



# Efecto del clima y el manejo forestal en el crecimiento radial de un bosque de coníferas en Puebla, México

## Effect of climate and forest management on radial growth of a conifer forest in Puebla, Mexico

Arian Correa-Díaz<sup>1\*</sup>, José Villanueva-Díaz<sup>2</sup>, Jesús Valentín Gutiérrez-García<sup>1</sup>, Efraín Velasco-Bautista<sup>1</sup>, Francisco Moreno-Sánchez<sup>1</sup> y Bertha Patricia Zamora-Morales<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. Coyoacán, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Gómez Palacio, Durango, México.

\* Autor de correspondencia.  
correa.arian@inifap.gob.mx

### RESUMEN

El efecto combinado del clima y el manejo forestal ha sido poco estudiado en los bosques de México. Este trabajo evaluó como la temperatura, precipitación y evaporación afectan el crecimiento radial de *Pinus patula* bajo dos métodos de manejo silvícola (Método de Desarrollo Silvícola–MDS, y Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares–MMOBI) y un sitio de referencia sin manejo. Se recopilaron datos dendrocronológicos a nivel árbol en 34 sitios de 1000 m<sup>2</sup>, correlacionándolos con información climática diaria. Las series dendrocronológicas se transformaron en incremento en área basal (IAB, cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>), y se modelaron mediante modelos mixtos. La precipitación fue la variable con mayor influencia en el crecimiento ( $r = 0.73$ , enero 13 a mayo 28) mientras que la temperatura mínima la menor ( $r = 0.37$ , marzo 01 a marzo 22). La temperatura máxima ( $r = -0.58$ , abril 04 a mayo 15) y la evaporación presentaron efectos negativos ( $r = -0.67$ , abril 02 a junio 30). El IAB más alto se observó en MMOBI ([15.9 ± 0.44] cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>), seguido de MDS ([13.0 ± 0.50] cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>) y Referencia ([11.0 ± 0.80] cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). El modelo mixto incluyó el método de manejo, área basal, densidad arbórea, precipitación y evaporación ( $R^2_{\text{marginal}} = 0.46$  y  $R^2_{\text{condicional}} = 0.70$ ). El arbolado de referencia, si bien ha mantenido su ritmo de crecimiento, está por debajo de aquellos con manejo. Incorporar información dendrocronológica a la silvicultura permite evaluar con mayor detalle la respuesta de los árboles ante perturbaciones climáticas y de manejo forestal.

PALABRAS CLAVE: anillos de crecimiento, cambio climático, dendroecología, incremento en área basal, modelos mixtos, *Pinus patula*.

### ABSTRACT

The combined effect of climate and forest management has not been studied widely in Mexican forests. This study evaluated how temperature, precipitation, and evaporation affect the radial growth of *Pinus patula* under two silvicultural management methods (Silvicultural Development Method–MDS, and the Mexican Method of Irregular Forest Management–MMOBI) and an unmanaged reference site. Dendrochronological data were collected at the tree level from 34 fixed-dimension sites (1000 m<sup>2</sup>), correlating them with daily climatic information. The dendrochronological series were transformed into basal area increment (BAI, cm<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>) and modeled using mixed-effects models. Precipitation was the variable with the greatest influence on growth ( $r = 0.73$ , January 13 to May 28), while minimum temperature had the least impact ( $r = 0.37$ , March 01 to March 22). Maximum temperature ( $r = -0.58$ , April 04 to May 15) and evaporation showed negative effects ( $r = -0.67$ , April 02 to June 30). The highest BAI was observed in MMOBI ([15.9 ± 0.44] cm<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>), followed by MDS ([13.0 ± 0.50] cm<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>) and the reference site ([11.0 ± 0.80] cm<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>). The mixed-effects model included management method, basal area, tree density, precipitation, and evaporation ( $R^2_{\text{marginal}} = 0.46$  y  $R^2_{\text{condicional}} = 0.70$ ). Although the reference forest has maintained its growth rate, it remains below that of managed forests. Incorporating dendrochronological information into silviculture allows for a more detailed assessment of individual tree responses to climatic disturbances and forest management.

KEYWORDS: tree rings, climate change, dendroecology, basal area increment, mixed models, *Pinus patula*.

