doi:10.1016/j.foreco.2006.02.019

- Abrams, M. D., Ruffner, C., & DeMeo, T. (1998). Dendroecology and species co-existence in an old-growth *Quercus*–*Acer*–*Tilia* talus slope forest in the central Appalachians, USA. *Forest Ecology and Management*, 106(1), 9–18. doi:10.1016/S0378-1127(97)00234-X
- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el Siglo XXI. *Madera y Bosques*, 21, 17-28. doi:10.21829/myb.2015.210423
- Allen, S. T., Keim, R. F., & Dean, T. J. (2019). Contrasting effects of flooding on tree growth and stand density determine aboveground production in baldcypress forests. *Forest Ecology and Management*, 432, 345-355. doi:10.1016/j.foreco.2018.09.041
- Amoroso, M., Daniels, L., Baker, P., & Camarero, J. J. (2017). *Dendroecology Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies*. Switzerland: Springer Nature.
- Amoroso, M., & Larson, B. C. (2010). Can a natural experiment be used as a tool to design partial cutting regimes? The decline of *Austrocedrus chilensis* forests, an example. *Journal of Forest Research*, 15(1), 38-45. doi:10.1007/s10310-009-0139-3
- Amoroso, M., & Suarez, M. L. (2015). La aplicación del análisis de los anillos de crecimiento a interrogantes ecológicos: Un breve repaso de la Dendroecología en Hispanoamérica. *Ecosistemas*, 24(2), 1-6. doi:10.7818/ecos.2015.24-2.01
- Amos-Binks, L. J., & MacLean, D. A. (2016). The influence of natural disturbances on developmental patterns in Acadian mixedwood forests from 1946 to 2008. *Dendrochronologia*, 37, 9-16. doi:10.1016/j.dendro.2015.11.002
- Anning, A. K., & McCarthy, B. C. (2013). Competition, size and age affect tree growth response to fuel reduction treatments in mixed-oak forests of Ohio. *Forest Ecology and Management*, 307, 74-83. doi:10.1016/j.foreco.2013.07.008
- April Sahara, E., Sarr, D. A., Van Kirk, R. W., & Jules, E. S. (2015). Quantifying habitat loss: Assessing tree encroachment into a serpentine savanna using dendroecology and remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 340, 9-21. doi:10.1016/j.foreco.2014.12.019
- Babst, F., Alexander, M. R., Szejner, P., Bouriaud, O., Klesse, S., Roden, J., . . . Trouet, V. (2014). A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle. *Oecologia*, 176(2), 307-322. doi:10.1007/s00442-014-3031-6
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J., & Grebner, D. L. (2017). *Forest Management and Planning*. United Kingdom: Elsevier.
- Bogino, S. M., & Villalba, R. (2008). Radial growth and biological rotation age of *Prosopis caldenia* Burkart in Central Argentina. *Journal of Arid Environments*, 72(1), 16-23. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.04.008
- Boyden, S. B., Reich, P. B., Puettmann, K. J., & Baker, T. R. (2009). Effects of density and ontogeny on size and growth ranks of three competing tree species. *Journal of Ecology*, 97(2), 277-288. doi:10.1111/j.1365-2745.2008.01477.x
- Brienen, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2006). The use of tree rings in tropical forest management: Projecting timber yields of four Bolivian tree species. *Forest Ecology and Management*, 226(1-3), 256-267. doi:10.1016/j.foreco.2006.01.038

- Camarero, J. J., Bernal, E., & Gil-Pelegrín, E. (2002). Estudio dendroecológico del ataque de *Epinotia subsequana* Hw. (Lepidoptera: Tortricidae) sobre un abetar (*Abies alba* Mill.) del Pirineo aragonés (Diazas, Torla). *Forest Systems*, 11(2), 395–407. Recuperado de <http://www.inia.es/IASPF/2002/vol11-2/camarero.PDF>
- Camarero, J. J., Guerrero, J., & Gutiérrez, E. (1997). Formación del anillo de crecimiento y clima: un ejemplo de modelos para *Pinus uncinata* Ram. y *Pinus sylvestris* L. en los Pirineos centrales. *Ecología*(11), 235-254.
- Cayueta, L., Granzow, I., Albuquerque, F., & Golicher, D. S. (2012). Taxonstand: An R package for species names standardization in vegetation databases. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 1078-1083. doi:10.1111/j.2041-210X.2012.00232.x
- Chauchard, L., & Sbrancia, R. (2003). Modelos de crecimiento diamétrico para *Nothofagus obliqua*. *Bosque*, 24(3), 3-16. doi:10.4067/S0717-92002003000300001
- Chidumayo, E. N. (2019). Management implications of tree growth patterns in miombo woodlands of Zambia. *Forest Ecology and Management*, 436, 105-116. doi:10.1016/j.foreco.2019.01.018
- Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2012). Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe de Resultados 2004-2009. Jalisco, México: Coordinación General de Planeación e Información-Gerencia de Inventario Forestal y Geomática de la Comisión Nacional Forestal Recuperado de <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/infys/temas/resultados-2004-2009>
- Copenheaver, C. A., & Abrams, M. D. (2003). Dendroecology in young stands: case studies from jack pine in northern lower Michigan. *Forest Ecology and Management*, 182(1-3), 247-257. doi:10.1016/s0378-1127(03)00049-5
- Cruz-Johnson, P., Honeyman-Lucchini, P., Pezo-Correa, A., & Schulze del Canto, C. (2007). Análisis de crecimiento de árboles maduros de lenga (*Nothofagus pumilio*) en bosques de la XII Región, Chile. *Bosque*, 28(1), 18-24. doi:10.4067/S0717-92002007000100004
- Cusatis, A. C., Trazzi, P. A., Dobner Júnior, M., & Higa, A. R. (2013). Dendroecologia de *Cedrela fissilis* na Floresta Ombrófila Mista. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 33(75), 287-297. doi:10.4336/2013.pfb.33.75.474
- De Ridder, M., Van den Bulcke, J., Van Acker, J., & Beeckman, H. (2013). Tree-ring analysis of an African long-lived pioneer species as a tool for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 304, 417-426. doi:10.1016/j.foreco.2013.05.007
- Dobner, M., Nicoletti, M. F., & Arce, J. E. (2018). Influence of crown thinning on radial growth pattern of *Pinus taeda* in southern Brazil. *New Forests*. doi:10.1007/s11056-018-9669-x
- Druckenbrod, D. L., Pederson, N., Rentch, J., & Cook, E. R. (2013). A comparison of times series approaches for dendroecological reconstructions of past canopy disturbance events. *Forest Ecology and Management*, 302, 23-33. doi:10.1016/j.foreco.2013.03.040
- Dukpa, D., Cook, E. R., Krusic, P. J., Rai, P. B., Darabant, A., & Tshering, U. (2018). Applied dendroecology informs the sustainable management of Blue Pine forests in Bhutan. *Dendrochronologia*, 49, 89-93. doi:10.1016/j.dendro.2018.03.003
- Dussart, E., Chirino, C., Morici, E., & Peinetti, R. (2011). Reconstrucción del paisaje del caldenal pampeano en los últimos 250 años. *Quebracho*, 19((1,2)), 54-65. Recuperado de https://www.academia.edu/7324295/Historia_caldenal

- 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. doi:10.1016/j.foreco.2012.07.047
- Ferrero, M. E., Coirini, R. O., & Díaz, M. P. (2013). The effect of wood-boring beetles on the radial growth of *Prosopis flexuosa* DC. in the arid Chaco of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 88, 141-146. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.07.004
- Fritts, H. (1976). *Tree rings and climate*. London: Academic Press.
- Fritts, H., & Swetnam, T. W. (1989). Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*, 19, 111—188. doi:10.1016/S0065-2504(08)60158-0
- Fulé, P. Z., Covington, W., & Moore, M. (1997). Determining reference conditions for ecosystem management of southwestern ponderosa pine forests. *Ecological Applications*, 7(3), 895-908. doi:10.1890/1051-0761(1997)007[0895:DRCFEM]2.0.CO;2
- Fulé, P. Z., Villanueva-Díaz, J., & Ramos-Gómez, M. (2005). Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(2), 320-330. doi:10.1139/x04-173
- 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.
- Grabner, M., Wimmer, R., & Weichenberger, J. (2004). Reconstructing the history of log-drifting in the Reichraminger Hintergebirge, Austria. *Dendrochronologia*, 21(3), 131-137. doi:10.1078/1125.7865.00045
- Groenendijk, P., Bongers, F., & Zuidema, P. A. (2017). Using tree-ring data to improve timber-yield projections for African wet tropical forest tree species. *Forest Ecology and Management*, 400, 396-407. doi:10.1016/j.foreco.2017.05.054
- Gutiérrez-Ilabaca, A. (2002). Aplicación de una metodología dendroecológica en un rodal del Tipo Forestal Siempreverde en la Isla Grande de Chiloé (Comuna de Ancud, X Región de Los Lagos). Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, Chile.
- Hart, J. L., Clark, S. L., Torreano, S. J., & Buchanan, M. L. (2012). Composition, structure, and dendroecology of an old-growth *Quercus* forest on the tablelands of the Cumberland Plateau, USA. *Forest Ecology and Management*, 266, 11-24. doi:10.1016/j.foreco.2011.11.001
- Heiligmann, R. B. (2002). Developing a plan to care for your forest. Recuperado de <http://www.timbermanagement.org/timber-management/developing-a-plan-to-care-for-your-forest/>
- Helama, S., Salminen, H., Timonen, M., & Varmola, M. (2008). Dendroclimatological analysis of seeded and thinned Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands at the coniferous timberline. *New Forests*, 35(3), 267-284. doi:10.1007/s11056-007-9076-1
- Henry, J., & Swan, J. (1974). Reconstructing forest history from live and dead plant material - An approach to the study of forest succession in Southwest New Hampshire. *Ecology*, 55(4), 772-783. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/1934413?origin=JSTOR-pdf>
- Hernández López, A., Martínez Reyes, M., Vargas Hernández, J., Velázquez-Martínez, 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 Ciencia Forestal en México*, 21(80), 39-55.

- Hess, A. F., Ricken, P., & Ciarnoschi, L. D. (2018). Dendrocronología, Incremento E Manejo Florestal Em Floresta De Araucária-Sc. *Ciência Florestal*, 28(4). doi:10.5902/1980509835104
- Hevia, A., Álvarez-González, J. G., & Majada, J. (2016). Comparison of pruning effects on tree growth, productivity and dominance of two major timber conifer species. *Forest Ecology and Management*, 374, 82-92. doi:10.1016/j.foreco.2016.05.001
- Jäghagen, K., & Albrektson, A. (1996). Induced competition among scots pine seedlings and its effect on future timber quality. *New Forests*, 12, 163—174. doi:10.1007/BF00036627
- Kitzberger, T., Veblen, T., & Villalba, R. (2000). Métodos dendrocronológicos y sus aplicaciones en estudios de dinámica de bosques templados de Sudamérica. In F. Roig (Ed.), *Dendrocronología en América Latina* (pp. 17-78). Argentina: Ediunc.
- Klesse, S., Etzold, S., & Frank, D. (2016). Integrating tree-ring and inventory-based measurements of aboveground biomass growth: research opportunities and carbon cycle consequences from a large snow breakage event in the Swiss Alps. *European Journal of Forest Research*, 135(2), 297-311. doi:10.1007/s10342-015-0936-5
- Knüsel, S., Conedera, M., Rigling, A., Fonti, P., & Wunder, J. (2015). A tree-ring perspective on the invasion of *Ailanthus altissima* in protection forests. *Forest Ecology and Management*, 354, 334-343. doi:10.1016/j.foreco.2015.05.010
- Korjus, H. (2014). Challenges in Forest Management Planning. *Forest Research Open Access*, 3, 3. doi:10.4172/2168-9776.1000e110
- Ligot, G., Fayolle, A., Gourlet-Fleury, S., Dainou, K., Gillet, J.-F., De Ridder, M., . . . Doucet, J.-L. (2019). Growth determinants of timber species *Triplochiton scleroxylon* and implications for forest management in central Africa. *Forest Ecology and Management*, 437, 211-221. doi:10.1016/j.foreco.2019.01.042
- López, L., Villalba, R., & Bravo, F. (2013). Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. *Forest Ecology and Management*, 292, 49-55. doi:10.1016/j.foreco.2012.12.011
- López, L., Villalba, R., & Peña-Claros, M. (2012). Ritmos de crecimiento diamétrico en los bosques secos tropicales: aportes al manejo sostenible de los bosques de la provincia biogeográfica del Cerrado Boliviano. *Bosque*, 33(2), 21-22. doi:10.4067/s0717-92002012000200011
- Lucas-Borja, M. E., & Vacchiano, G. (2018). Interactions between climate, growth and seed production in Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) forests in Cuenca Mountains (Spain). *New Forests*, 49(3), 399-414. doi:10.1007/s11056-018-9626-8
- Martín-Benito, D., del Río, M., Heinrich, I., Helle, G., & Cañellas, I. (2010). Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 967-975. doi:10.1016/j.foreco.2009.12.001
- Maxwell, R. S., Taylor, A. H., Skinner, C. N., Safford, H. D., Isaacs, R. E., Airey, C., & Young, A. B. (2014). Landscape-scale modeling of reference period forest conditions and fire behavior on heavily logged lands. *Ecosphere*, 5(3). doi:10.1890/es13-00294.1
- Mbow, C., Chhin, S., Sambou, B., & Skole, D. (2013). Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa. *Dendrocronologia*, 31(1), 41-51. doi:10.1016/j.dendro.2012.06.001

- Metslaid, S., Stanturf, J. A., Hordo, M., Korjus, H., Laarmann, D., & Kiviste, A. (2016). Growth responses of Scots pine to climatic factors on reclaimed oil shale mined land. *Environ Sci Pollut Res Int*, 23(14), 13637-13652. doi:10.1007/s11356-015-5647-4
- Misson, L., Vincke, C., & Devillez, F. (2003). Frequency responses of radial growth series after different thinning intensities in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 51-63. doi:10.1016/s0378-1127(02)00324-9
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González Elizondo, M. D. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2). doi:10.21829/myb.2018.2421569
- Motta, R., & Nola, P. (1996). Fraying damages in the subalpine forest of Paneveggio (Trento, Italy): a dendroecological approach. *Forest Ecology and Management*, 88(1-2), 81-86. doi:10.1016/S0378-1127(96)03812-1
- Muñoz, F., Neira, A., & Cancino, J. (2010). Efecto del raleo en la densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Interciencia*, 35(8), 581-585. Recuperado de <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/581-c-MU%C3%91OZ-5.pdf>
- Natalini, F., Alejano, R., Vázquez-Piqué, J., Pardos, M., Calama, R., & Büntgen, U. (2016). Spatio temporal variability of stone pine (*Pinus pinea* L.) growth response to climate across the Iberian Peninsula. *Dendrochronologia*, 40, 72-84. doi:10.1016/j.dendro.2016.07.001
- Nock, C. A., Metcalfe, D. J., & Hietz, P. (2016). Examining the influences of site conditions and disturbance on rainforest structure through tree ring analyses in two *Araucariaceae* species. *Forest Ecology and Management*, 366, 65-72. doi:10.1016/j.foreco.2016.02.008
- Oddi, F., & Ghermandi, L. (2015). Dendroecological potential of shrubs for reconstructing fire history at landscape scale in Mediterranean-type climate grasslands: The case of *Fabiana imbricate*. *Dendrochronologia*, 33, 16-24. doi:10.1016/j.dendro.2014.11.002
- Olano, J. M., Rozas, V., Bartolomé, D., & Sanz, D. (2008). Effects of changes in traditional management on height and radial growth patterns in a *Juniperus thurifera* L. woodland. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 506-512. doi:10.1016/j.foreco.2007.09.015
- Oliver, C. D., & Larson, B. C. (1996). *Forest Stand Dynamics*. New York: Wiley.
- Oliver, C. D., & Stephens, E. P. (1977). Reconstruction of a Mixed-Species Forest in Central New England. *Ecology*, 58(3), 562-572. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/1939005>
- Paritsis, J., & Veblen, T. T. (2011). Dendroecological analysis of defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* and their relation to climate variability in the Patagonian Andes. *Global Change Biology*, 17(1), 239-253. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02255.x
- Pérez-de-Lis, G., García-González, I., Rozas, V., & Arévalo, J. R. (2011). Effects of thinning intensity on radial growth patterns and temperature sensitivity in *Pinus canariensis* afforestations on Tenerife Island, Spain. *Annals of Forest Science*, 68(6), 1093-1104. doi:10.1007/s13595-011-0125-8
- Pickett, S. (1989). Space-for-Time Substitution as an Alternative to Long-Term Studies. *Long term studies in ecology*, 110-135. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-7358-6_5
- Powers, M. D., Pregitzer, K. S., Palik, B. J., & Webster, C. R. (2010). Wood 13C, 18O and radial growth responses of residual red pine to variable retention harvesting. *Tree Physiology*, 30(3), 326-334. doi:10.1093/treephys/tpp119

- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., & Rotzer, T. (2014). Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature*, 5, 4967. doi:10.1038/ncomms5967
- Rasmussen, K. K. (2007). Dendroecological analysis of a rare sub-canopy tree: Effects of climate, latitude, habitat conditions and forest history. *Dendrochronologia*, 25(1), 3-17. doi:10.1016/j.dendro.2007.01.002
- Robson, J. R. M., Conciatori, F., Tardif, J. C., & Knowles, K. (2015). Tree-ring response of jack pine and scots pine to budworm defoliation in central Canada. *Forest Ecology and Management*, 347, 83-95. doi:10.1016/j.foreco.2015.03.018
- Romero-Tovar, A. (2006). Influencia del muérdago enano (*Arcetobium* spp.) en densidad básica, ancho de anillo, porcentaje de madera temprana y madera tardía, en dos especies de pino de Singuilican, Hidalgo. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Rozas, V. (2003). Regeneration patterns, dendroecology, and forest-use history in an old-growth beech-oak lowland forest in Northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 182(1-3), 175-194. doi:10.1016/s0378-1127(03)00070-7
- Rozas, V. (2004). A dendroecological reconstruction of age structure and past management in an old-growth pollarded parkland in northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 195(1-2), 205-219. doi:10.1016/j.foreco.2004.02.058
- Rozas, V., & Olano, J. M. (2013). Environmental heterogeneity and neighbourhood interference modulate the individual response of *Juniperus thurifera* tree-ring growth to climate. *Dendrochronologia*, 31(2), 105-113. doi:10.1016/j.dendro.2012.09.001
- Rozendaal, D., & Zuidema, P. A. (2011). Dendroecology in the tropics: a review. *Trees*, 25, 3-16. doi:10.1007/s00468-010-0480-3
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., García-Martín, A., Hernández, R., & de la Riva, J. (2014). Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth. *Forest Ecology and Management*, 320, 171-181. doi:10.1016/j.foreco.2014.03.008
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., Linares, J. C., Hernández, R., Oliva, J., Gazol, A., . . . de la Riva, J. (2015). Role of biotic factors and droughts in the forest decline: contributions from dendroecology. *Ecosistemas*, 24(2), 15-23. doi:10.7818/ecos.2015.24-2.03
- Santilli, M., Pelfini, M., Citterio, M., & Turri, S. (2005). Landscape history in the subalpine karst region of Moncodeno (Lombardy Prealps, Northern Italy). *Dendrochronologia*, 23(1), 19-27. doi:10.1016/j.dendro.2005.07.001
- Schöngart, J. (2008). Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. *Forest Ecology and Management*, 256(1-2), 46-58. doi:10.1016/j.foreco.2008.03.037
- Schöngart, J., Bräuning, A., Barbosa, A. C. M. C., Lisi, C. S., & de Oliveira, J. M. (2017). Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. In *Dendroecology* (pp. 35-73).
- Schweingruber, F. H. (1996). *Tree rings and environment dendroecology*. Switzerland: Haupt.
- Schweingruber, F. H., Börner, A., & Schulze, E. D. (2008). *Atlas of woody plant stems. Evolution, structure, and environmental modifications*. Berlin: Springer-Verlag.

- Stan, A. B., & Daniels, L. D. (2010). Calibrating the radial-growth averaging method for detecting releases in old-growth forests of coastal British Columbia, Canada. *Dendrochronologia*, 28(3), 135-147. doi:10.1016/j.dendro.2009.10.003
- Stojanović, M., Sánchez-Salguero, R., Levanič, T., Szatniewska, J., Pokorný, R., & Linares, J. C. (2017). Forecasting tree growth in coppiced and high forests in the Czech Republic. The legacy of management drives the coming *Quercus petraea* climate responses. *Forest Ecology and Management*, 405, 56-68. doi:10.1016/j.foreco.2017.09.021
- Tang, X., Lu, Y., Fehrmann, L., Forrester, D. I., Guisasaola-Rodríguez, R., Pérez-Cruzado, C., & Kleinn, C. (2016). Estimation of stand-level aboveground biomass dynamics using tree ring analysis in a Chinese fir plantation in Shitai County, Anhui Province, China. *New Forests*, 47(2), 319-332. doi:10.1007/s11056-015-9518-0
- Toïgo, M., Vallet, P., Tuilleras, V., Lebourgeois, F., Rozenberg, P., Perret, S., . . . Perot, T. (2015). Species mixture increases the effect of drought on tree ring density, but not on ring width, in *Quercus petraea*–*Pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management*, 345, 73-82. doi:10.1016/j.foreco.2015.02.019
- Trotsiuk, V., Pederson, N., Druckenbrod, D. L., Orwig, D. A., Bishop, D. A., Barker-Plotkin, A., . . . Martin-Benito, D. (2018). Testing the efficacy of tree-ring methods for detecting past disturbances. *Forest Ecology and Management*, 425, 59-67. doi:10.1016/j.foreco.2018.05.045
- 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*, XXVI(1). doi:10.5154/r.rchscfa.2018.09.064
- Vanoni, M., Cailleret, M., Hülsmann, L., Bugmann, H., & Bigler, C. (2019). How do tree mortality models from combined tree-ring and inventory data affect projections of forest succession? *Forest Ecology and Management*, 433, 606-617. doi:10.1016/j.foreco.2018.11.042
- Vargas-Larreta, B. (2013). Manual de mejores prácticas de manejo forestal para la conservación de la biodiversidad en ecosistemas templados de la región norte de México. Zapopan, México: Comisión Nacional Forestal.
- Vernon, M. J., Sherriff, R. L., van Mantgem, P., & Kane, J. M. (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. doi:10.1016/j.foreco.2018.03.043
- Viguera-Moreno, B. (2012). Análisis dendroecológico de las tendencias de crecimiento de árboles muertos y su aplicabilidad para la detección del declive de masas forestales como respuesta al cambio global. Tesis de Maestría, Universidad de Valladolid, España.
- Villagra, P. E., Boninsegna, J. A., Alvarez, J. A., Cony, M., Cesca, E., & Villalba, R. (2005). Dendroecology of *Prosopis flexuosa* woodlands in the Monte desert: Implications for their management. *Dendrochronologia*, 22(3), 209-213. doi:10.1016/j.dendro.2005.05.005
- von Gadow, K., Sánchez Orois, S., & Aguirre Calderón, Ó. A. (2004). Manejo forestal con bases científicas. *Madera y Bosques*, 3. Recuperado de <http://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/viewFile/1271/1442>
- Wang, X., Stenström, E., Boberg, J., Ols, C., & Drobyshev, I. (2017). Outbreaks of *Gremmeniella abietina* cause considerable decline in stem growth of surviving Scots pine trees. *Dendrochronologia*, 44, 39-47. doi:10.1016/j.dendro.2017.03.006

- Winck, R. Á., Fassola, H. E., & Área, M. C. (2015). Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de *Pinus taeda*. *Maderas. Ciencia y tecnología*(ahead), 0-0. doi:10.4067/s0718-221x2015005000037
- Xiao, S., Xiao, H., Peng, X., Wang, W., Chen, X., & Tian, Q. (2015). Dendroecological assessment of Korshinsk peashrub (*Caragana korshinskii* Kom.) from the perspective of interactions among growth, climate, and topography in the western Loess Plateau, China. *Dendrochronologia*, 33, 61-68. doi:10.1016/j.dendro.2015.01.001
- Xu, K., Wang, X., Liang, P., Wu, Y., An, H., Sun, H., . . . Fan, D. (2019). A new tree-ring sampling method to estimate forest productivity and its temporal variation accurately in natural forests. *Forest Ecology and Management*, 433, 217-227. doi:10.1016/j.foreco.2018.10.066
- Zeller, L., Ammer, C., Annighöfer, P., Biber, P., Marshall, J., Schütze, G., . . . Pretzsch, H. (2017). Tree ring wood density of Scots pine and European beech lower in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*, 400, 363-374. doi:10.1016/j.foreco.2017.06.018
- Zhang, Q., Alfaro, R., & Hebda, R. (1999). Dendroecological studies of tree growth, climate and spruce beetle outbreaks in Central British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 121(3), 215-225. doi:10.1016/S0378-1127(98)00552-0
- Zhang, Y., Drobyshev, I., Gao, L., Zhao, X., & Bergeron, Y. (2014). Disturbance and regeneration dynamics of a mixed Korean pine dominated forest on Changbai Mountain, North-Eastern China. *Dendrochronologia*, 32(1), 21-31. doi:10.1016/j.dendro.2013.06.003

CAPITULO II. IMPACTO DE LA EXTRACCIÓN SELECTIVA SOBRE EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES REMANENTES DE UN BOSQUE DE *Pinus hartwegii*²

Impact of selective extraction on the growth of remnant trees of a *Pinus hartwegii* forest

2.1 RESUMEN

Los bosques de *Pinus hartwegii* son susceptibles al ataque de plagas forestales, por ello las intervenciones de saneamiento en los rodales de esta especie deben de ser analizadas. El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de las cortas de saneamiento sobre el crecimiento radial del arbolado residual, en rodales monoespecíficos de *Pinus hartwegii* del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Se establecieron diez sitios de medición de árboles remanentes y tocones en rodales intervenidos durante 2016 (1000 m²) en las exposiciones Oeste y Este del volcán. Se consideró el período de los años 2013-2015 como previo al saneamiento, y 2016-2018 como posterior al saneamiento. Se analizó el patrón de distribución, la estructura horizontal y vertical. Se calcularon dos índices de densidad y dos índices de competencia. Se colectaron núcleos de madera en todos los individuos y se midieron las anchuras de los anillos de crecimiento mediante técnicas dendrocronológicas. Se estandarizó el crecimiento mediante series de incremento en área basal (IAB). El crecimiento de los árboles remanentes ubicados en la periferia de los tocones fue significativamente diferente entre las exposiciones. El IAB aumentó 28.96% después del saneamiento en la exposición Oeste, mientras que en la exposición Este el IAB aumentó 120.18%. Los árboles remanentes ubicados entre los 2.5 a 5 m con respecto al tocón tuvieron mayores IAB en ambas exposiciones. Los bosques de *Pinus hartwegii* responden de manera favorable a las cortas de saneamiento con un aumento estadísticamente significativo en el IAB.

Palabras clave: anillos de crecimiento, dendroecología, incremento de área basal, índice de competencia, patrón de distribución.

² Este Capítulo fue sometido para su publicación en la Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente

2.2 ABSTRACT

Pinus hartwegii forests are susceptible to the attack of forest pests, so sanitation interventions in the stands of this species must be analyzed. The objective of this work was to evaluate the effects of sanitation cuts on the radial growth of residual trees, in monospecific stands of *Pinus hartwegii* of the Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Ten measuring sites of remnant trees and stumps were established in stands operated during 2016 (1000 m²) in the West and East slopes of the volcano. The period 2013-2015 was considered as prior to sanitation, and 2016-2018 as after sanitation. The distribution pattern, horizontal and vertical structure were analyzed. Two density indices and two proficiency indices were calculated. Wood cores were collected in all individuals and the widths of the growth rings were measured by dendrochronological techniques. Growth was standardized by series of basal area increment (BAI). The growth of the remaining trees located on the periphery of the stumps was significantly different between the exposures. The BAI increased 28.96% after sanitation in the West exposure, while in the East exposure the BAI increased 120.18%. The remaining trees located between 2.5 and 5 m with respect to the stump had higher BAI in both exposures. *Pinus hartwegii* forests respond positively to sanitation cuts with a statistically significant increase in IAB.

Key words: basal area increment, competition index, dendroecology, growth rings, selection cut.

2.3 INTRODUCCIÓN

Pinus hartwegii Lindl. es una especie clave en México, que constituye el límite de vegetación arbórea en regiones montañosas del Centro y Noreste mexicano, y hasta Guatemala. La importancia ecológica de estas masas forestales está relacionada con la producción de biomasa (Rojas-García & Villers Ruiz, 2008) y los servicios ambientales asociados de los cuales se benefician los grandes asentamientos humanos del centro de México. La especie ha sido ampliamente estudiada debido a su potencial dendroclimático (Villanueva Díaz et al., 2015) y de reconstrucción de incendios, así como por el posible impacto del calentamiento global en el reclutamiento de especímenes arriba de su límite arbóreo (Ricker, Gutiérrez-García, & Daly, 2007).

La dinámica de crecimiento de los ecosistemas forestales está afectada por un conjunto de factores ambientales y bióticos que incluye al clima, infestaciones de insectos, incendios, características del suelo, y la competencia tanto intraespecífica como interespecífica (Navarrete Espinoza, Cárcamo Ojeda, & Novoa Barra, 2008). Por ejemplo, las plagas y enfermedades forestales reducen el crecimiento radial de la madera en las especies forestales (Sangüesa-Barreda et al., 2015).

El bosque de *Pinus hartwegii* se desarrolla en las laderas del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) desde los 3,300 hasta los 4,375 m de altitud, a partir de los 3,700 m se presenta como un bosque monoespecífico (Rojas-García, Fredericksen, Vazquez Lozada, & Endara Agramont, 2019). Este bosque está amenazado debido a la presencia *Dendroctonus adjunctus* Blandford (1897) y *Arceuthobium vaginatum* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) J. Presl). La administración del APFFNT realizó cortas de saneamiento forestal en éste bosque durante 2016.

La competencia es un factor que influencia el crecimiento de los árboles desde etapas iniciales de desarrollo, donde es determinante para la supervivencia del individuo debido al espacio de crecimiento que necesita y la adaptación que presenten (Quicaño Silvano, 2017). Como medida del espacio disponible para los árboles en pie se han desarrollado los llamados índices de densidad e índices de competencia. La diferencia entre ambos grupos es el nivel de detalle, pues mientras los índices de densidad se refieren al nivel del rodal, los de la competencia lo hacen al nivel del árbol individual.

Ambos grupos de índices determinan el grado de espacio disponible independientemente de la edad del rodal o de la calidad de la estación, lo anterior permite la comparación de densidades de masas que crecen en diferentes calidades de estación y edades del arbolado (Bravo, Montero, & del Río, 1997).

Los árboles responden a factores, como la competencia, con los correspondientes cambios en la anchura de sus anillos de crecimiento anuales (Fritts & Swetnam, 1989). La datación de los anillos proporciona un método relativamente rápido y altamente confiable para cuantificar el crecimiento radial de los árboles (Bogino & Villalba, 2008). El uso de métodos dendroecológicos permite caracterizar de forma más precisa el crecimiento en especies de interés comercial o de conservación, y el posterior diseño de estrategias de restauración.

La presente investigación plantea la hipótesis de que, el saneamiento del bosque de *Pinus hartwegii* en el APFFNT realizado en 2016, redujo la competencia entre los árboles, y por consecuencia se incrementan las anchuras de anillos de crecimiento de los árboles circundantes al tocón del individuo removido.

2.4 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue evaluar los efectos de las cortas de saneamiento sobre el crecimiento radial del arbolado residual, en rodales monoespecíficos de *Pinus hartwegii* que fueron saneados durante 2016. Asimismo, los objetivos particulares fueron: (1) caracterizar los cambios en estructuras horizontal y vertical debidos a la intervención; (2) calcular los índices de competencia entre los árboles de los rodales intervenidos que tienen efecto sobre el crecimiento radial de los árboles remanentes; (3) identificar la distancia entre el árbol saneado y los vecinos remanentes, a partir de la que se presenta un efecto en el crecimiento post-intervención.

2.5 MATERIALES Y MÉTODOS

2.5.1 Área de estudio

El APFFNT se localiza en el Estado de México, y comprende el volcán Nevado de Toluca, desde la cota de los 3,000 m hasta la cima a 4,680 m. El área natural protegida se localiza en la porción centro Sur del Estado de México y tiene una superficie de 53,590 ha.

Fue decretado Parque Nacional en 1936 con el objetivo de proteger la belleza escénica y la importancia hidrológica del macizo montañoso. El 1 de octubre de 2013 se publicó el decreto que reforma y otorga la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna, en el Diario Oficial de la Federación (SEMARNAT, 2013a).

El tipo de suelo andosol predomina en cerca del 90% del volcán, así como feozem, regosol, cambisol, fluvisol y leptosol, producto de la presencia de rocas ígneas extrusivas del terciario-cuaternario (Sotelo-Ruiz, González Hernández, Cruz Bello, Moreno Sánchez, & Cruz Cárdenas, 2011). El desarrollo de la estructura del suelo es frágil, la textura de media a gruesa y la susceptibilidad a la erosión es alta lo que, combinado con la deforestación, cambios de uso de suelo, sobrepastoreo, fuertes pendientes y lluvias de alta intensidad resulta en pérdida de suelo en el corto plazo (Sánchez-Jasso, Aguilar-Miguel, Medina-Castro, & Sierra-Domínguez, 2013).

El Nevado de Toluca presenta características meteorológicas y climáticas particulares, de manera general, el costado Norte es más frío que el Sur, además de un gradiente térmico vertical. El clima frío con régimen de lluvias es de verano (*E(T)H wig*), se presenta en el volcán Nevado de Toluca por encima de los 3,700 m de altitud (García, 1981).

2.5.2 Inventario para medición de extracción forestal

Se establecieron 10 sitios de medición de extracción forestal debido al saneamiento de rodales de *Pinus hartwegii* durante el año 2016. Los sitios son de forma circular con una superficie de 1,000m² (17.84 m de radio). Cinco sitios se ubicaron en la localidad Santa María del Monte situada en el Municipio de Zinacantepec a los 3,880 m de la exposición Oeste del cuerpo volcánico. En la exposición Este se establecieron cinco sitios en la localidad Zaragoza de Guadalupe del Municipio de Calimaya en la misma cota altitudinal (**Figura 2.1**).