## INTRODUCCIÓN

*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. es una conífera endémica de México con gran importancia económica dentro del sector forestal. Diversos estudios se han realizado en torno a esta especie, principalmente aquellos relacionados con la estimación de biomasa y contenido de carbono (Díaz-Franco et al., 2016; Figueroa-Navarro et al., 2019; Ortiz-Reyes et al., 2024), crecimiento y volumen aprovechable (Santiago-García et al., 2013; Santiago-García et al., 2016), variación genética y ambiental (Salaya-Domínguez et al., 2012), efecto de tratamientos silvícolas (Rodríguez-Ortíz et al., 2011; Chávez-Aguilar et al., 2022), entre otros. Sin embargo, a la fecha son muy limitados los estudios dendrocronológicos y el uso de la información de anillos de crecimiento para esta especie en México (Hernández-López et al., 1996; Quezada-Rivera, 2013; Cervantes-Martínez et al., 2019). Esto a pesar de su potencial en este país y Latinoamérica, donde se ha introducido como especie exótica debido a su rápido crecimiento (Ortega-Rodríguez, 2014).

La dendrocronología es la ciencia que se encarga de estudiar el desarrollo de los anillos de crecimiento de especies arbóreas y su relación con diversas características extrínsecas (e.g., clima) e intrínsecas (e.g., manejo forestal) (Fritts, 1976). A pesar de la inherente valía de la dendrocronología en el manejo forestal, debido a la generación de información relacionada con el crecimiento, incremento de volúmenes de madera, tiempos de paso, biomasa, fijación de CO<sub>2</sub> y evaluación de tratamientos silvícolas, son pocas las investigaciones que han abordado esta potencialidad en México (Rojas-García et al., 2020).

Para el año 2021, el mercado del sector forestal en México ascendió a un valor de USD  $2470 \times 10^6$  (2470 millones de dólares estadounidenses), colocándolo en el segundo mercado más atractivo de América Latina (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2022). En el 2018, la industria forestal registró 13 971 autorizaciones bajo manejo forestal, siendo las entidades más relevantes: Michoacán (201), Jalisco (1827) y Puebla (1574) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat],

2021). Particularmente en el estado de Puebla, la superficie forestal de coníferas con potencial comercial para el aprovechamiento de recursos maderables es de 190 000 ha, de las cuales cerca de 50% cuentan con un programa de manejo forestal autorizado. De esta área bajo manejo, 65% emplea el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), mientras que el resto de la superficie involucra cortas selectivas como el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) (Semarnat, 2021). En la región de Chignahuapan, Puebla, se desarrolla una destacada actividad forestal, con varios ejidos dedicados a la explotación de recursos maderables y no maderables. Esta actividad desempeña un papel crucial en el desarrollo económico local, posicionando a Chignahuapan como el principal productor de madera de *P. patula* en el estado, contribuyendo significativamente a la economía regional (Salinas-Cruz et al., 2017). Sin embargo, a la fecha se tiene un desconocimiento del papel que ejerce el clima en el crecimiento de *P. patula* en la zona, además del efecto de los diferentes métodos de manejo silvícolas a lo largo de las últimas décadas.

Dado que los bosques bajo manejo pueden ser utilizados como fuentes de información forestal estratégica, al incorporar tanto la señal generada por el manejo forestal como la influencia del clima. Este estudio plantea las siguientes hipótesis: i) la señal climática dependerá de la intensidad de manejo, por lo que los métodos silvícolas de alta intensidad (e.g., MDS) registrarán una menor influencia climática en sus anillos de crecimiento en comparación con métodos de baja intensidad (MMOBI), o sin manejo (Referencia); y ii) su modelación estadística a nivel árbol permitirá determinar el efecto de los tratamientos silvícolas en los ritmos de crecimiento de la especie a través del tiempo.

## OBJETIVOS

Los objetivos de esta investigación fueron: i) evaluar la influencia de temperatura, precipitación y evaporación en el ritmo de crecimiento radial de *Pinus patula* bajo dos métodos de manejo silvícola (Método de Desarrollo Silvícola- MDS



y Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares – MMOBI) y un sitio testigo sin manejo (Referencia); y ii) identificar diferencias en las tasas de crecimiento radial a nivel de método de manejo y tratamientos silvícolas, mediante su modelación estadística.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el ejido Emiliano Zapata, ubicado en Chignahuapan, Puebla, México (19°42'30" latitud norte, -98°2'30" longitud oeste). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, caracterizado por una precipitación anual de 665 mm y temperatura media de 13.4 °C. El área se caracteriza por presentar bosques templados dominados por coníferas como *Pinus patula* Schl. et Cham, *Pinus ayacahuite* Ehren. ex Schltl. y *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. et Chamen (Lazcano-Hernández, 2006). Los suelos se clasifican como luvisoles, los cuales poseen una textura franca a franco arenosa, alta porosidad, un pH ligeramente ácido y un contenido de materia orgánica que oscila entre 6% y 7.2% (Galicia et al., 2015).

### Selección de unidades de muestreo

A partir de la revisión cartográfica del programa de manejo forestal maderable (PMFM) vigente del ejido (Unión de Ejidos de Producción, Explotación, Comercialización, Industrialización Agropecuaria y Forestal de la Sierra Norte de Puebla [Uepeciafsnp], s/f), se diseñó un esquema de muestreo sistemático utilizando unidades circulares de 1000 m<sup>2</sup>, separadas por una distancia equidistante de 100 m. En total, se seleccionaron 34 sitios en áreas de aprovechamiento forestal dominadas por *Pinus patula* (Fig. 1). Estos sitios, con características ecológicas homogéneas, se distribuyeron en 11 rodales con dos métodos de manejo (MDS y MMOBI) y uno de referencia (Referencia), el cual no ha sido intervenido en las últimas décadas (Tabla 1). En total se seleccionaron 16, 13 y 5 sitios circulares, para MMOBI, MDS y Referencia, respectivamente. Para MMOBI, se evaluó el tratamiento silvícola de cortas de selección,

mientras que para MDS, se consideraron cortas de aclareo, liberación y regeneración. Dado que no todos los tratamientos se aplicaron en la misma anualidad, esta se subdividió en rodales.

### Muestreo y fechado dendrocronológico

En cada sitio de 1000 m<sup>2</sup>, considerando todos los individuos registrados, se seleccionaron cuatro árboles representativos con base en su altura y diámetro. A la altura del diámetro normal (DN), se extrajeron dos núcleos de crecimiento por árbol utilizando un taladro Pressler de 5.1 mm de diámetro. Dado que en los sitios bajo manejo por MDS, la estructura fue homogénea; en los sitios bajo MMOBI y de referencia, la selección se enfocó en árboles maduros representativos de las condiciones del sitio, incluyendo al menos un individuo de categoría juvenil (DN mínimo de 20 cm) por sitio de dimensiones fijas.

El tamaño de muestra se integró por 136 árboles de *P. patula*, evitando aquellos enfermos, plagados o con problemas de crecimiento. Las muestras dendrocronológicas fueron secadas, montadas, y pulidas con diversos grados de lija en el Laboratorio Nacional de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera [Cenid Raspa], perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [Inifap], ubicado en Gómez Palacio, Durango. La medición del grosor de los anillos de crecimiento (anillo total) se realizó con un sistema de medición Velmex (resolución 0.001 mm). La calidad del fechado fue evaluada con el software COFECHA, al correlacionar sucesivamente segmentos de 50 años en los crecimientos radiales con traslapes de 25 años, y una intercorrelación entre series mínima de 0.3281 ( $p < 0.01$ ) (Holmes, 1983).

### Determinación del incremento en área basal e índice de ancho de anillo

Posterior al fechado, las series de crecimiento se estandarizaron utilizando una curva tipo *Spline* para calcular índices de ancho de anillo (IAA), utilizando el paquete dplR en R (Bunn, 2008). El proceso de estandarización es