La elección de los sitios obedeció a que existiera evidencia de extracción forestal, la presencia de tocones y árboles remanentes cercanos. En cada sitio de muestreo se registraron las coordenadas UTM del punto central y la altitud (m) con un GPS Rino® 650 Garmin. Se registró la pendiente y orientación de ladera (°) con una brújula-clinómetro Tandem Suunto.

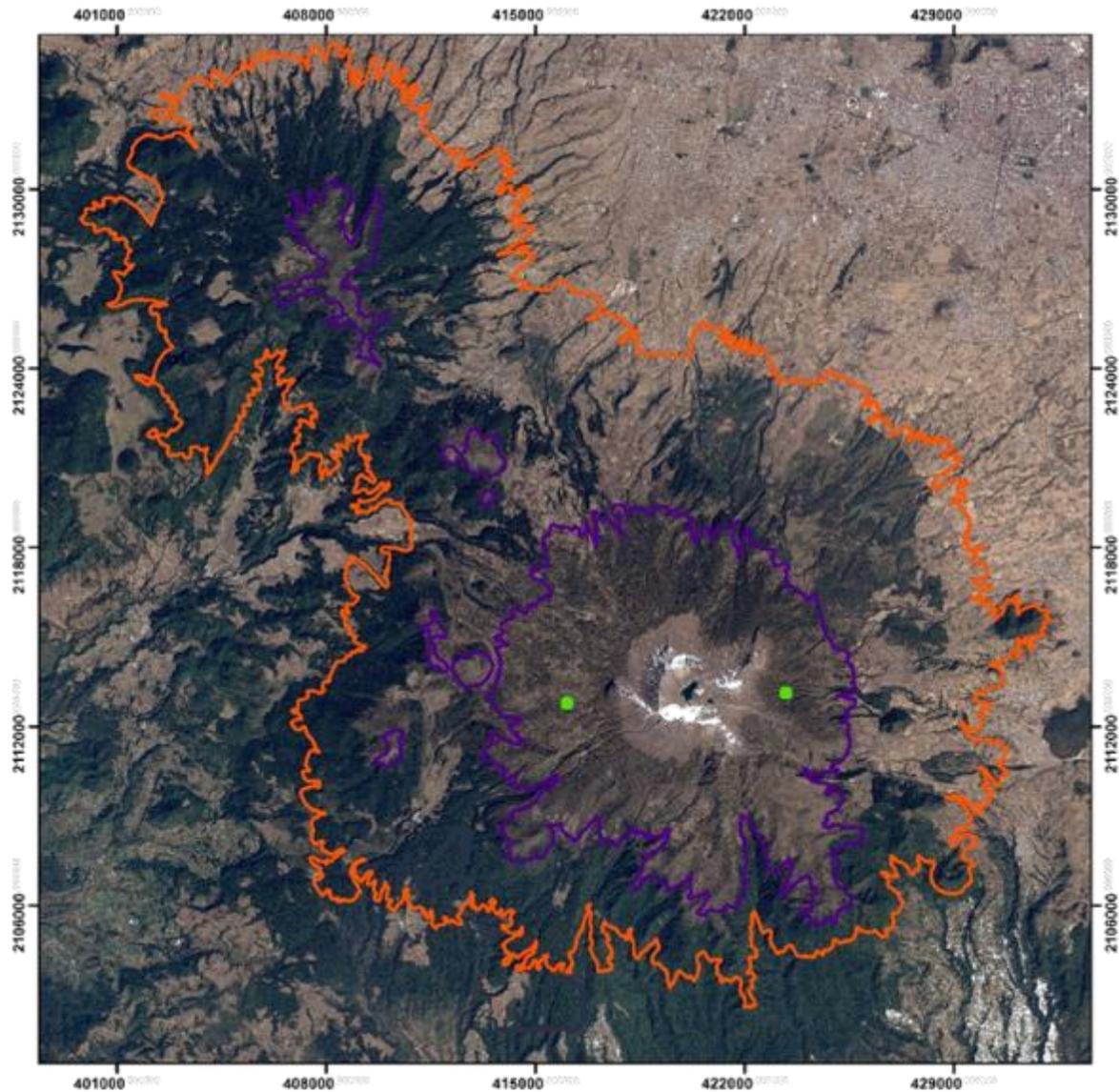


Figura 2.1. Localización de los sitios de medición de extracción forestal

Se contabilizó el repoblado en un radio de 2 m, a partir del centro del sitio de muestreo (superficie 12.56 m²). Se diferenciaron las plántulas pequeñas con una altura menor a 10 cm, las plántulas mayores que 10 cm y menores que 30 cm de altura, y los brinzales mayores que 30 cm y menores que 150 cm de altura.

Los valores de repoblado por sitio se obtuvieron al sumar los valores de cada categoría y se extrapoló a valores por hectárea (ha⁻¹) (CONAFOR, 2012; Padmakumar et al., 2018). El conteo de los árboles se realizó a partir del centro del sitio hacia afuera, se inició en la exposición Norte y continuó en dirección de las manecillas del reloj hasta cubrir los 360° del área.

La información registrada fue número de árbol, nombre científico, condición (vivo, muerto o tocón). Los diámetros se midieron con una cinta diamétrica (Forestry Suppliers), se registró el DAP (cm) de los individuos mayores a 7.5 cm y el diámetro del tocón a 0.30 m del suelo (dt) (cm) de todos los árboles. La altura total de todos los árboles (HT) (m), se estimó con un altímetro Haga (W. Germany). Los diámetros de copa mayor (C_1) (m), diámetro de copa menor (C_2) (m), la altura del tocón del suelo al corte (t) (m), y distancia del individuo al punto central del sitio (m) se midieron con cinta métrica. El azimut de la ubicación del árbol con respecto al norte geográfico ($^\circ$) se midió con una brújula-clinómetro Tandem Suunto.

2.5.3 Análisis estructural

Estructura horizontal

Se analizó el patrón de distribución horizontal 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 ArcGIS (Mitchell, 2005). La estructura horizontal se determinó agrupando a los árboles por clases de diámetro en intervalos de 5 cm (7.5–12.4, 12.5–17.4, 17.5–22.4, etc.) para representar gráficamente su distribución.

Estructura vertical

La estructura vertical se caracterizó al comparar las alturas de todos los individuos entre las clases de diámetro utilizando un análisis de varianza de una vía. Los estratos del dosel se identificaron por diferencias significativas en las alturas entre las clases de diámetro (Endara-Agramont, Maass, Bernal, Hernández, & Fredericksen, 2012).

Se elaboró un perfil de 35.7 m, que incluye la longitud completa de cada uno de los sitios de muestreo y 4 m de anchura (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). Se representaron las alturas de los árboles en una escala vertical proporcional con la escala horizontal.

Área basal

El área basal (AB) es una medida del espacio horizontal ocupado, es considerada para estimar el volumen de especies arbóreas o arbustivas. Por definición, el AB es la superficie de una sección transversal del tallo o tronco de un árbol a una determinada altura del suelo.

En árboles, este parámetro se obtiene a partir del DAP (Mostacedo & Fredericksen, 2000):

$$AB = \pi * \left(\frac{DAP^2}{4}\right) \quad [1]$$

donde AB = área basal (m²), $\pi = 3.1416$, DAP² (m).

Para el caso de los tocones, se utilizó la ecuación desarrollada por (Corral-Rivas, Barrio-Anta, Aguirre-Calderon, & Dieguez-Aranda, 2007), para estimar el DAP de los pinos en función de las medidas del diámetro del tocón (dt) (cm):

$$DAP = 1.721 * (dt^{0.8494}) \quad [2]$$

Una vez que se conoció el DAP (cm), se determinó el AB (m²). Los valores de AB por sitio de muestreo se obtuvieron al sumar los valores de cada árbol individual en los sitios de muestreo, y se extrapoló a valores por hectárea (m²ha⁻¹) (Padmakumar et al., 2018).

2.5.4 Análisis de competencia

La competencia puede definirse como el efecto negativo que un árbol ejerce sobre otros árboles, debido al consumo o al control que ejerce sobre el acceso a un determinado recurso (luz, agua o nutrimentos) de disponibilidad limitada (Burkhart & Tomé, 2012).

El efecto de la competencia fue analizado mediante dos índices de densidad del rodal (independientes de la distancia entre árboles) y dos índices de competencia dependientes de la distancia entre árboles (**Cuadro 2.1**). Para efectuar el cálculo de índices de competencia se consideró como árbol objetivo el tocón más cercano al centro del sitio de muestreo. A partir del tocón se consideraron todos los árboles en un radio de 7.5 m, con la intención de que no se contabilizaran dos veces el mismo individuo (que pudiera competir con otros árboles).

Cuadro 2.1. Índices utilizados para evaluar competencia

Índice	Expresión matemática	Clasificación
Índice de densidad de rodales de Reineke (1933)	$10^{(\log N + 1.691 * \log Dg - 1.691)}$	[3]
Factor de competencia de copas (Krajicek, Brinkman, & Gingrich, 1961)	$\frac{\pi}{4} * \sum_{i=1}^{i=n} dc_i^2 * \frac{100}{S}$	[4]
Hegyí (1974)	$\sum_{i \neq j} \frac{d_j}{Dist_{ij} * d_i}$	[5]
Martin and Ek (1984)	$\sum_{i \neq j} \frac{d_j}{d_i} * \exp\left(\frac{16 * Dist_{ij}}{d_i + d_j}\right)$	[6]

Donde: N = número de árboles por sitio; S = superficie del sitio (m^2); d_i = diámetro normal del árbol objetivo (cm); \log = logaritmo de base 10; dc_i = diámetro de copa en proyección horizontal del árbol objetivo (m); d_j = diámetro normal del árbol competidor (cm); d_i = diámetro normal del árbol objetivo (cm); $Dist_{ij}$ = distancia en proyección horizontal entre el árbol objetivo y el árbol competidor (m)

2.5.5 Muestreo destructivo de árboles individuales

Se colectaron núcleos de madera a la altura del DAP de todos los árboles remanentes al interior del sitio de muestreo con el uso de un taladro de Pressler (Abrams & Hock, 2006) (**Figura 2.2**). Asimismo, se colectaron núcleos de madera en los tocones, donde la estructura de la madera lo permitió a 0.30 m de altura a partir del suelo. Las muestras se almacenaron en popotes perforados para evitar la proliferación de hongos (Arreola-Ortiz, González-Elizondo, & Návar-Cháidez, 2010). Los núcleos de madera se montaron con pegamento sobre guías de madera y se sujetaron con cinta adhesiva para evitar su torcedura durante el secado al aire libre por aproximadamente tres días. Los núcleos de madera fueron alineados de modo que las traqueidas de xilema quedaran completamente verticales.

Posteriormente, se procesaron con una lijadora orbital del grano mayor al menor (lija de papel con medidas de grano 150, 360, 600, y 1500) para poder observar de manera clara los anillos de crecimiento (Stokes & Smiley, 1968).



Figura 2.2. Extracción de núcleos de crecimiento de árboles vivos y tocones

2.5.6 Fechado y medición de la anchura de anillos de crecimiento

Se realizaron cronologías por medio de las técnicas tradicionales en dendrocronología (Stokes & Smiley, 1968). Se cuantificaron los anillos de crecimiento mediante la observación a través de un estéreo-microscopio. Se identificó el año de formación del anillo más externo del núcleo según su fecha de muestreo, en relación con la temporada de crecimiento y el grado de desarrollo del anillo (Schulman, 1956).

Se marcaron con puntos de lápiz de grafito cada década (un punto), cada 50 años (dos puntos) y cada siglo (tres puntos), para facilitar su identificación al momento de realizar la medición. El conteo de los anillos se realizó mediante el método de la lista para el fechado-cruzado de núcleos de madera para árboles vivos (Yamaguchi, 1991). Éste método permite identificar patrones de crecimiento, asignar fechas tentativas a cada anillo de crecimiento, detectar ausencia de anillos y la presencia de falsos anillos (Fritts, 1976).

Las muestras de madera se digitalizaron con un scanner de alta resolución (LA2400, Scanner Calibrated for Image Analysis with Regents Instruments Software). Los anillos de crecimiento se midieron con el programa WinDendro 2016b (Regent Instruments Canada, 2016). El programa genera una representación gráfica de las amplitudes de los anillos llamada ruta.

Los acercamientos que el programa realiza, permiten reducir el riesgo de contar anillos dobles u omitir el conteo de anillos ausentes (Santilli, Pelfini, Citterio, & Turri, 2005). Posteriormente se realizó la verificación del fechado con el programa COFECHA (Holmes, 1983).

2.5.7 Estandarización de crecimiento mediante el incremento en área basal

Se derivaron series de incrementos anuales de área basal (IAB) a partir de la anchura del anillo sin procesar, asumiendo anillos de árboles distribuidos concéntricamente. Para generar estas series de crecimiento se eliminaron los árboles menores a 15 años, debido a que la tendencia de crecimiento juvenil no permite hacer el análisis.

Se utilizó el IAB con la intención de hacer comparables las mediciones entre árboles al interior del sitio de muestreo (Martín-Benito, del Río, Heinrich, Helle, & Cañellas, 2010):

$$IAB = \pi (R_n^2 - R_{n-1}^2) \quad [7]$$

donde R = radio del árbol y n = año de formación del anillo.

Para conocer si el saneamiento tuvo un impacto en el crecimiento posterior, se efectuó una comparación en un período igual e inmediato anterior (Trujillo-Martínez, Reyes-Hernández, Gómez-Guerrero, & Borja-de la Rosa, 2020). Para ello, se consideró el período de los años 2013-2015 como previo al saneamiento, y 2016-2018 como posterior al saneamiento.

Para el análisis clima-crecimiento, se obtuvo la información de precipitación y temperaturas máxima y mínima a nivel diario, a una resolución espacial de 250 m para cada sitio de muestreo. Con base en el análisis y la una malla climática conformada por 3,300 estaciones meteorológicas operadas por la Comisión Nacional del Agua, mediante una interpolación bilineal realizada en Python MR y SQLite MR 3.0 (Salas-Aguilar & Paz-Pellat, 2018). El uso de los promedios de variables climáticas permite reducir el ruido de baja amplitud e incrementar la relación entre el crecimiento de los árboles y el clima (Blasing, Duvick, & West, 1981). La relación entre el clima y IAB se evaluó a través de un análisis de correlación de Pearson (Gutiérrez García & Ricker, 2019). Se realizaron análisis de varianza para conocer si existía diferencias significativas en los IAB entre exposiciones, entre períodos antes y después del saneamiento, y si el IAB era distinto de conformidad con la distancia del árbol remanente.

2.6 RESULTADOS

El bosque de *Pinus hartwegii* del APFFNT está amenazado por plagas y enfermedades, debido a ello, durante 2016 se efectuaron trabajos de saneamiento en algunos municipios circundantes del cuerpo volcánico. En estos rodales se establecieron diez sitios de muestreo para estimar la extracción forestal en dos exposiciones del volcán. Las características dendrométricas resultado del análisis de dicha comunidad se presentan en el **Cuadro 2.2**.

Los sitios ubicados en la exposición Oeste presentaron un porcentaje de extracción de 38.5 % de AB, con respecto a la exposición Este que tuvo un 19.8 % de AB extraída.

Cuadro 2.2. Principales variables dendrométricas de los sitios de muestreo para estimar extracción forestal

Exposición Variable	Oeste		Este	
	2016	2018	2016	2018
N	246 ± 32.95	184 ± 32.80	196 ± 16.00	148 ± 15.29
AB	34.54 ± 5.42	21.24 ± 4.06	34.94 ± 2.29	28.03 ± 1.66
Dg	43.14 ± 4.31	39.75 ± 4.98	47.88 ± 1.65	49.55 ± 1.56
HT	16.79 ± 2.51	14.87 ± 2.82	19.59 ± 1.15	19.66 ± 1.45
Repoblado				
Plántulas pequeñas		159.24 ± 12.62		7802.55 ± 44.38
Plántulas		0		5414.01 ± 50.45
Brinzales		477.71 ± 14.57		0

Valor promedio ± error estándar

Donde: N = número de árboles ha⁻¹; AB = área basal (m² ha⁻¹); Dg = diámetro medio cuadrático (cm); HT = altura total (m); V= volumen m³ ha⁻¹. Plántulas pequeñas <10 cm de HT ha⁻¹; plántulas ≥ 10 <30 cm de HT ha⁻¹; brinzales ≥ 30 <150 cm de HT ha⁻¹.

2.6.1 Análisis estructural

Estructura horizontal

El patrón de distribución de los árboles previo al saneamiento en ambas exposiciones, 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 ($p < 0.001$).

Después de la intervención, el patrón de distribución de los árboles en ambas exposiciones, fue mayor que la distribución hipotética aleatoria, por ello el índice ANN fue mayor que 1, y se considera que los árboles están dispersos ($p < 0.001$) (**Cuadro 2.3**). La extracción forestal modificó el patrón de distribución, de agrupada a dispersa.

Cuadro 2.3. Patrón de distribución de los sitios de muestreo antes y después de la intervención de saneamiento

Exposición	Oeste		Este	
	2016	2018	2016	2018
Índice ANN	0.998 ± 0.07	1.177 ± 0.16	0.961 ± 0.13	1.191 ± 0.07
Patrón de distribución	Agrupada	Dispersa	Agrupada	Dispersa

Valor promedio \pm error estándar

Donde ANN= vecino más cercano promedio, por sus siglas en inglés Average Nearest Neighbor.

En la **Figura 2.3** se esquematiza la distribución diamétrica en intervalos de clase de 5 cm, donde las barras en números positivos representan a los árboles vivos y las barras en números negativos representan los diámetros que tenían los árboles que fueron removidos por el saneamiento.

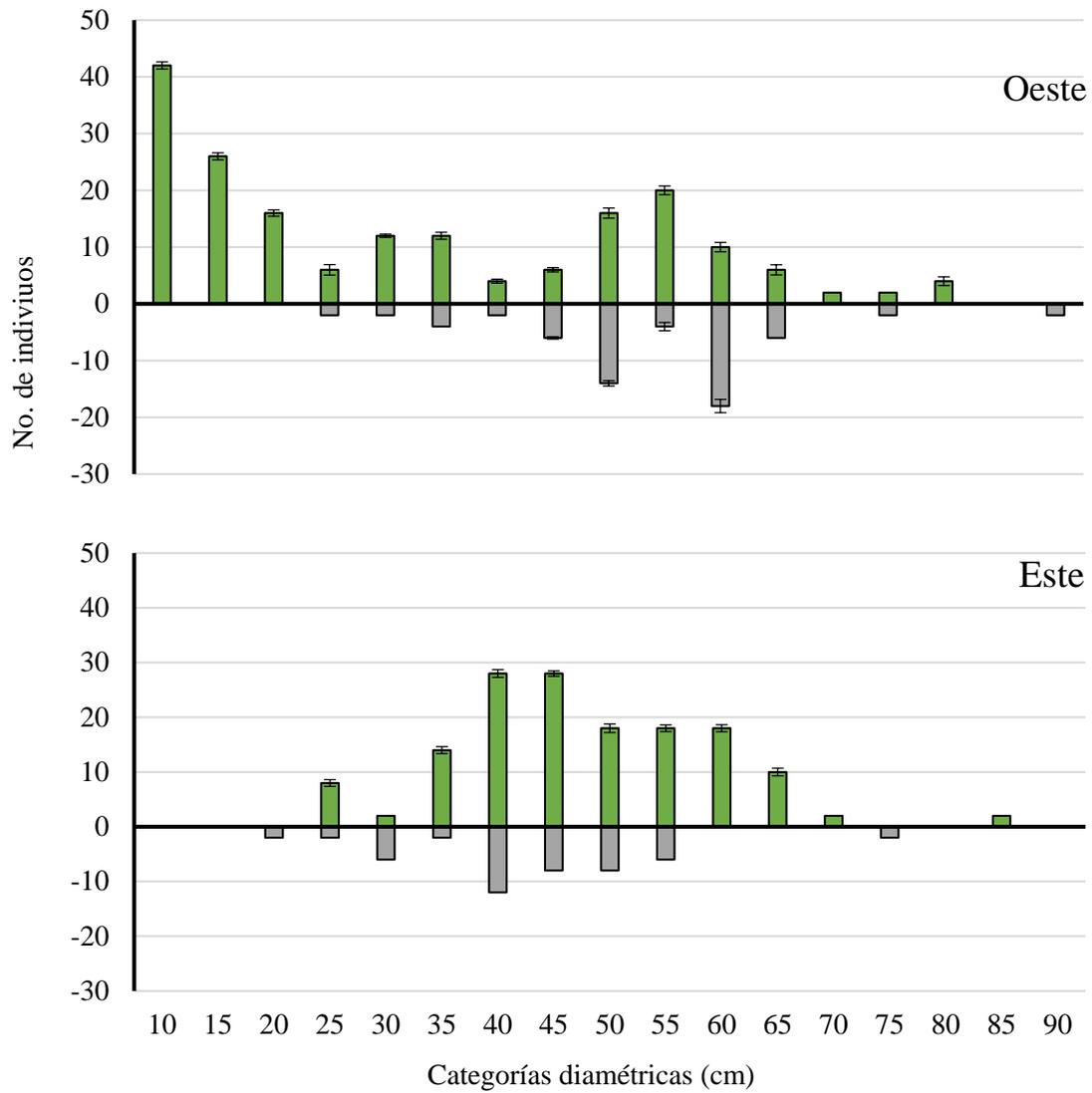


Figura 2.3. Distribución diamétrica de los sitios de medición de extracción forestal en dos exposiciones del APFFNT. Las barras en la escala negativa indican la categoría donde se removió arbolado. Las barras de error, hacen referencia al error estándar.

Los sitios de la exposición Oeste ubicados en la localidad Santa María del Monte presentan un número alto de individuos en las categorías de menor talla correspondiente a 10 cm (7.5-12.4), 15 (12.5–17.4) y 20 (17.5–22.4). Las categorías diamétricas más afectadas en la exposición Oeste por la presencia de plagas y plantas parásitas y por lo tanto más intervenidas son 50 (47.5–52.4 cm) y 60 (57.5–62.4 cm).

Los sitios de la exposición Este ubicados en la localidad Zaragoza presentaron una curva de distribución diamétrica de tipo normal, resultado del saneamiento realizado en 2016. En la exposición Este las categorías diamétricas más intervenidas son 40 (37.5–42.4 cm), 45 (42.5–47.4 cm) y 50 (47.5–52.4 cm).

Estructura vertical

La estructura vertical del bosque de *Pinus hartwegii* está conformada por tres estratos con diferencias significativas entre las alturas de los árboles ($p < 0.005$). Los perfiles de la **Figura 2.4** presentan las dimensiones promedio en DAP, HT, dt, dc para cada estrato.

Los sitios de muestro ubicados en la exposición Oeste presentaron una HT promedio de 16.79 ± 2.51 previo a la intervención y en 2018 la HT promedio fue 14.87 ± 2.82 m. La **Figura 2.4** muestra que en esta exposición la HT promedio del estrato inferior fue 5 m, la HT promedio del estrato medio fue 15.3 m y la HT promedio del estrato superior fue de 24.3 m.

Los sitios de muestreo de extracción forestal levantados en la exposición Este tenían una altura promedio de 19.59 ± 1.15 m y pasada la intervención la altura promedio fue de 19.66 ± 1.45 m. La HT promedio del estrato inferior fue 7.2 m, la HT promedio del estrato medio fue 16.9 m y la HT promedio del estrato superior fue de 22.6 m (**Figura 2.4**).



Figura 2.4. Perfil de estructura vertical en sitios de extracción forestal en dos exposiciones del APFFNT

2.6.2 Análisis de competencia

Los resultados del índice de densidad de rodales de Reineke (IDRR) previo al saneamiento en las exposiciones evaluadas son descritos para *Pinus hartwegii* como rodales con un grado de densidad suficiente, esta condición permite prescribir aclareos u otras cortas (no totales) (Musálem-Santiago & Solís Pérez, 2000) (**Cuadro 2.4**). Una vez ocurrida la intervención de saneamiento sólo los sitios de la exposición Oeste cambiaron a un IDRR deficiente, pero pueden tratarse de sitios con árboles en crecimiento (Long, 1985).

Los valores del factor de competencia de copa se redujeron de forma más drástica también en los sitios de la exposición Oeste, debido a que los individuos extraídos por el saneamiento correspondían a clases diamétricas mayores.

Cuadro 2.4. Índices de densidad en rodales de *Pinus hartwegii*.

Exposición	Oeste		Este	
	2016	2018	2016	2018
Índice de Densidad de Rodales de Reineke	252.81 ± 32.05	150.83 ± 26.09	242.08 ± 15.09	187.91 ± 10.94
Factor de competencia de copa	78.12 ± 10.05	48.39 ± 7.03	74.55 ± 4.03	61.12 ± 4.45

Valor promedio ± error estándar

Los índices de competencia se calcularon de acuerdo a la distribución de los árboles en 2018, considerando como árbol objetivo al tocón más cercano al centro del sitio de medición (**Cuadro 2.5**). Se encontró que los valores altos de competencia para ambos índices se presentaron en los sitios de la exposición Oeste.

Cuadro 2.5. Índices de competencia dependientes de la distancia entre un tocón y árboles remanentes de *Pinus hartwegii*.

Exposición	Oeste	Este
	2018	2018
Índice de Hegyi	2.62 ± 0.88	1.59 ± 0.38
Índice de Martin y Ek	81.60 ± 48.07	15.98 ± 2.69

Valor promedio ± error estándar

2.6.3 Estandarización de crecimiento mediante el incremento en área basal

La medición de anchuras de anillos de crecimiento se efectuó para 221 núcleos de crecimiento, que correspondieron a 166 árboles vivos y 45 muestras de tocones (en diez tocones la pudrición del tocón no permitió coleccionar la muestra de madera). La extensión máxima de las series de crecimiento fue de 170 años para las dos exposiciones evaluadas. En los sitios de la exposición Oeste se midieron 123 muestras, 92 corresponden a árboles vivos y 31 a tocones. En la exposición Este se midieron 98 núcleos de crecimiento, de los cuales 74 pertenecen a árboles vivos y 24 a tocones.

La relación clima-crecimiento se evaluó en los árboles no competidores con el árbol extraído (ubicados en un radio mayor a los 7.5 m del tocón). Estos árboles se consideraron como muestras testigo, porque no se esperaba un efecto relacionado con el saneamiento ocurrido en 2016. No se encontraron correlaciones de clima-crecimiento importantes en ninguna de las exposiciones (**Figura 2.5**).

Las correlaciones más altas fueron para la precipitación (mm) (Oeste $r = 0.175$, $n = 10$ años, $p \leq 0.001$; Este $r = 0.1789$, $n = 10$ años, $p \leq 0.001$).

La **Figura 2.5** muestra que en ambas exposiciones el IAB de los árboles plagados (línea café) era menor que el de los árboles no enfermos. Aun cuando los registros de temperatura máxima han aumentado en los sitios de muestreo, los últimos siete años. La precipitación ha fluctuado entre años más secos como el 2014, o más húmedos como el 2012 o el 2018, sin embargo, no se encontró una respuesta en el IAB. Es claro el aumento en el IAB de los árboles remanentes circundantes y cercanos a los árboles cortados (línea verde) y la diferencia con respecto a los árboles no competidores (línea gris).

Se encontró que el IAB difiere significativamente entre la exposición Oeste y la exposición Este ($F = 2.147$; $g.l. = 4646$; $p < 0.0001$). La exposición Oeste previo al saneamiento tuvo IAB de $335.00 \pm 79.02 \text{ mm}^2$, y después de la intervención aumentó a $432.03 \pm 46.40 \text{ mm}^2$. La exposición Este del volcán antes del saneamiento tuvo un IAB de $262.77 \pm 29.13 \text{ mm}^2$, y pasada la corta de árboles se incrementó a $578.57 \pm 68.78 \text{ mm}^2$.

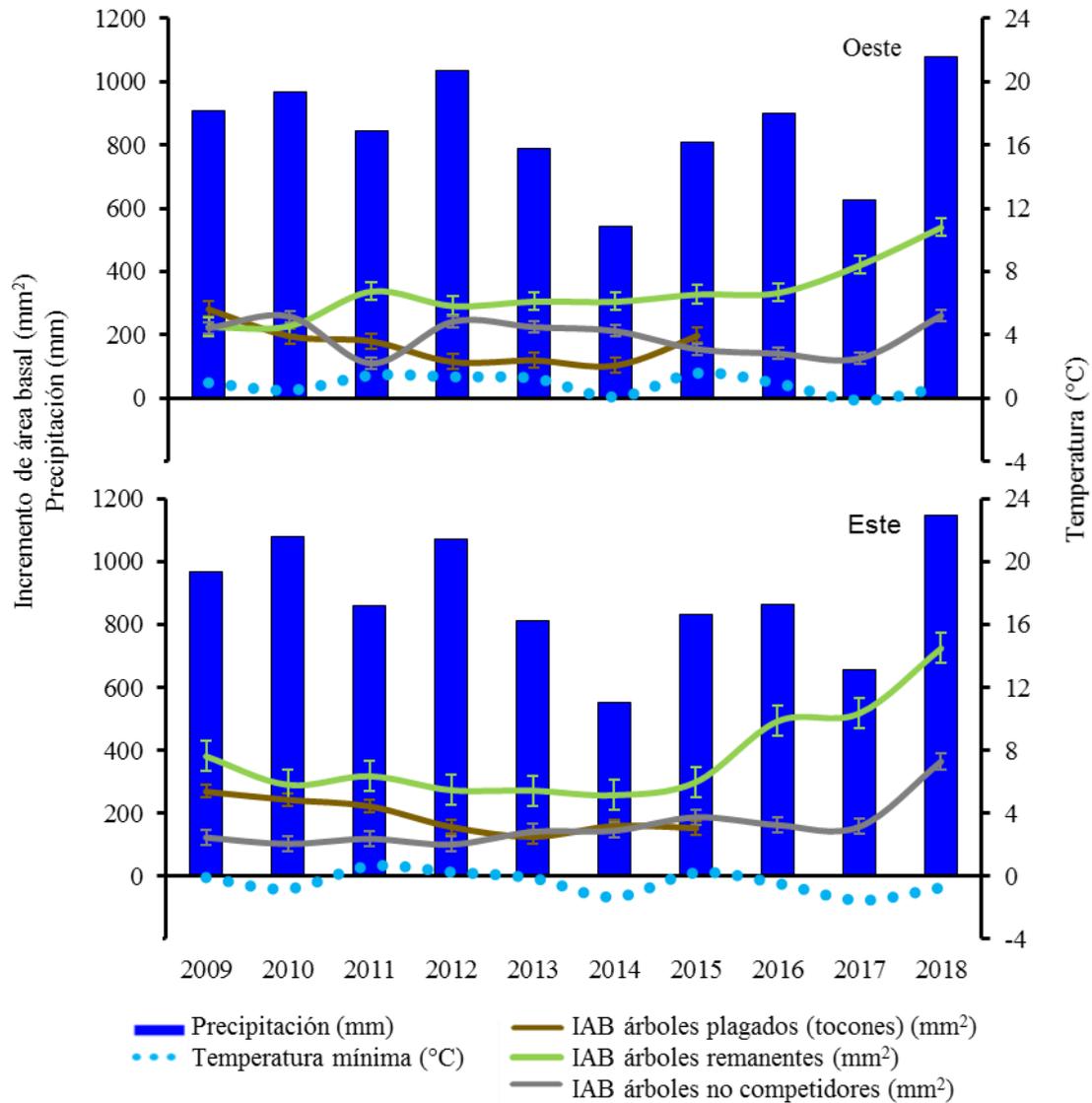


Figura 2.5. Series de crecimientos estandarizadas en incremento en área basal sobrepuestas a variables climáticas en dos exposiciones del APFFNT.

El IAB de los árboles remanentes como respuesta al saneamiento fue diferente con relación al número de árboles competidores, el diámetro del árbol extraído (d) y la distancia al tocón. Se categorizaron las distancias de los árboles remanentes, de 0 a 2.5 m, de 2.6 a 5m, y de 5.1 a 7.5 m (Cuadro 2.6).

En el **Cuadro 2.6** se presenta el IAB para cada exposición analizada. Se presentan dos condiciones de competencia, la primera es cuando en el radio de 7.5 m alrededor del tocón habían de 1 a 3 árboles, y en la segunda condición habían de 4 a 7 árboles. También se presentan dos condiciones del árbol extraído, del que se midió el diámetro del tocón (d_t), cuando el diámetro del tocón mide entre 10 y 30 cm, y cuando el d_t era mayor a 30 cm.

El IAB de los árboles remanentes en el período posterior al saneamiento fue mayor que el período previo en todos los casos (**Cuadro 2.6**). Este aumento en el crecimiento tiene diferencias significativas de conformidad con la distancia del tocón (exposición Oeste $F = 9.847$; $g.l. = 56$; $p < 0.0002$; y en la exposición Este $F = 6.137$; $g.l. = 56$; $p < 0.004$). Los árboles remanentes ubicados en la periferia entre los 2.6 a 5 m con respecto al tocón tuvieron mayores IAB en ambas exposiciones.

2.7 DISCUSIÓN

Los lineamientos técnicos de los métodos para el combate y control de insectos descortezadores, y enfermedades forestales, se establecen en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Asimismo, las especificaciones de la NOM-019-SEMARNAT-2006, priorizan el uso del método de control mecánico para evitar la aplicación de productos químicos que resulten perjudiciales para la fauna silvestre (SEMARNAT, 2013b).

El control mecánico incluye el derribo de árboles infestados, es por ello que durante 2016 se efectuaron intervenciones de saneamiento forestal en los bosques de alta montaña del APFFNT. Se establecieron diez sitios de muestreo de extracción forestal en dos exposiciones en la cota clímax del pino de alta montaña (3,800m) (Rojas-García et al., 2019). La extracción de árboles aumentó la distancia de un árbol respecto a su vecino más cercano, que modificó el patrón de distribución de la condición agrupada a dispersa en las dos exposiciones.

El saneamiento trajo consigo cambios estructurales en las clases de edad, la disposición de los individuos en diferentes estratos de dosel, y distribución de individuos entre las clases de diámetro. El análisis estructural horizontal reconoció modificaciones en la distribución de los diámetros posteriores al saneamiento de 2016.