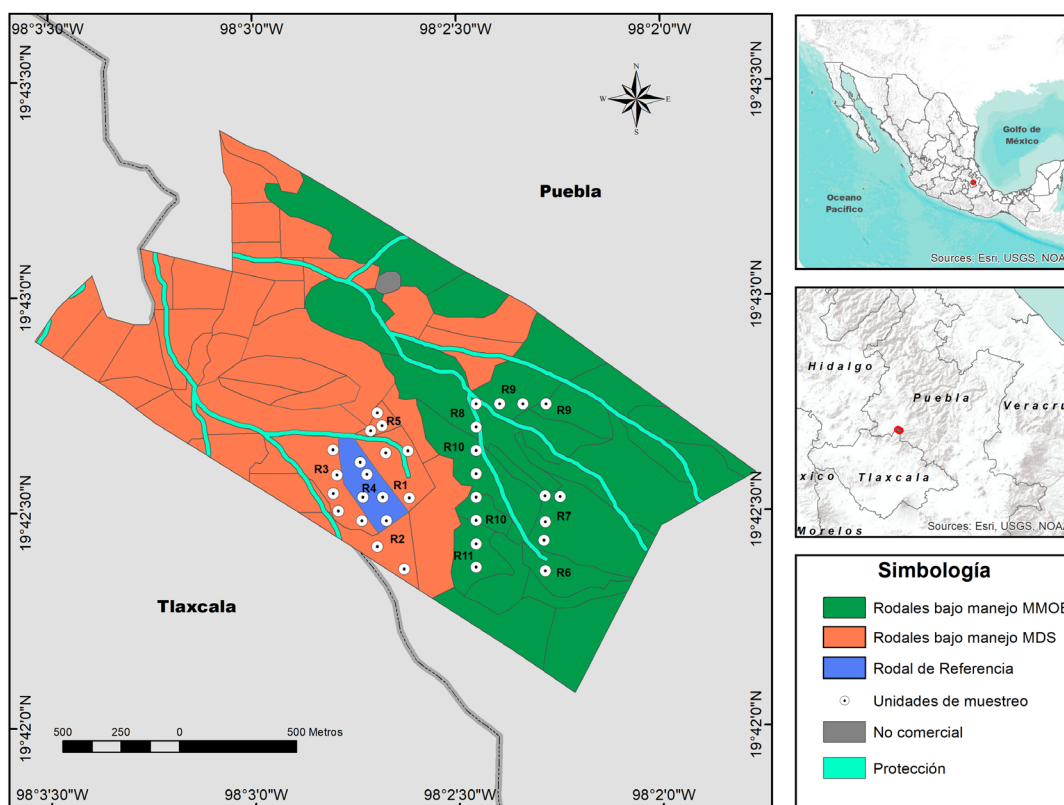


FIGURA 1. Ubicación de los sitios circulares de 1000 m<sup>2</sup> para el muestreo dendrocronológico dentro del ejido Emiliano Zapata, Chignahuapan, Puebla.

La letra R indica los rodales descritos en la tabla 1.

TABLA 1. Características dasométricas de los sitios evaluados en el ejido Emiliano Zapata, Chignahuapan, Puebla.

Método de manejo	Tratamiento silvícola	Número de sitios	Rodal	Anualidad	Área basal promedio (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Densidad arbórea (ha <sup>-1</sup> )	Volumen <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
MDS	Liberación	5	R3	2014-2015	18.2	424	161.6
	Regeneración	3	R5	2014-2015	25.1	661	236
	Aclareo_1	3	R1	2016-2017	27.1	513	321
	Aclareo_2	2	R2	2017-2018	39.5	337	474.1
MMOBI	Selección_1	2	R11	2019-2020	21.7	235	202.1
	Selección_2	4	R10	2020-2021	25.9	351	285.3
	Selección_3	4	R7	2016-2017	26.2	473	329.7
	Selección_4	3	R9	2018-2019	32.1	315	399.5
	Selección_5	2	R8	2021-2022	38.1	487	452.5
	Selección_6	1	R6	2017-2018	45.2	680	498.5
Referencia	Sin manejo	5	R4	NA	18.7	402	187.9

<sup>1</sup>Calculado con base en las ecuaciones de volumen establecidas en el programa de manejo. Los tratamientos están ordenados de menor a mayor volumen y área basal de acuerdo con el método de manejo.



necesario para eliminar efectos de edad, geométricos, competencia, entre otros conocidos como ruido, que no son de interés para el investigador. Para determinar las tasas de crecimiento radial, se calculó el incremento en área basal (IAB). El IAB es indicador temporal de la productividad forestal ( $\text{cm}^2 \text{año}^{-1}$ ), calculado a nivel árbol, de acuerdo con la siguiente fórmula:

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

donde:

$R$  = radio del fuste (cm)

$n$  = año de formación del anillo

Finalmente, los valores de IAB fueron agrupados a escala de árbol, sitio, rodal, tratamiento silvícola o método de manejo, de acuerdo con el análisis estadístico realizado.

### Información climática y su relación con el crecimiento radial

Se utilizó información del Sistema de Información Hidrológica proporcionado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) para obtener datos diarios del área de estudio en el periodo de 1973 a 2023. Los datos se obtuvieron de cinco estaciones en operación con condiciones climáticas similares, ubicadas a una distancia máxima de 28 km de los sitios de muestreo. Las estaciones utilizadas fueron 29032 (Tlaxco, 96.7% datos completos), 29052 (El Rosario, 95.7% datos completos), 29165 (El Epazote, 86.5% datos completos), 21021 (Tetela de Ocampo, 97.5% datos completos) y 21140 (Chignahuapan, 78.6% datos completos). Los datos diarios recopilados incluyeron temperatura (máxima, mínima y promedio), precipitación (milímetro por día) y evaporación (milímetro por día) de cada estación. Para garantizar la calidad de las series de datos meteorológicos, se empleó el paquete *Climatol* (Guijarro, 2019) en R. Este paquete permite la homogenización y el análisis de las series temporales climáticas, además de la corrección de errores e interpolación de datos faltantes (Addou et al., 2022).