Cuadro 2.6. Incremento en área basal para dos períodos de crecimiento, antes y después de la extracción por saneamiento forestal, en dos exposiciones del APFFNT. Los rectángulos segmentados representan a los núcleos de crecimiento y el IAB de cada año.

Exposición	Oeste				Este			
	1 a 3		4 a 7		1 a 3		4 a 7	
Número de árboles								
Período de crecimiento	2013-2015	2016-2018	2013-2015	2016-2018	2013-2015	2016-2018	2013-2015	2016-2018
	410.03 ± 36.1	530.77 ± 163.1	166.31 ± 31.0	242.54 ± 42.5	214.77 ± 62.5	514.65 ± 52.8		
<i>d_t</i> de árbol extraído <30cm								
	184.56 ± 56.2	373.62 ± 77.4	172.64 ± 20.8	311.51 ± 130.3	336.16 ± 22.9	762.68 ± 162.8		
	158.08 ± 59.2	338.33 ± 57.8						
							167.48 ± 23.5	373.55 ± 115.5
<i>d_t</i> del árbol extraído entre 10 y 30 cm								
	223.42 ± 22.0	538.71 ± 173.8			334.26 ± 43.3	583.59 ± 53.4		
	260.99 ± 9.4	502.64 ± 197.3						

Valor promedio ± error estándar

Número de árboles, corresponde a los individuos remanentes alrededor del tocón (árbol extraído) en un radio de 7.5 m.

Los núcleos naranjas representan a los árboles entre 0 a 2.5 m con respecto del tocón, los amarillos a los árboles entre 2.6 a 5m y los verdes a los árboles 5.1 a 7.5m. El segmento gris corresponde al IAB de 2016.

La intervención en los sitios ubicados en la exposición Oeste afectó mayormente a individuos de las categorías diamétricas de 50 y 60. En la exposición Este los individuos saneados corresponden en su mayoría a categorías de 40, 45 y 50 cm. Esta intervención dejó una distribución de tipo normal, que sugiere el establecimiento irregular de la regeneración o poblaciones cuya regeneración ha sido temporalmente interrumpida por daño a las plántulas, incendios forestales (Franklin & Forman, 1987), pastoreo o extracción forestal en la zona de estudio (Endara-Agramont et al., 2012).

La reducción de la cobertura del dosel tiene un impacto en la cantidad de luz que llega al piso forestal (Healey & Colin Price, 2000). La apertura de claros incrementa el reclutamiento y favorece la regeneración natural (Connell, 1989) (**Cuadro 2.2**). La alta densidad de repoblado registrada en ambas exposiciones, con el tiempo aumentará la competencia intraespecífica como lo señalan Velázquez-Martínez, Musálem-Santiago, Keyes, and Zárate (1986) para bosques de la misma especie en Zoquiapan, Estado de México.

La evaluación de la estructura vertical permitió diferenciar tres estratos (Valerio & Salas, 1998), consistentes con las categorías de altura reportadas por Endara-Agramont et al. (2012). En términos generales, los bosques de pino de alta montaña son relativamente bajos (5 a 20 m de altura) y más bien medianamente densos a francamente abiertos, sobre todo cerca del límite de la vegetación arbórea (Calderón de Rzedowski & Rzedowski, 2005). Coomes and Allen (2007) reportan resultados similares donde a mayores altitudes el dosel tiende a ser más abierto.

Se encontró que el patrón de distribución obtenido a partir de ANN está estrechamente relacionado con el comportamiento de los índices de competencia de Hegyi (1974) y Martin and Ek (1984). Para ambos índices los valores altos de competencia se asociaron a sitios con patrón de distribución agrupada, y los valores bajos de competencia corresponden a sitios con un patrón de distribución dispersa.

El índice de Reineke (1933) refleja la competencia entre los árboles y por tanto la disponibilidad de recursos que tienen los árboles para crecer adecuadamente. Expresa una medida cuantitativa de la densidad promedio que un rodal puede soportar, con referencia a un límite entre la relación del número de árboles por unidad de superficie y el tamaño promedio de los árboles, es independiente de la edad y de la calidad de sitio (Clutter, Fortson, Pienaar, Brister, & Bailey, 1983).

El manejo de la densidad mediante las cortas de saneamiento permite reducir la competencia para obtener estabilidad biológica y mejorar la salud, mantener la composición específica y preparar los rodales para la regeneración natural, e incrementar las dimensiones de los árboles remanentes (del Río Gaztelurrutia, 1998). El manejo sustentable de los bosques depende de la regeneración y la capacidad de la población remanente para reemplazar el volumen recolectado dentro de un ciclo de corta (Schöngart, Bräuning, Barbosa, Lisi, & de Oliveira, 2017).

El incremento en el crecimiento de los árboles remanentes después de intervenciones de manejo, puede ser verificado en escalas de tiempo amplias mediante estudio de anillos de crecimiento, que se utilizan normalmente para asignar escalas de temperatura o precipitación a colecciones históricas de madera que abarcan los últimos cientos de años (Fritts, 1976).

Pinus hartwegii al desarrollarse en condiciones extremas responde con correlaciones estadísticamente significativas de clima-crecimiento en el centro y norte de México (Villanueva Díaz et al., 2015), en muestreos planeados para la reconstrucción climática, donde inicialmente se seleccionan sitios con individuos que poseen características morfológicas específicas para desarrollar una buena cronología (Villanueva Diaz et al., 2004). Los árboles que mejor captan la señal climática se localizan en terrenos de ladera con poca disponibilidad de humedad, generalmente tienen la punta seca, tallo y corteza torcida en forma de espiral, copa no cónica, ramas caídas (Villanueva Diaz et al., 2004) o árboles dominantes de apariencia longeva (Gutiérrez García & Ricker, 2019).

En el presente estudio se analizaron 209 series de crecimiento, con una extensión de 170 años, desde una perspectiva dendroecológica. Al haberse realizado un muestreo de todos los árboles al interior del sitio de muestreo (Abrams & Hock, 2006), no hubo correlaciones clima-crecimiento importantes en ninguna de las exposiciones; por lo tanto, el registro de anillos de árboles son resultado en gran medida, un reflejo del desarrollo del rodal (Copenheaver & Abrams, 2003).

El crecimiento radial es mayor en los anillos anuales más cercanos a la médula que en los más próximos a la corteza (Guller, Isik, & Cetinay, 2012), las series de crecimiento permitieron conocer que las mayores anchuras de anillo en *Pinus hartwegii* se presentan durante primeros 30 años de edad del cambium. Estos datos coinciden con otras especies de *Pinus* (Adamopoulos, Milios, Doganos, & Bistinas, 2009; Gapare, Wu, & Abarquez, 2006).

El efecto de la edad cambial en las propiedades del anillo de crecimiento interactúa con factores como manejo, la ubicación geográfica y/o el sitio (Guller et al., 2012). En las series de anillos de crecimiento mayores de 15 años, el efecto de la edad cambial disminuye, y el efecto del año se puede examinar independientemente de los efectos de la edad cambial (Ivković, Gapare, Wu, Espinoza, & Rozenberg, 2013), por esta razón los árboles menores a 15 años no fueron considerados en el análisis de IAB del presente estudio.

El IAB se usó directamente en lugar de la anchura del anillo, porque es menos dependiente de la edad que la anchura de anillo (Biondi, 1999). Se compararon dos períodos de crecimiento, previo y después del saneamiento.

Las plagas y enfermedades forestales reducen el crecimiento radial en las especies forestales: muérdagos, hongos (Sangüesa-Barreda et al., 2015), insectos defoliadores (Robson, Conciatori, Tardif, & Knowles, 2015), escarabajos barrenadores (Ferrero, Coirini, & Díaz, 2013), y escarabajos descortezadores (Zhang, Alfaro, & Hebda, 1999). Esta disminución del crecimiento es posible observarla en la **Figura 2.5**.

El crecimiento radial de los árboles remanentes ubicados en la periferia de los tocones fue diferente entre las exposiciones, en la exposición Oeste aumentó en un 28.96% posterior al saneamiento, mientras que en la exposición Este el crecimiento aumentó el 120.18%. Jaakkola, Mäkinen, and Saranpää (2006) mostraron que cortas de selección en bosques de *Picea abies* (L.) Karst. aumentaron significativamente la tasa de crecimiento radial de los árboles remanentes.

Los efectos de la corta de saneamiento sobre el crecimiento de los árboles remanentes posteriores a la intervención son significativos, pero se asume que serían diferentes con relación a la competencia del rodal. Una forma de evaluar la mayor o menor competencia de los árboles remanentes es considerar su distancia al tocón (Esper, Benz, & Pederson, 2012). En el presente estudio se compararon tres distancias a partir del tocón (0 a 2.5 m, 2.6 a 5 m y 5.1 a 7.5 m). Se encontró que el crecimiento en IAB de los árboles remanentes es significativamente distinto de conformidad con la cercanía al tocón. Los árboles remanentes ubicados en la vecindad más entre 2.6 a 5 m del tocón presentaron los mayores incrementos de IAB.

El crecimiento radial de los árboles dentro de las masas forestales depende en gran medida de las interacciones entre la competencia y las condiciones ambientales, después de una intervención de manejo es posible observar diferencias entre estratos de dosel, debido a la cantidad de luz (energía) que recibe un árbol (Druckenbrod, Pederson, Rentch, & Cook, 2013; Pretzsch, Biber, Schütze, Uhl, & Rotzer, 2014; Stojanović et al., 2017). La competencia por la luz tiene una fuerte influencia en el crecimiento de los árboles pequeños, mientras que la competencia por los nutrientes afecta a los árboles de todos los tamaños (Coomes & Allen, 2007).

Sosa Díaz et al. (2018) refieren que si bien, la distribución de plagas forestales en México es incierta, un análisis sobre las áreas potenciales de bosques por ser afectados mediante algún tipo de plaga, encuentra a bosques con pocas especies hospederas, densidades bajas, y diámetros pequeños como un blanco idóneo. Estas particularidades se ajustan a las características de los bosques de *Pinus hartwegii* (Musálem-Santiago & Solís Pérez, 2000). Además, es conocido, que la presencia de plagas y enfermedades forestales reducen significativamente el crecimiento de los árboles infestados (Sangüesa-Barreda et al., 2015).

El presente estudio permitió conocer que las prácticas de saneamiento forestal en rodales de *Pinus hartwegii* mediante un método de control mecánico, favorece además de la salud forestal *per se*, reduce la competencia y trae consigo un aumento en el crecimiento de los árboles remanentes. El crecimiento y regeneración de los bosques de alta montaña mexicanos se encuentra reportado como de los más altos del país, pero su desarrollo depende en gran medida de las condiciones ambientales y de un manejo apropiado (Beaman, 1962).

El análisis de anillos de crecimiento es una herramienta valiosa y confiable para evaluar la sustentabilidad de los regímenes de tala y para proyectar los rendimientos de madera (Brienen & Zuidema, 2006). Es por ello que el desarrollo de investigación dendroecológica en el pino de alta montaña es un punto de partida para la implementar estrategias de manejo encaminadas a la conservación, el saneamiento y la restauración de estos ecosistemas.

2.8 CONCLUSIONES

Los trabajos de saneamiento al interior de los rodales de *Pinus hartwegii* trajeron consigo cambios estructurales en la disposición de los individuos en diferentes estratos de dosel, y distribución de individuos entre las clases de diámetro.

El crecimiento radial posterior a las cortas de saneamiento en rodales de *Pinus hartwegii* obedece en gran medida a la reducción de competencia. El saneamiento forestal trajo consigo diferencias entre estratos de dosel. La estandarización de las anchuras de anillos de crecimiento con el cálculo del IAB, permitió encontrar que comparado con el registrado previo al saneamiento forestal, este aumentó significativamente en los árboles remanentes alrededor del tocón. Los árboles remanentes ubicados en la vecindad entre 2.6 y 5 m con respecto al tocón registraron los mayores incrementos.

Pinus hartwegii es una especie propensa a plagas forestales, que limitan su crecimiento. El saneamiento forestal de estos bosques, trae consigo un aumento en el crecimiento de los árboles remanentes, por ello puede ser un aliado para la restauración de estos ecosistemas.

2.9 REFERENCIAS

- Abrams, M. D., & Hock, W. K. (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. doi:10.1016/j.foreco.2006.02.019
- Adamopoulos, S., Milios, E., Doganos, D., & Bistinas, I. (2009). Ring width, latewood proportion and dry density in stems of *Pinus brutia* Ten. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67, 471-477. doi:10.1007/s00107-009-0345-x
- Arreola-Ortiz, M. R., González-Elizondo, M., & Návar-Cháidez, J. d. J. (2010). Dendrocronología de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, México. *Madera y Bosques*, 16(1), 71-84.
- Beaman, J. H. (1962). The Timberlines of Iztaccihuatl and Popocatepetl, Mexico. *Ecology*, 43(3), 377-385. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/1933367>
- Biondi, F. (1999). Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools. *Ecological Applications*, 9(1), 216-227. doi:10.1890/1051-0761(1999)009[0216:CTRCAR]2.0.CO;2
- Blasing, T. J., Duvick, D. N., & West, D. C. (1981). Calibration and verification using regionally averaged single station precipitation data. *Tree-Ring Bulletin*, 41, 37-44.
- Bogino, S. M., & Villalba, R. (2008). Radial growth and biological rotation age of *Prosopis caldenia* Burkart in Central Argentina. *Journal of Arid Environments*, 72(1), 16-23. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.04.008

- Bravo, F., Montero, G., & del Río, M. (1997). Índices de densidad de las masas forestales. *Ecología*(11), 177-187.
- Brienen, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2006). The use of tree rings in tropical forest management: Projecting timber yields of four Bolivian tree species. *Forest Ecology and Management*, 226(1-3), 256-267. doi:10.1016/j.foreco.2006.01.038
- Burkhardt, H. E., & Tomé, M. (2012). *Modeling Forest Trees and Stands*. Netherlands: Springer.
- 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.
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). *Timber management: a quantitative approach*. Nueva York, USA: John Wiley & Sons Inc.
- CONAFOR. (2012). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe de Resultados 2004-2009*. Jalisco, México: Coordinación General de Planeación e Información-Gerencia de Inventario Forestal y Geomática de la Comisión Nacional Forestal Retrieved from <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/infys/temas/resultados-2004-2009>
- Connell, J. (1989). Some Processes Affecting the Species Composition in Forest Gaps. *Ecology*, 70(3), 560-562. doi:10.2307/1940205
- Coomes, D., & Allen, R. (2007). Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology*, 95, 1084-1097. doi:10.1111/j.1365-2745.2007.01280.x
- Copenheaver, C. A., & Abrams, M. D. (2003). Dendroecology in young stands: case studies from jack pine in northern lower Michigan. *Forest Ecology and Management*, 182(1-3), 247-257. doi:10.1016/s0378-1127(03)00049-5
- Corral-Rivas, J. J., Barrio-Anta, M., Aguirre-Calderon, O. A., & Dieguez-Aranda, U. (2007). Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry*, 80(1), 29-40. doi:10.1093/forestry/cpl048
- del Río Gaztelurrutia, M. (1998). Régimen de claras y modelos de producción para *Pinus sylvestris* L. en los sistemas Central e Ibérico. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Druckenbrod, D. L., Pederson, N., Rentch, J., & Cook, E. R. (2013). A comparison of times series approaches for dendroecological reconstructions of past canopy disturbance events. *Forest Ecology and Management*, 302, 23-33. doi:10.1016/j.foreco.2013.03.040
- Endara-Agramont, A. R., Maass, S. F., Bernal, G. N., Hernández, J. I. V., & Fredericksen, T. S. (2012). Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research*, 23(1), 39-44. doi:10.1007/s11676-012-0226-8
- 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. doi:10.1016/j.foreco.2012.07.047
- Ferrero, M. E., Coirini, R. O., & Díaz, M. P. (2013). The effect of wood-boring beetles on the radial growth of *Prosopis flexuosa* DC. in the arid Chaco of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 88, 141-146. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.07.004

- Franklin, J. F., & Forman, R. T. (1987). Creating landscape patterns by forest cutting: ecological consequences and principles. *Landscape ecology*, *1*(1), 5-18. doi:10.1007/BF02275261
- Fritts, H. (1976). *Tree rings and climate*. London: Academic Press.
- Fritts, H., & Swetnam, T. W. (1989). Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*, *19*, 111—188. doi:10.1016/S0065-2504(08)60158-0
- Gapare, W. J., Wu, H. X., & Abarquez, A. (2006). Genetic control of the time of transition from juvenile to mature wood in *Pinus radiata* D. Don. *Annals of Forest Science*, *63*, 871-878 doi:10.1051/forest:2006070
- García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepppe*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guller, B., Isik, K., & Cetinay, S. (2012). Variations in the radial growth and wood density components in relation to cambial age in 30-year-old *Pinus brutia* Ten. at two test sites. *Trees*, *26*(3), 975-986. doi:10.1007/s00468-011-0675-2
- 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*(e902676), 1-15. doi:10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676
- Healey, J., & Colin Price, J. (2000). The cost of carbon retention by reduced impact logging. *Forest Ecology and Management*, *139*(1-3), 237-255. doi:10.1016/S0378-1127(00)00385-6
- Hegyí, F. (1974). A simulation model for managing jack-pine stands. In Royal_College_of_Forestry (Ed.), *Growth models for tree and stand simulation* (pp. 74-90). Stockholm: Sweden.
- Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, *43*, 69—78. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10150/261223>
- Ivković, M., Gapare, W., Wu, H., Espinoza, S., & Rozenberg, P. (2013). Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Annals of Forest Science*, *70*(5), 525-534. doi:10.1007/s13595-013-0290-z
- Jaakkola, T., Mäkinen, H., & Saranpää, P. (2006). Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation. *Forest Ecology and Management*, *237*, 513-521. doi:10.1016/j.foreco.2006.09.083
- Krajicek, J., Brinkman, K., & Gingrich, S. (1961). Crown competition, a measure of density. *Forest Science*, *16* (1), 5-42.
- Long, J. (1985). A practical approach to density management. *Forestry Chronicle*, *61*(1), 23-27. doi:10.5558/tfc61023-1
- Martín-Benito, D., del Río, M., Heinrich, I., Helle, G., & Cañellas, I. (2010). Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *Forest Ecology and Management*, *259*(5), 967-975. doi:10.1016/j.foreco.2009.12.001
- Martin, G. L., & Ek, A. R. (1984). A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pinediameter and height growth. *Forest Science*, *30*(3), 731-743. doi:10.1093/forestscience/30.3.731
- Mitchell, A. (2005). *La Guía de ESRI para el análisis SIG (Version 2)*. Madrid: ESRI Press.

- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en Ecología Vegetal*. Santa Cruz, Bolivia: Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR).
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Musálem-Santiago, M. Á., & Solís Pérez, M. A. (2000). *Monografía de Pinus hartwegii* (Vol. Libro Técnico No. 3). México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Navarrete Espinoza, E., Cárcamo Ojeda, J., & Novoa Barra, P. (2008). Modelos de crecimiento diametral para *Austrocedrus chilensis* en la cordillera de nahuelbuta, Chile: una interpretación biológica. *Ciencia e Investigación Agraria*, 33(3), 311-320.
- Padmakumar, B., Sreekanth, N. P., Shanthiprabha, V., Paul, J., Sreedharan, K., Augustine, T., . . . Thomas, A. P. (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. doi:10.3832/ifor2190-011
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., & Rotzer, T. (2014). Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat Commun*, 5, 4967. doi:10.1038/ncomms5967
- Quicaño Silvano, J. (2017). Competencia por espacio de la regeneración natural de un bosque secundario de tierra firme en la parcela de corta anual I, bloque II de la comunidad nativa Santa Mercedes, Río Putumayo, Perú. (Tesis Profesional). Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. Facultad de Ciencia Forestales, Iquitos, Peru.
- Regent-Instruments-Canada. (2016). WinDENDRO 2016a for tree-ring analysis (Version 2016B). Canadá: Regent Instruments Canada Inc. Retrieved from <http://www.regentinstruments.com/>
- Reineke, L. (1933). Perfecting a stand density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 46(12), 627-638. Retrieved from <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968212/PDF>
- Ricker, M., Gutiérrez-García, G., & Daly, D. (2007). Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(5), 977-989. doi:10.1139/X06-304
- Robson, J. R. M., Conciatori, F., Tardif, J. C., & Knowles, K. (2015). Tree-ring response of jack pine and scots pine to budworm defoliation in central Canada. *Forest Ecology and Management*, 347, 83-95. doi:10.1016/j.foreco.2015.03.018
- Rojas-García, F., & Villers Ruiz, L. (2008). Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México*, 33(104), 59-86.
- Rojas-García, F., Fredericksen, T. S., Vazquez Lozada, S., & Endara Agramont, A. R. (2019). Impact of timber harvesting on carbon storage in montane forests of central Mexico. *New Forests*. doi:10.1007/s11056-019-09714-z
- Salas-Aguilar, V., & Paz-Pellat, F. (2018). Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas*, 2(1), 1-14.
- Sánchez-Jasso, J. M., Aguilar-Miguel, X., Medina-Castro, J. P., & Sierra-Domínguez, G. (2013). Riqueza específica de vertebrados en un bosque reforestado del parque nacional nevado de toluca, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(1), 360-373. doi:10.7550/rmb.29473

- Sanguiesa-Barreda, G., Camarero, J. J., Linares, J. C., Hernández, R., Oliva, J., Gazol, A., . . . de la Riva, J. (2015). Role of biotic factors and droughts in the forest decline: contributions from dendroecology. *Ecosistemas*, 24(2), 15-23. doi:10.7818/ecos.2015.24-2.03
- Santilli, M., Pelfini, M., Citterio, M., & Turri, S. (2005). Landscape history in the subalpine karst region of Moncodeno (Lombardy Prealps, Northern Italy). *Dendrochronologia*, 23(1), 19-27. doi:10.1016/j.dendro.2005.07.001
- Schöngart, J., Bräuning, A., Barbosa, A. C. M. C., Lisi, C. S., & de Oliveira, J. M. (2017). Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. In *Dendroecology* (pp. 35-73).
- Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic changes in semiarid America*. Tucson: Univ. of Arizona Press.
- SEMARNAT. (2013a). Decreto que reforma, deroga y adiciona diversas disposiciones del diverso publicado el 25 de enero de 1936, por el que se declaró Parque Nacional la montaña denominada "Nevado de Toluca" 2013. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Retrieved from <https://www.gob.mx/conanp/documentos/decreto-que-reforma-deroga-y-adiciona-diversas-disposiciones-del-diverso-por-el-que-se-declaro-parque-nacional-el-nevado-de-toluca>.
- SEMARNAT. (2013b). *Programa Nacional de Sanidad Forestal 2013-2018*. México: Comisión Nacional Forestal-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Retrieved from <http://www.ccmss.org.mx/acervo/programa-nacional-de-sanidad-forestal-2013-2018/>
- Sosa Díaz, L., Méndez González, J., García Aranda, M. A., Cambrón Sandoval, V. H., Villarreal Quintanilla, J. Á., Ruiz González, C. G., & Montoya Jiménez, J. C. (2018). Distribución potencial de barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdagos en bosques de coníferas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 187-208. doi:10.29298/rmcf.v9i47.159
- Sotelo-Ruiz, E., González Hernández, A., Cruz Bello, G., Moreno Sánchez, F., & Cruz Cárdenas, G. (2011). Los suelos del Estado de México y su actualización a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2006. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 71-84.
- Stojanović, M., Sánchez-Salguero, R., Levanič, T., Szatniewska, J., Pokorný, R., & Linares, J. C. (2017). Forecasting tree growth in coppiced and high forests in the Czech Republic. The legacy of management drives the coming *Quercus petraea* climate responses. *Forest Ecology and Management*, 405, 56-68. doi:10.1016/j.foreco.2017.09.021
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. USA: University of Chicago Press.
- 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*, XXVI(1). doi:10.5154/r.rchscfa.2018.09.064
- Valerio, J., & Salas, C. (1998). *Selección de prácticas silviculturales para bosques tropicales. Manual técnico*. Santa Cruz, Bolivia: Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR).
- Velázquez-Martínez, A., Musálem-Santiago, M. Á., Keyes, M. R., & Zárate, L. G. (1986). Influencia del tratamiento en el suelo y la condición de apertura del dosel en el establecimiento inicial de la regeneración natural de *Pinus hartwegii* Lindl. *Agrociencia*, 64, 147-170.
- Villanueva Diaz, J., Cerano Paredes, J., Stahle, D. W., Therrell, M., Cleaveland, M., & Sánchez Cohen, I. (2004). *Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México*. Gómez Palacio, Durango, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.

- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Vázquez Selem, L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L., . . . Ruiz Corral, J. A. (2015). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas*(86), 5-14. doi:10.14350/riig.42003
- Yamaguchi, D. (1991). A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(3), 414—416. doi:10.1139/x91-053
- Zhang, Q., Alfaro, R., & Hebda, R. (1999). Dendroecological studies of tree growth, climate and spruce beetle outbreaks in Central British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 121(3), 215-225. doi:10.1016/S0378-1127(98)00552-0

CAPITULO III. EFECTO DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL EN LA FORMACIÓN DE MADERA EN ÁRBOLES REMANENTES DE *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.

Forest harvesting effect on wood formation in remnant trees of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.

3.1 RESUMEN

El manejo forestal tiene la capacidad de modificar la estructura y la calidad de la madera. En este trabajo se evaluó el efecto del aprovechamiento forestal sobre la formación de madera en árboles remanentes de *Abies religiosa* en un bosque ubicado en el Eje Volcánico Transmexicano, intervenido con una intensidad de corta del 50% de área basal en 2014. Esta evaluación se hizo a partir del análisis dendrocronológico de 80 núcleos de crecimiento provenientes de 40 árboles ubicados en 10 sitios de muestreo (1000 m²). Se empleó un análisis dendroanatómico para valorar las características de las células de la madera tardía en anillos de los árboles fechados (1986—2017). Se obtuvo una cronología de 90 años, donde el crecimiento radial se relacionó positivamente a la precipitación y se correlacionó negativamente con la temperatura máxima. Las anchuras de anillo aumentaron 42.4% después del aprovechamiento forestal. La microdensidad varió de 189 a 417 kg m⁻³, con un valor medio de 335 kg m⁻³. La intervención suscitó una disminución de 8.02% en el grosor de la pared celular, y un aumento de 29.84% en la longitud del lumen de la traqueida; además, se identificó una fila de canales traumáticos fechada en 2014, posiblemente relacionados con el estrés temporal de los árboles en el año de corta. Las modificaciones en la anatomía de la madera causaron una variación en la microdensidad de la madera, con un aumento en la densidad mínima y una disminución de la densidad máxima. Es importante conocer esta variación porque podría influir en la cuantificación volumétrica y de biomasa a nivel del rodal.

Palabras clave: dendroecología, dendroanatomía, grosor de la pared celular, longitud del lumen de la traqueida, microdensidad de la madera.

3.2 ABSTRACT

Forest management can modify structure and quality of wood. This work aimed to evaluate the impact of forest harvest on wood formation in the remaining trees of *Abies religiosa*, in a forest area located in the Trans-Mexican Volcanic Belt. In the study sites, the removal intervention equaled 50% of the basal area. This evaluation was carried out applying dendrochronological and anatomical techniques to 80 wood cores from 40 trees coming from 10 plots. We performed a dendroanatomical analysis to evaluate the cell characteristics of latewood in all dated tree-rings (1986—2017). We developed a 90-year chronology and radial growth was positively associated with precipitation and negatively correlated with maximum temperature. Tree-ring widths increased 42.4% after logging and wood microdensity varied from 189 to 417 kg m⁻³ with a mean value of 335 kg m⁻³. Tree removal resulted in an 8.02% decrease in cell wall thickness, and a 29.84% increase in tracheid lumen length. A row of traumatic channels dated in 2014 was identified, probably as a result of temporal stress in trees during harvest time. Modifications in wood anatomy caused a variation in wood microdensity, with an increase and decrease of minimum and maximum density, respectively. The results of this study highlight the importance wood density variations since it may influence volumetric and biomass quantification at the stand level.

Key words: dendroecology, dendroanatomy, tracheid cell wall, tracheid lumen length, wood microdensity.

3.3 INTRODUCCIÓN

La formación de madera, en términos de cantidad y estructura física, puede verse afectada por las condiciones ambientales, incluido el clima, edad cambial, disponibilidad de recursos y prácticas de manejo (Zobel & Sprague, 1998). Los anillos de crecimiento son, por lo tanto, el reflejo de múltiples mecanismos relacionados con el uso de energía, agua, carbono y nutrientes, así como con la funcionalidad en transporte agua y soporte que requiere el árbol durante su desarrollo (Babst et al., 2014).

Durante la formación de la madera, el número y el tamaño de las células del xilema determinan la anchura del ancho del anillo de crecimiento, la proporción de madera temprana y tardía en un árbol. Así mismo, las células de xilema pueden presentar cambios en el grosor de la pared celular, que dan como consecuencia variaciones en la densidad de madera (Auty, Achim, Macdonald, Cameron, & Gardiner, 2014). Las características de los anillos de crecimiento (anchura y densidad) y de los elementos traqueales (longitud, diámetro y grosor de la pared) revelan detalles de la historia natural de un individuo y del ecosistema (Pumijumnong, Eckstein, & Park, 2001).

Los rasgos anatómicos que determinan la calidad de la madera están controlados por un efecto sinérgico de la genética de una especie y la interacción con su medio ambiente (Downes, Wimmer, & Evans, 2002). La densidad de la madera depende del tamaño de las células, del grosor de la pared celular y de la proporción de los diferentes tipos de tejidos con respecto al volumen total del fuste (Zobel & Talbert, 1984). La densidad básica de la madera (kg m^{-3}) es la relación entre la masa y el volumen verde, y está determinada por el arreglo de componentes anatómicos como el tamaño de la traqueida, la relación entre madera tardía y madera temprana, y la proporción de madera juvenil y madura (van Leeuwen et al., 2011). Desde un punto de vista práctico, la densidad de la madera puede proporcionar una medida simple de la cantidad total de biomasa presente en una pieza de madera y es uno de los indicadores de la calidad de la madera, como la rigidez y la resistencia mecánica (Jozsa & Middleton, 1994).

Los bosques de *Abies religiosa* (oyamel) son perennifolios, con cobertura mayor a 85% y con altura de arbolado hasta de 40 m (Calderón de Rzedowski & Rzedowski, 2005).

Los bosques de oyamel se presentan generalmente en altitudes entre 2700 y 3600 m, a veces sobrepasando un poco estos límites, casi siempre sobre suelos profundos a lo largo del Eje Volcánico Transmexicano (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, & Lindig-Cisneros, 2012). Su distribución coincide con el cinturón de nubes que se forma alrededor de los picos de las montañas durante la estación húmeda de verano (Brower et al., 2002) y sobre laderas de exposición Norte y Oeste, donde la evapotranspiración es más baja, ya que la especie presenta una demanda hídrica alta al compararse con otras especies del bosque templado. Estos bosques, junto con el género *Pinus*, son las coníferas más importantes en la producción forestal de México. A pesar de su importancia económica, es poco lo que se conoce 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 (García Esteban, de Palacios, García Fernández, & Moreno, 2009), y pertenece al listado de maderas blandas del Comité de IAWA (IAWA_Committee, 2004). Bernal Salazar y Terrazas (2000) caracterizaron la variación radial de las dimensiones de las traqueidas de *Abies religiosa* y su relación con variables climáticas. Sus resultados sugieren que la actividad del cambium vascular de *Abies religiosa* está relacionada con las temperaturas máximas en un bosque del Eje Volcánico Transmexicano. Por su parte Bernal Salazar, Terrazas, y Alvarado (2004) analizaron características de las traqueidas y la anchura de anillos de crecimiento en sentido radial como respuesta a la contaminación ambiental, y demostraron la alta sensibilidad de la especie a la contaminación por ozono.

Rojas-García y Villers Ruiz (2008) determinaron valores de densidad de la madera de 387 kg m^{-3} en muestras de madera de rodales de *Abies religiosa* en bosques de alta montaña mexicanos, sus resultados mostraron que la madera de esta especie es moderadamente liviana. Algunos estudios sobre la densidad básica de *Abies religiosa* en sentido transversal y longitudinal han encontrado un valor mínimo de 140 kg m^{-3} , un máximo de 590 kg m^{-3} y un promedio de 360 kg m^{-3} (Goche-Télles, Fuentes Salinas, Borja de la Rosa, & Ramírez Maldonado, 2000).

Los esquemas de medición de los parámetros anatómicos de la madera asignados a los anillos de crecimiento de los 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, Seftigen, Fonti, Nievergelt, & von Arx, 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.

3.4 OBJETIVOS

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 *Abies religiosa*. 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.

La hipótesis principal es que el arbolado remanente posterior a la extracción acumulará un mayor número de elementos traqueales, presentaran traqueidas de menor grosor en su pared celular, y una mayor apertura de lumen en la madera tardía. Por lo tanto, la densidad de la madera de los anillos post cosecha será menor que la previa a la cosecha de árboles vecinos.

3.5 MATERIALES Y MÉTODOS

3.5.1 Área de estudio

Se evaluó un rodal en el cual la especie dominante fue *Abies religiosa*, ubicado en el Ejido Palo Seco, Municipio Coatepec de Harinas del estado de México, en las faldas del volcán Nevado de Toluca a los 2800 m de altitud, y a los 19°03'11" latitud Norte y 99°50'04" longitud Oeste. El tipo de suelo dominante en el sitio de estudio es andosol (Sotelo-Ruiz, González Hernández, Cruz Bello, Moreno Sánchez, & Cruz Cárdenas, 2011), y el clima es semifrío subhúmedo con régimen de lluvias es de verano (*C(E)wig*) (García, 1981). El rodal fue intervenido con un aprovechamiento forestal maderable, con una autorización de corta del 50% del área basal durante 2014 (**Figura 3.1**).

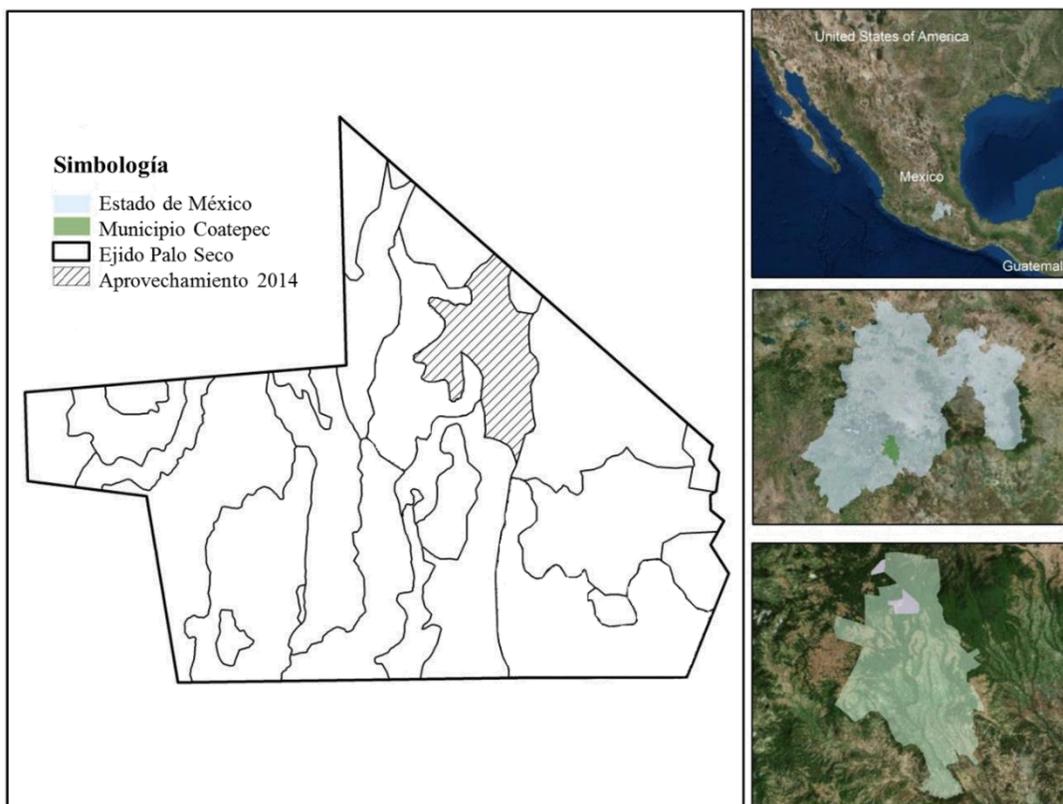


Figura 3.1. Localización del sitio de estudio, rodal de *Abies religiosa* con aprovechamiento forestal

3.5.2 *Inventario forestal y muestreo destructivo de árboles individuales*

La presente investigación se fundamentó en dos perspectivas. La primera es la dendroecológica mediante el fechado y análisis de 80 núcleos de crecimiento que correspondían a 40 árboles al interior de 10 sitios de muestreo (Abrams & Hock, 2006). La segunda es la dendroanatómica, la cual implica el análisis de características anatómicas de las células de xilema en los anillos fechados (Prendin et al., 2017).

Se establecieron 10 sitios de medición en un rodal de *Abies religiosa*. Los sitios fueron circulares con una superficie de 1,000 m² (17.84 m de radio). En cada sitio, se registraron el diámetro a la altura del pecho (DAP)(cm) de todos los árboles ≥ 7.5 cm, altura total (HT)(m), azimut (°) y distancia al centro del sitio (m). Adicionalmente, se registró el diámetro de los tocones a 0.30 m del suelo (dt cm).

Para el caso de los tocones, se utilizó la ecuación desarrollada por García Cuevas, Herrera Ávila, Hernández Ramos, García Magaña, y Hernández Ramos (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 (ABi, m²), para después sumarla y obtener valores por sitio, y extrapolándose a valores por hectárea (AB) (m²ha⁻¹) (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 núcleos de madera a la altura del pecho (1.3 m del suelo) de dos árboles remanentes al interior del sitio de muestreo con el uso de un taladro de Pressler a 1.3 m del suelo (Abrams & Hock, 2006). Uno de los núcleos se colectó de forma perpendicular y otro paralelo a la pendiente. Los núcleos de madera se montaron con pegamento sobre guías de madera y se sujetaron con cinta adhesiva para evitar su torcedura durante el secado al aire libre. Los núcleos de madera fueron alineados de modo que las traqueidas quedaran completamente verticales. Se procesaron con una lijadora orbital del grano mayor al menor (lija de papel con medidas de grano 150, 360, 600, y 1500), para poder observar de manera clara los anillos de crecimiento (Stokes & Smiley, 1996).

3.5.3 Fechado, medición de la anchura y microdensidad de anillos de crecimiento

Se realizaron cronologías por medio de técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes & Smiley, 1996). El conteo de los anillos se realizó en el estéreo-microscopio con el método de la lista para el fechado-cruzado de núcleos de madera. Esta metodología permite identificar patrones de crecimiento, asignar fechas tentativas a cada anillo de crecimiento, y detectar ausencia de anillos y la presencia de anillos falsos (Yamaguchi, 1991).

Las muestras de madera se digitalizaron con un scanner de alta resolución (LA2400, Scanner Calibrated for Image Analysis with Regents Instruments Software®). La anchura de los anillos de crecimiento y los valores de microdensidad se obtuvieron con el programa WinDendro 2016b (Guay, Gagnon, & Morin, 1992; Regent-Instruments-Canada, 2016b).

Se midió la anchura del anillo [WTR] (mm), anchura de madera temprana [WEW] (mm) y anchura de madera tardía [WLW] (mm). Los valores de microdensidad analizados fueron densidad del anillo [TRD] (g cm^{-3}), densidad de madera temprana [EWD] (g cm^{-3}), densidad de madera tardía [LWD] (g cm^{-3}), densidad mínima de anillo [MND] (g cm^{-3}) y densidad máxima del anillo [MXD] (g cm^{-3}) (Rozenberg, Franc, Commère, Schermann, & Bastien, 1997). Los valores de anchura de anillos 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 anchura de anillos y microdensidad para cada uno de los sitios de medición (Bernal Salazar et al., 2004; Lanza, Chartier, & Marcora, 2018). Se realizó la verificación del fechado de ambas mediciones con el programa COFECHA (Holmes, 1983). La relación entre el clima y crecimiento se evaluó a través de análisis de correlación de Pearson (Gutiérrez-García & Ricker, 2019). Se obtuvo la precipitación [PP](mm), temperatura máxima [TMX] ($^{\circ}\text{C}$) y temperatura mínima [TMN] ($^{\circ}\text{C}$) a nivel mensual, correspondientes a la estación meteorológica 00015062 Nevado de Toluca operada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020).

3.5.4 Evaluación anatómica

Se obtuvo una sección de cada núcleo de crecimiento a fin de evaluar entre 2—3cm de la muestra más cercanos a la corteza. 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—40 μm de grosor 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).

Se midió la longitud del lumen de la traqueida [TLL] (μm) y el grosor de pared celular de las traqueidas [WCW] (μm) de los anillos de crecimiento formados post-cosecha (1986—2017)., con el analizador de imágenes WinCell. 2016a (Pritzkow, Heinrich, Grudd, & Helle, 2014; Regent-Instruments-Canada, 2016a). Se buscó la presencia de variaciones anatómicas intra-anillo. Se hizo un análisis de varianza para conocer si existían diferencias significativas en las WTR, los TLL y WCW, 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 (Trujillo-Martínez, Reyes-Hernández, Gómez-Guerrero, & Borja-de la Rosa, 2020).

3.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El bosque de *Abies religiosa* del Ejido Palo Seco, estado de México, fue intervenido con un aprovechamiento forestal durante 2014, por medio del cual se extrajo el 50% del AB. Los aclareos pueden modificar características importantes de la formación de la madera que se reflejan en la calidad de esta (Hernández López, Martínez Reyes, Vargas Hernández, Velázquez-Martínez, & Ángeles-Pérez, 1996). Las características dasométricas del rodal aprovechado resultado del análisis se presentan en el **Cuadro 3.1**.

Cuadro 3.1. Características dasométricas de un bosque de *Abies religiosa* 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

Donde: N = número de árboles ha^{-1} ; AB = área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$); Dg = diámetro medio cuadrático (cm); HT = altura total (m); ANN = vecino más cercano promedio

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 Bolaños, Treviño Garza, Aguirre Calderón, Jiménez Pérez, & Velázquez Martínez, 2010).

3.6.1 Aprovechamiento forestal desde un enfoque dendroecológico

Los anillos de crecimiento de *Abies religiosa* presentaron el patrón característico de coníferas, con una buena delimitación de madera temprana y madera tardía (Gutiérrez-García & Ricker, 2019), a lo largo de la cronología de 90 años desarrollada (**Figura 3.2**).

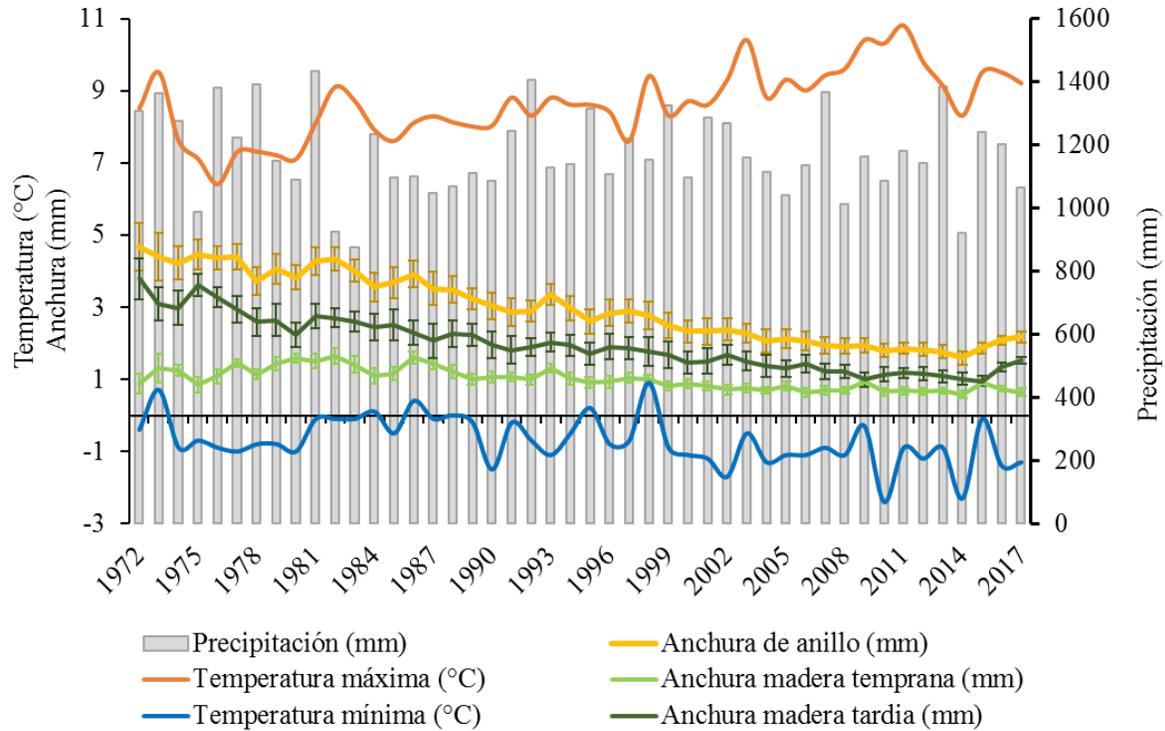


Figura 3.2. Variables climáticas y anchuras de anillos de crecimiento en un bosque de *Abies religiosa*

A lo largo de la cronología la madera tardía presenta mayores anchuras, con respecto a la madera temprana, en el anillo de crecimiento. 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). La producción de madera temprana es consecuencia de los carbohidratos almacenados en temporadas previas a la estación de crecimiento, mientras que la madera tardía se constituye de aquellos formados en el año actual (Downes & Drew, 2008). Una anchura mayor de la madera temprana se ha asociado a sequías (Marín Pompa-García & Domínguez-Calleros, 2015), contrario a las condiciones que ocurren en el bosque de oyamel.

La relación clima-crecimiento indica una asociación negativa de la TMX con la WTR ($r = -0.482$; $p < 0.001$), y una correlación positiva de la TMN con la WTR ($r = 0.446$, $p < 0.001$). Esta respuesta se ha observado en otras coníferas de bosques de alta montaña mexicanos (Correa Díaz et al., 2014; Gutiérrez-García & Ricker, 2019; Marín Pompa-García, Cerano-Paredes, & Fulé, 2013).

Se encontró que la WTR 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, Benz, & Pederson, 2012; Vernon, Sherriff, van Mantgem, & Kane, 2018), en el presente estudio se presentó un aumento de 42.4% en la WTR posterior al aprovechamiento forestal.

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 & Hubert, 2002; Mansfield, Parish, Goudie, Kang, & Ott, 2007).

Se ha buscado determinar los efectos sobre el crecimiento radial de cortas de aclareo en plantaciones de *Pinus patula* Schltdl. & Cham., donde la intervención produjo una disminución en la WTR, pero no influyó sobre la densidad básica de la madera, ya que la variación en densidad generalmente se presenta en los primeros años de edad (Goche-Télles et al., 2003). En rodales de la misma especie (naturalmente regenerados), el aclareo ocasionó un aumento en la WTR y de WEW, una reducción en la WLW, 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 & 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).

3.6.2 Aprovechamiento forestal desde un enfoque dendroanatómico

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 grandes traqueidas para maximizar la eficiencia hidráulica (madera temprana) (Cuny & 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 consecuencia 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 (Martinez-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. A diferencia de estudios basados en mediciones manuales a lo largo de una sección transversal donde se miden un número reducido de células, en el presente estudio se midieron entre centenas y miles de traqueidas por año en 80 núcleos de crecimiento.

Las características anatómicas de la madera tardía de *Abies religiosa* presentaron correlaciones positivas con TMX (WCW $r= 0.310$, $p < 0.001$; TLL $r= 0.425$, $p < 0.001$) y negativas con la TMN (WCW $r= -0.255$, $p < 0.001$; TLL $r= -0.417$, $p < 0.001$). En la **Figura 3.3** se presentan los perfiles de microdensidad convencionales y los patrones de TLL y WCW de las traqueidas de la madera tardía.

El aprovechamiento forestal en rodales de *Abies religiosa* originó una disminución de 8.02% en el WCW, mientras que la TLL aumentó en 29.84% de longitud después de la intervención. El WCW difirió significativamente después de la intervención ($F = 300.44$; $g.l. = 25599$; $p \leq 0.0001$). Del mismo modo la TLL se modificó después del aprovechamiento ($F = 195.98$; $g.l. = 25599$; $p \leq 0.0001$). El WCW de la traqueida 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 *Abies religiosa* se inicie en agosto y, por lo tanto, el grosor esté determinado por la cantidad de carbohidratos disponibles (Bernal Salazar & Terrazas, 2000).

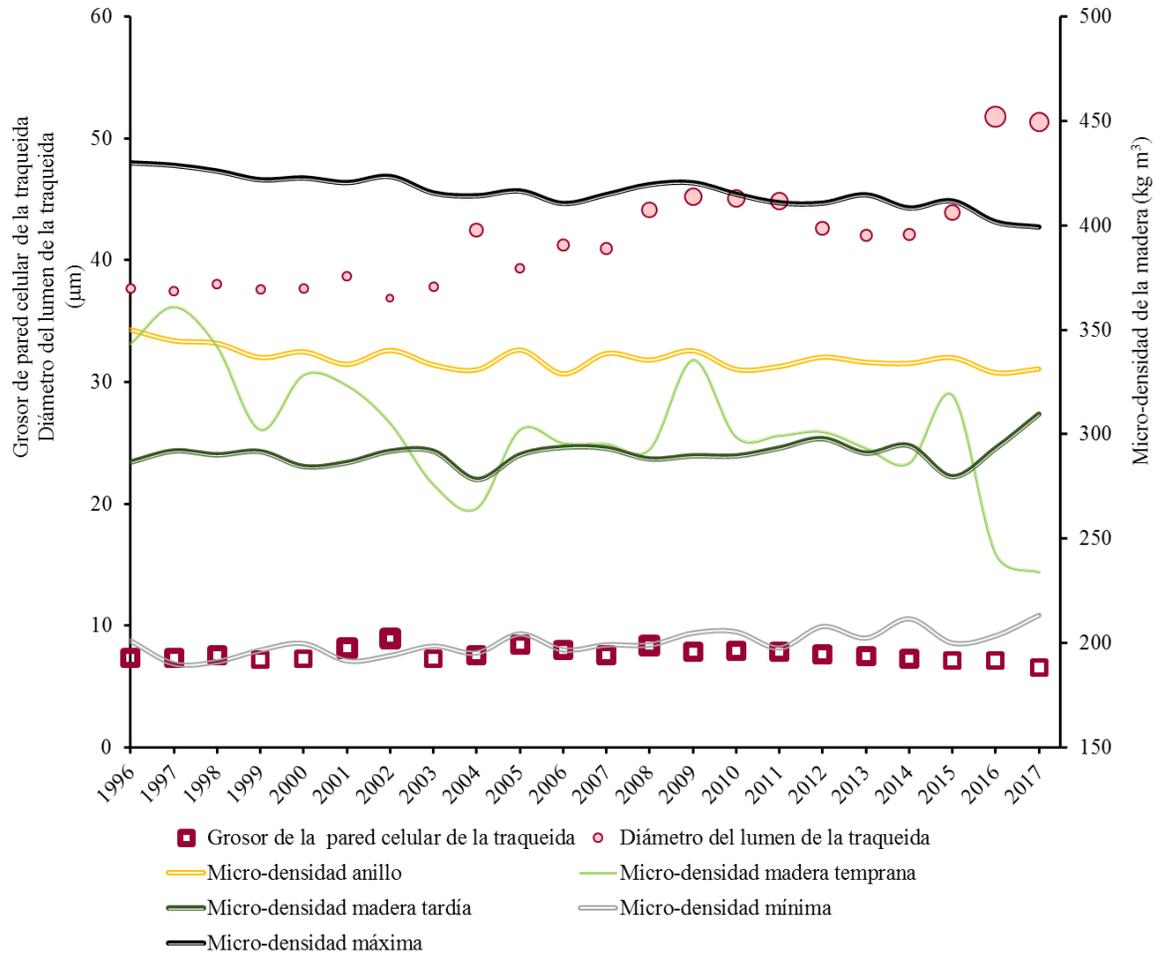


Figura 3.3. Cronologías de las traqueidas de madera tardía de árboles remanentes después del aprovechamiento forestal en rodales de *Abies religiosa* y su relación con perfiles de microdensidad.