Para evaluar la influencia de las variables climáticas registradas diariamente en el crecimiento radial de *P. patula*,

se utilizó el paquete *dendrotools* de R (Jevšenak y Levanič, 2018). Este paquete permite calcular una matriz de correlaciones considerando una ventana móvil de datos diarios. A diferencia de otros métodos, el paquete está mejor adaptado al crecimiento radial continuo (datos diarios vs datos mensuales), lo que resulta en una selección más precisa de las relaciones entre clima y crecimiento. Para el ancho de la ventana, se establecieron 21 días y 240 días como límites inferior y superior, respectivamente, lo que significa que el tamaño mínimo de análisis de correlación fue inferior a un mes, mientras que el máximo fue equivalente a 8 meses. Las correlaciones comenzaron desde el día del año (DOY) 240 del año anterior ( $t-1$ ) (finales de agosto) hasta el DOY 300 del año actual ( $t$ ) (finales de octubre). Se utilizó la función de agregación (suma) para la precipitación y evaporación; mientras que para la temperatura se utilizó el promedio. Esto quiere decir que, por ejemplo, para la ventana mínima, se consideró precipitación acumulada de 21 días, mientras que para temperatura se utilizó el promedio. Para mejorar la precisión del análisis y generar intervalos de confianza en el análisis de correlación, el análisis se replicó por método de manejo y tratamiento silvícola considerando un *bootstrap* de 100 veces y un  $\alpha = 0.05$ .

### Diferencia en el crecimiento radial de *P. patula* entre métodos y tratamientos silvícolas

Para evaluar diferencias entre métodos de manejo para el IAB, se construyó un modelo mixto, considerando una estructura de tres niveles. El primer nivel considera las mediciones repetidas en el tiempo por cada árbol de acuerdo con el método de manejo (*e.g.* IAB), seguida de una agrupación espacial (*e.g.* árboles anidados a sitio circular, árboles anidados a rodal y árboles anidados en sitio circular dentro de un rodal) y finalmente covariables a escala de sitio (área basal, densidad arbórea, elevación, pendiente, clima). Para evaluar la multicolinealidad de los factores, se evaluó el factor de inflación de la varianza ( $VIF < 5$ ). Dado que IAB no se distribuyó de manera normal, los datos de IAB se transformaron a logaritmo base natural con el paquete

*bestNormalize* en R (Peterson, 2021). Para modelar la autocorrelación entre mediciones repetidas en el tiempo, se evaluó una estructura AR (covarianza) con diferentes estructuras (potencia, constante o combinación de ambas) (Everitt, 2005). Así mismo, dado que los valores de IAB no suelen comportarse de manera lineal, se incluyó una función *Spline* de orden 2 para modelar su tendencia (Ecuación 2). El mejor modelo fue seleccionado considerando el menor criterio de información de Akaike (AIC) y criterio de información bayesiano (BIC). El análisis estadístico fue realizado en R 4.3.2 (R Core Team, 2023) utilizando el paquete *nlme* (Pinheiro et al., 2018).

$$\log(IAB)_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 \cdot bs(\text{Año}) + \beta_2 \cdot \text{Método} + \beta_3 \cdot (bs(\text{Año}) \cdot \text{Método}) + \beta_4 \cdot \text{Área basal} + \beta_5 \cdot \text{Densidad} + \beta_6 \cdot \text{Pendiente} + \beta_7 \cdot \text{Elevación} + b_{0j} + b_{kj} \cdot \text{Año} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

donde:

$\log(IAB)_{ijk}$  = incremento en área basal transformado logarítmicamente para el árbol  $k$ , en el sitio  $j$ , en el tiempo  $i$

$\beta_1, \dots, \beta_7$  = coeficientes asociados a las variables independientes

$bs(\text{Año})$  = función *Spline* de orden 2 para modelar el comportamiento temporal

$b_{0j}$  = efecto aleatorio del sitio  $j$  (intercepto aleatorio)

$b_{kj} \cdot \text{Año}$  = pendiente aleatoria del año dentro del sitio  $j$  y el árbol  $k$

$\varepsilon_{ijk}$  = error aleatorio asociado a cada observación, modelado con una estructura de correlación AR(1) (dependencia temporal entre los años)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Edad del arbolado

Un total de 131 árboles de *P. patula* fueron datados correctamente, lo que representa 96% del total de las muestras obtenidas (136). La edad promedio del arbolado fue de 36.35 años, sin embargo, la edad máxima fue de 108 años, perteneciente a un árbol ubicado en un sitio de referencia (1916-2023) (Fig. 2). A nivel método, el arbolado más joven se encontró en MDS ( $[27.2 \pm 2.19]$  años) seguido por MMOBI ( $[42.5 \pm 1.0]$  años). Para los tratamientos silvícolas dentro de MDS, las cortas de regeneración tuvieron el arbolado más joven ( $[19.4 \pm 1.08]$  años), mientras que el aclareo, el más longevo ( $[38.4 \pm 4.74]$  años). A escala general, la intercorrelación entre todas las series fue de 0.48, superior al umbral mínimo requerido en estudios dendrocronológicos para un fechado correcto (Speer, 2010).

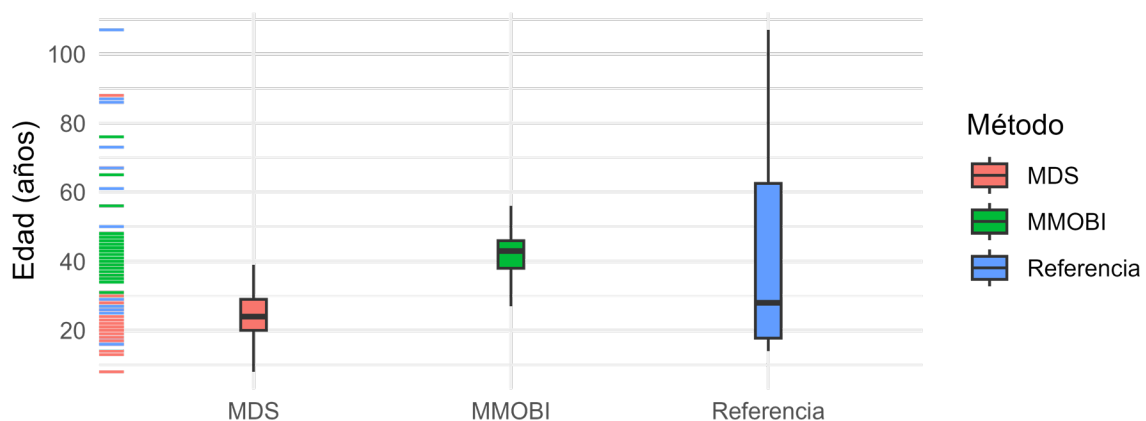


FIGURA 2. Diagrama de edades en el arbolado de *Pinus patula* bajo manejo forestal en el ejido Emiliano Zapata, Chignahuapan, Puebla.



Ortega-Rodríguez (2014), en Perú, señala valores de intercorrelación entre series de 0.69 para la misma especie, lo cual es superior a lo encontrado en este estudio. Esta diferencia posiblemente se deba al hecho de ser plantaciones con una menor edad (25 años), lo que asegura una alta sincronía entre patrones de crecimiento. Es importante destacar que los valores de intercorrelación indican que, aunque este estudio no se centró en la reconstrucción climática, los árboles presentaron una señal común asociada al clima. Este hallazgo no es frecuente en bosques manejados, donde la densidad arbórea, la dinámica forestal y, en general, las condiciones del sitio suelen enmascarar su asociación con el clima (anillos de crecimiento complacientes vs sensitivos) (Fritts, 1976). En este caso, *P. patula*, más allá de ser una especie de rápido crecimiento con interés comercial, muestra una clara sensibilidad al clima.

El potencial para utilizar *P. patula* en estudios dendrocronológicos ha sido documentado por Quezada-Rivera (2013) y Belay (2016), mientras que Rodríguez-Ortíz et al. (2011) y Ortega-Rodríguez (2014) utilizaron información de sus anillos de crecimiento para evaluar efectos de aclareos en el crecimiento radial, lo que resalta la importancia de la dendrocronología en la evaluación del incremento radial de la especie.