Las fluctuaciones en el número, TLL y el WCW producidas por el cambium se imprimen en perfiles de microdensidad de madera (Wilkinson, Ogee, Domec, Rayment, & Wingate, 2015) (**Cuadro 3.2**). La microdensidad de *Abies religiosa* resultó en $189 \pm 0.002 \text{ kg m}^{-3}$ como valor mínimo, $417 \pm 0.001 \text{ kg m}^{-3}$ como valor máximo, y un valor promedio de $0.335 \pm 0.001 \text{ kg m}^{-3}$, para series de 90 años en 80 núcleos de crecimiento. Estos valores son cercanos a los obtenidos para la misma especie en muestras macroscópicas de madera (Rojas-García & Villers Ruiz, 2008). La reducción del AB en el rodal de *Abies religiosa* 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).

Cuadro 3.2. Relación de las con las características anatómicas de *Abies religiosa* con los valores de microdensidad de la madera ($p \leq 0.001$).

Variable	Microdensidad (kg m^{-3})				
	Anillo [TRD]	Madera temprana [EWD]	Madera tardía [LWD]	Anillo máxima [MXD]	Anillo mínima [MND]
Grosor de la pared celular de la traqueida [WCW] (μm)	n.s	n.s.	-0.110	n.s	0.164
Longitud del lumen de la traqueida [TLL] (μm)	-0.715	-0.715	0.157	0.718	0.718

n.s. = no significativo

La densidad de la madera está asociada con la anatomía de la madera, la evidencia demostró que se incrementó la proporción de TLL/WCW y, por lo tanto, la madera es más permeable para el transporte de agua (Martinez-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, Nabais, Freitas, & Gutiérrez, 2007; Rigling, Waldner, Forster, Bräker, & Pouttu, 2001). Esta información es relevante para modelar la mortalidad ante cambio climático de las especies vulnerables a eventos de sequía.

El aumento de la TLL y reducción del WCW en la madera tardía de la madera de *Abies religiosa* se expresó en una disminución de la EWD del 9.3%, y de la MXD del 1.82%, así como un aumento de la MND del 1.8% (**Figura 3.3**). Estas modificaciones en la densidad de la madera tienen un origen anatómico, que generalmente producen un mayor volumen de madera con menor densidad (Camarero & Gutiérrez, 2017; Livingston, Cameron, Petty, & Lee, 2004), con implicaciones en una reducción en las capacidades de almacenamiento de biomasa y carbono del bosque (Padmakumar et al., 2018). Sin embargo, existen algunos casos excepcionales en los que se produjo una mayor densidad de madera con una mayor tasa de crecimiento, tendencia relacionada con el crecimiento de madera juvenil (Rossi, Cairo, Krause, & Deslauriers, 2014).

La medición de WCW y TLL, permitió determinar la presencia de variaciones anatómicas intra-anillo en la madera tardía de los árboles remanentes después del aprovechamiento forestal. 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 (García 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 acompañado de baja humedad relativa haya generado una huella fisiológica en los árboles remanentes. Los canales traumáticos fechados en 2014 tienen un diámetro medio de $207.694 \pm 7.978 \mu\text{m}$. García 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*.

3.7 CONCLUSIONES

El aprovechamiento forestal en un bosque de *Abies religiosa*, con una reducción de poco más del 50% de AB, resultó en un incremento de hasta un 42.4% en la anchura de los anillos de crecimiento en la madera de los arboles remanentes.

El análisis anatómico de los anillos de crecimiento posteriores a la intervención, ocasionó una reducción en el grosor de la pared celular de las traqueidas y un incremento en los lúmenes de las mismas, 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 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.

3.8 REFERENCIAS

- Abrams, M. D., & Hock, W. K. (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. doi: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, 449-458. doi:10.1093/forestry/cpu005
- Babst, F., Alexander, M. R., Szejner, P., Bouriaud, O., Klesse, S., Roden, J., . . . Trouet, V. (2014). A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle. *Oecologia*, 176(2), 307-322. doi:10.1007/s00442-014-3031-6
- Beeckman, H. (2016). Wood Anatomy and Trait-Based Ecology. *IAWA Journal*, 37(2), 127-151. doi:10.1163/22941932-20160127
- Bernal Salazar, 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.
- Bernal Salazar, S., Terrazas, T., & Alvarado, D. (2004). Impact of air pollution on ring width and tracheid dimensions in *Abies religiosa* in the Mexico City basin. *IAWA Journal*, 25(2), 205-215. doi:10.1163/22941932-90000361
- Björklund, J., Seftigen, K., Fonti, P., Nievergelt, D., & von Arx, G. (2020). Dendroclimatic potential of dendroanatomy in temperature-sensitive *Pinus sylvestris*. *Dendrochronologia*, 60. doi:10.1016/j.dendro.2020.125673
- Brower, L., Castilleja, G., Peralta, A., López-García, J., Bojorquez-Tapia, L., Díaz, S., . . . Missrie, M. (2002). Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the Monarch butterfly in México, 1971–1999. *Conservation Biology*, 16 346–359. Retrieved from https://www.fs.fed.us/wildflowers/pollinators/Monarch_Butterfly/documents/quantitative_changes_forest_quality.pdf
- 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.
- Camarero, J. J., & Gutiérrez, E. (2017). Wood density of silver fir reflects drought and cold stress across climatic and biogeographic gradients. *Dendrochronologia*, 45, 101-112. doi: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. doi:10.1051/forest:2006107
- Castellanos Bolaños, J., Treviño Garza, E. J., Aguirre Calderón, O. A., Jiménez Pérez, J., & Velázquez Martínez, 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.
- CONAGUA. (2020). Proyecto Bases de Datos Climatológicos del Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua [México]. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx>

- Correa Díaz, A., Gómez Guerrero, A., Villanueva Diaz, J., Castruita-Esparza, L., Martínez Trinidad, T., & Cervantes, R. (2014). Análisis dendroclimático de ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el Centro de México. *Agrociencia*, 48, 537-551.
- Cuny, H. E., & Rathgeber, C. B. (2016). Xylogenesis: Coniferous Trees of Temperate Forests Are Listening to the Climate Tale during the Growing Season But Only Remember the Last Words! *Plant Physiol*, 171(1), 306-317. doi:10.1104/pp.16.00037
- Downes, G. M., & Drew, D. (2008). Climate and growth influences on wood formation and utilisation. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 70(2), 155-167. doi:10.2989/south.For.2008.70.2.11.539
- Downes, G. M., Wimmer, R., & Evans, R. (2002). Understanding wood formation: gains to commercial forestry through tree-ring research. *Dendrochronologia*, 20(1-2), 37-51. doi:10.1078/1125-7865-00006
- 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. doi:10.1016/j.foreco.2012.07.047
- Fritts, H. (2001). *Tree rings and climate*. London: The Blackburn Press.
- García Cuevas, X., Herrera Ávila, V., Hernández Ramos, J., García Magaña, J. J., & Hernández Ramos, A. (2016). Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 95-103. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n37/2007-1132-remcf-7-37-00095.pdf>
- García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepppe*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García Esteban, L., & De Palacios, P. (2009). Comparative wood anatomy in Abietoideae (Pinaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 160, 184-196.
- García 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. doi:10.1163/22941932-90000217
- 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 Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 6(1), 83-92.
- 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.
- Guay, R., Gagnon, R., & Morin, H. (1992). A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera. *The Forestry Chronicle*, 68(1), 138-141. doi:10.5558/tfc68138-1
- 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. doi:10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676

- Hernández López, A., Martínez Reyes, M., Vargas Hernández, J., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, 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 Ciencia Forestal en México*, 21(80), 39-55.
- Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10150/261223>
- IAWA_Committee. (2004). IAWA list of microscopic features for softwood identification. 1 25: 1–70. *IAWA Journal*, 25(1), 1-70. Retrieved from https://www.iawa-website.org/uploads/soft/Abstracts/01_IAWA-Softwood_List.pdf
- Johansen, D. (1940). *Plant microtechnique*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Jozsa, L., & Middleton, G. (1994). *A discussion of wood quality attributes and their practical implications*. Vancouver, BC, Canada: British Columbia Partnership Agreement on Forest Resource Development - FRDA II, Forintek Canada Corporation.
- Lanza, M., Chartier, M., & Marcora, P. (2018). Relación clima-crecimiento radial de *Polylepis australis* en un gradiente altitudinal en las Sierras Grandes de Córdoba, Argentina. *Ecología Austral*, 28, 278-290. doi:10.25260/EA.18.28.1.1.620
- Livingston, A. K., Cameron, A. D., Petty, J. A., & Lee, S. L. (2004). Effect of growth rate on wood properties of genetically improved Sitka spruce. *Forestry*, 77(4), 325–334. doi: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, 107–138. doi:10.1093/forestry/75.2.107
- Mansfield, S. D., Parish, R., Goudie, J. W., Kang, K.-Y., & 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. doi:10.1139/x06-299
- Martinez-Meier, A., Fernández, M. E., Dalla-Salda, G., Gyenge, J., Licata, J., & Rozenberg, P. (2015). Ecophysiological basis of wood formation in ponderosa pine: Linking water flux patterns with wood microdensity variables. *Forest Ecology and Management*, 346, 31-40. doi:10.1016/j.foreco.2015.02.021
- Mitchell, A. (2005). *La Guía de ESRI para el análisis SIG (Version 2)*. Madrid: ESRI Press.
- 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. doi:10.1051/forest:2001003
- Padmakumar, B., Sreekanth, N. P., Shanthiprabha, V., Paul, J., Sreedharan, K., Augustine, T., . . . Thomas, A. P. (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. doi:10.3832/ifor2190-011
- Pompa-García, M., Cerano-Paredes, J., & Fulé, P. Z. (2013). Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia*, 31(3), 198-204. doi:10.1016/j.dendro.2013.05.003

- Pompa-García, M., & Domínguez-Calleros, P. A. (2015). Respuesta de madera temprana y tardía a la sequía en una conífera mexicana bajo dos condiciones ecológicas. *Ecosistemas*, 24(2). doi:10.7818/ecos.2015.24-2.06
- Prendin, A. L., 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 Physiol*, 37(7), 976-983. doi: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. doi:10.1016/j.dendro.2014.07.003
- Pumijumng, N., Eckstein, D., & Park, W.-K. (2001). Teak tree-ring chronologies in Myanmar: a first attempt. *Palaeobotanist*, 50, 35-40. Retrieved from http://14.139.63.228:8080/pbrep/bitstream/123456789/907/1/PbV50N1_35.pdf
- Regent-Instruments-Canada. (2016a). WinCELL 2016 for tree-ring analysis (Version 2016). Canadá: Regent Instruments Canada Inc. Retrieved from <http://www.regentinstruments.com/>
- Regent-Instruments-Canada. (2016b). WinDENDRO 2016a for tree-ring analysis (Version 2016B). Canadá: Regent Instruments Canada Inc. Retrieved from <http://www.regentinstruments.com/>
- Rigling, A., Waldner, P. O., Forster, T., Bräker, O. U., & 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. doi:10.1139/x00-126
- Rojas-García, F., & Villers Ruiz, L. (2008). Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México*, 33(104), 59-86.
- Rossi, S., Cairo, E., Krause, C., & Deslauriers, A. (2014). Growth and basic wood properties of black spruce along an alti-latitudinal gradient in Quebec, Canada. *Annals of Forest Science*, 72(1), 77-87. doi:10.1007/s13595-014-0399-8
- Rozenberg, P., Franc, A., Commère, P., Schermann, N., & Bastien, J.-C. (1997). *Height growth, wood density and dry fibre weight of four 33 year-old Douglas-fir provenances* Paper presented at the Timber Management Towards Wood Quality and End-Product Value, Vancouver, Canada.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98-106. doi:10.1016/j.foreco.2012.03.004
- Sotelo-Ruiz, E., González Hernández, A., Cruz Bello, G., Moreno Sánchez, F., & Cruz Cárdenas, G. (2011). Los suelos del Estado de México y su actualización a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2006. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 71-84. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000600007
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An Introduction to Tree-Ring Dating 2nd ed.* USA: University of Chicago Press.

- 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*, XXVI(1). doi:10.5154/r.rchscfa.2018.09.064
- van Leeuwen, M., Hilker, T., Coops, N. C., Frazer, G., Wulder, M. A., Newnham, G. J., & Culvenor, D. S. (2011). Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review. *Forest Ecology and Management*, 261, 1467-1478. doi:10.1016/j.foreco.2011.01.032
- Vernon, M. J., Sherriff, R. L., van Mantgem, P., & Kane, J. M. (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. doi:10.1016/j.foreco.2018.03.043
- Wilkinson, S., Ogee, J., Domec, J. C., Rayment, M., & Wingate, L. (2015). Biophysical modelling of intraring variations in tracheid features and wood density of *Pinus pinaster* trees exposed to seasonal droughts. *Tree Physiology*, 35(3), 305-318. doi: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. doi:10.1139/x91-053
- Zobel, B., & Sprague, J. (1998). *Juvenile wood in forest trees*. Berlín: Springer-Verlag.
- Zobel, B., & Talbert, J. (1984). *Applied Forest Tree Improvement*. New York, USA: John Wiley & Sons.

CONCLUSIONES GENERALES

La disciplina dendrocronológica y sus incipientes sub-disciplinas brindan técnicas para analizar el crecimiento radial arbóreo desde diferentes niveles de aproximación: paisaje—rodal—árbol individual—anillo de crecimiento—célula del xilema.

Se analizó el efecto de una corta de saneamiento (2016) sobre el crecimiento radial del arbolado residual de *Pinus hartwegii*. A nivel rodal se presentaron cambios estructurales en la disposición de los individuos en diferentes estratos de dosel, y distribución de individuos entre las clases de diámetro. A nivel de árbol individual, se encontró una respuesta favorable a la intervención, con un aumento significativo del incremento de área basal (IAB) explicado por una disminución de la competencia. Los árboles remanentes ubicados en la vecindad entre 2.6 y 5 m con respecto al tocón registraron los mayores incrementos de área basal. A nivel anillo de crecimiento la estandarización de las anchuras de anillos de crecimiento con el IAB, permitió identificar que, al comparar con el registro previo al saneamiento forestal, este aumentó significativamente en los árboles remanentes alrededor del tocón.

El saneamiento forestal de los bosques de *Pinus hartwegii* en el Eje Volcánico Transmexicano trae consigo un aumento en el crecimiento de los árboles remanentes, por ello puede ser un aliado en la restauración de estos ecosistemas.

Se evaluó el efecto de un aprovechamiento (2014) forestal sobre la formación de madera en árboles remanentes de *Abies religiosa*. A nivel rodal, una reducción de alrededor del 50% de área basal, cambió el patrón de distribución de los individuos de aleatorio a disperso. A nivel árbol individual, se detectó un incremento de hasta un 42.4% en la anchura de los anillos de crecimiento en la madera de los arboles remanentes. A nivel anillo de crecimiento se presentaron modificaciones en los perfiles de microdensidad de la madera, con un aumento en la densidad mínima y una disminución de la densidad máxima. A nivel de célula del xilema, el análisis anatómico de la madera tardía dilucidó una reducción en el grosor de la pared celular de las traqueidas y un incrementó los lúmenes de las mismas, además se identificó una fila tangencial de canales traumáticos fechada en 2014.

Los árboles pueden sufrir cambios estructurales en la madera resultado de la ejecución de diferentes prácticas de manejo forestal, estas modificaciones podrían tener impactos multiescalares. A nivel de árbol individual, pueden ocurrir cambios fisiológicos en relación a la resistencia de los árboles a las condiciones climáticas adversas durante la estación de crecimiento; a nivel rodal, pueden ocurrir modificaciones en las existencias volumétricas (producción) y la cuantificación de biomasa (productividad).

La investigación dendroecológica tiene un amplio potencial en México al considerar, la diversidad de ecosistemas forestales que presentan especies con anillos de crecimiento, las etapas de sucesión, los estados de conservación y las prácticas de manejo utilizadas. El desarrollo de trabajos dendroecológicos produciría beneficios en la generación de escenarios de incrementos de biomasa forestal y los reservorios de carbono ante problemáticas como la presencia de plagas y enfermedades forestales; así como para el diseño de mejores prácticas de manejo forestal sustentable.