### Efecto del clima en el crecimiento

Todas las variables climáticas evaluadas resultaron asociadas con el crecimiento radial de *P. patula*. De manera general, la precipitación fue la variable con mayor influencia positiva ( $r = 0.73$ ) mientras que la temperatura mínima fue la de menor influencia ( $r = 0.37$ ). Esto concuerda con van Zonneveld et al. (2009) y Ortega-Rodríguez (2014), quienes señalan que la precipitación y la temperatura máximas del mes más cálido son las variables climáticas que mejor definen el hábitat natural y crecimiento de *P. patula*. A nivel del método de manejo, MMOBI fue, en su mayoría, el método donde se identificó la mayor señal climática, seguido por el de referencia, y MDS el de menor señal (Tabla 2). Este resultado podría explicarse por las bajas intensidades de corta realizadas en estos rodales, así como las condiciones topográficas, caracterizadas por mayor

elevación y suelos más someros y pedregosos observados en campo, que favorecen la formación de anillos más sensitivos (Fritts, 1976). Esto apoya parcialmente la hipótesis de este trabajo, ya que el arbolado con mayor intensidad de manejo forestal mostró los valores de correlación más baja con el clima.

En MDS, se estimó una densidad arbórea promedio de 502 ha<sup>-1</sup>, mientras que en MMOBI fue de 443 ha<sup>-1</sup>, pero el comportamiento del volumen maderable fue diferente, de tal manera que en MDS, se registraron 248 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> con un área basal de 25 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, en tanto que, en MMOBI el volumen promedio fue 328 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> con 29 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Entonces, en MDS, el volumen promedio por árbol fue de 0.49 m<sup>3</sup> y, en MMOBI, de 0.74 m<sup>3</sup>, es decir, en este, en términos de parámetros forestales agregados, la ocupación del sitio resultó mayor que en el primero. Aun así, conforme a la guía de densidad de *P. patula*, propuesta por Santiago-García et al. (2013), en ambos casos, los árboles se encuentran en el espacio de crecimiento libre sin mortalidad. Reyes-Cortés et al. (2020) sugieren que, en plantaciones de *P. patula*, el espacio disponible para el crecimiento y la competencia entre individuos afectan tanto el crecimiento radial como su relación con factores ambientales.

Para precipitación, el valor más alto de correlación se encontró en MMOBI ( $r = 0.73$ ), representando el periodo de lluvias acumulado de enero 18 a mayo 28, mientras que, en MDS, el valor fue menor ( $r = 0.55$ ), de noviembre 18 del año previo a mayo 20. Esto quiere decir que, la precipitación acumulada del invierno previo hasta la primavera (inicio de estación de lluvias) es fundamental para el crecimiento de *P. patula* en la zona de estudio (Quezada-Rivera, 2013). Este periodo es importante no solo para *P. patula* sino también para otras especies forestales estudiadas en el norte de México (Cerano-Paredes et al., 2009; Stahle et al., 2016). Sin embargo, el hecho de incorporar datos diarios en este estudio permitió determinar con mayor precisión el periodo de alta influencia en el crecimiento radial. Por ejemplo, Quezada-Rivera (2013) en la zona de Tlaxcala-Puebla determinó la precipitación estacional de enero a junio como la más relevante; mientras que en este estudio fue de enero 18 a mayo 28 (Tabla 2). Notablemente,

este periodo representa poco menos de 20% de la precipitación total, lo que implica que, en el área de estudio, más que la precipitación de verano, donde se distribuye la

mayor parte de la precipitación, la humedad al inicio de la estación de crecimiento es esencial para un mayor incremento radial anual para *P. patula*.

TABLA 2. Correlación entre series de crecimiento radial de *Pinus patula* y diferentes variables climáticas.

Método	Precipitación			Temperatura máxima		
	Correlación	Periodo	Longitud (días)	Correlación	Periodo	Longitud (días)
General	0.73	Ene 13 – May 28	136	-0.58	Abr 04 – May 15	42
MDS	0.55	Nov 18* – May 20	185	-0.41	Abr 12 – May 21	40
Aclareo	0.56	Sep 15* – May 11	240	-0.44	Abr 11 – May 20	40
Liberación	0.6	Nov 09* – Jun 23	228	0.45	Oct 03 – Oct 26	24
Regeneración	0.66	Sep 22* – Abr 06	198	-0.47	May 15 – Jun 13	29
MMOBI	<b>0.73</b>	Ene 18 – May 28	131	<b>-0.59</b>	Mar 22 – May 22	62
Referencia	0.6	Dic 15* – May 28	166	-0.48	Abr 27 – May 18	22
		Temperatura mínima		Temperatura promedio		
General	0.37	Mar 01 – Mar 22	22	-0.52	Abr 10 – May 22	43
MDS	-0.46	Jun 01 – Jul 15	25	-0.39	Abr 09 – May 19	41
Aclareo	-0.47	Jun 23 – Jul 14	22	-0.41	Abr 10 – May 21	42
Liberación	0.48	Oct 02* – Oct 29*	28	-0.48	Ene 29 – Feb 19	22
Regeneración	-0.59	Feb 06 – Mar 01	24	-0.55	Feb 05 – Feb 28	24
MMOBI	-0.34	Sep 01 – Sep 21	21	<b>-0.52</b>	Mar 29 – May 18	51
Referencia	0.47	Mar 01 – Mar 23	23	-0.44	Abr 27 – May 17	21
		Evaporación				
General	-0.67	Abr 02 – Jun 30	90			
MDS	-0.51	Abr 04 – Jun 12	70			
Aclareo	-0.45	Abr 07 – Jun 14	69			
Liberación	-0.45	Abr 07 – Jun 14	69			
Regeneración	-0.49	May 15 – Jun 18	35			
MMOBI	<b>-0.66</b>	Mar 31 – Jun 30	92			
Referencia	-0.61	Mar 28 – Jun 28	93			

El periodo señala el máximo valor de correlación estadísticamente significativa encontrado con una ventana mínima y máxima de 21 días y 240 días. Para precipitación y evaporación, el periodo refleja el valor acumulado y, para temperatura, el promedio. En negritas el valor más alto de correlación entre métodos de manejo y testigo.

\* Indica año previo.



En general, la temperatura máxima tuvo una influencia negativa, es decir temperaturas más altas están asociadas a un menor crecimiento, especialmente en MMOBI ( $r = -0.59$ ) durante los meses de marzo a mayo, periodo donde se presentan los valores más cálidos en el año. La temperatura mínima presentó resultados mixtos, ya que mientras para MDS y MMOBI se encontró un efecto negativo,  $r = -0.46$  y  $r = -0.34$ ; para Referencia, fue positivo ( $r = 0.47$ ) (Tabla 2). Sin embargo, esto depende de la estación del año, ya que, por ejemplo, el efecto positivo está asociado con el inicio de la primavera, mientras que el efecto negativo es en verano, donde temperaturas más frescas están asociados a mayores crecimientos. La temperatura promedio, en todos los casos, mostró una correlación negativa, resultando la regeneración como el tratamiento con mayor impacto, cuyo valor fue de  $-0.55$ , en el mes de febrero.

Finalmente, la demanda evaporativa ejerce un importante control negativo sobre el crecimiento de *P. patula* ( $r = -0.67$ ), especialmente desde finales de marzo hasta junio, que suelen ser los meses más calurosos y con menor humedad en el ambiente. Por ejemplo, para MMOBI, la demanda evaporativa del periodo de marzo 31 a junio 30 disminuyó notablemente el crecimiento radial de la especie. Resulta interesante que dentro de los tratamientos silvícolas del MDS; el arbolado localizado en las cortas de regeneración tuvo, para todas las variables climáticas, la señal correlativa más intensa que el determinado en las cortas de liberación, o aclareos; de esta manera, para el caso de la precipitación, la correlación de  $0.66$ , resultó ser la segunda más importante del comportamiento general (Tabla 2).

### Incremento en área basal y su modelación estadística

En promedio, el IAB más alto se encontró en arbolado bajo MMOBI ( $[15.9 \pm 0.44]$  cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>), seguido del correspondiente para MDS ( $[13.0 \pm 0.50]$  cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>) y el valor más bajo de IAB se observó para el sitio de referencia ( $[11.0 \pm 0.80]$  cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). En el análisis entre tratamientos, en MDS, el arbolado perteneciente a las cortas de *Regeneración* tuvo la mayor productividad ( $[18.8 \pm 1.12]$  cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>),

mientras que *Liberación* la menor ( $[9.6 \pm 0.64]$  cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). Las principales diferencias estadísticas entre rodales ( $p < 0.05$ ) fueron entre el grupo de *Liberación* y *Aclareo* de MDS (Rodal 2 al 3) y los de selección de MMOBI (Rodal 9 al 11); así como los rodales 6 y 7 (Fig. 3). Notablemente, existió una alta sincronía en picos máximos y mínimos, por ejemplo, durante el año 2014, la mayor parte de los sitios mostró valores máximos de productividad, posiblemente asociado al tratamiento aplicado y las condiciones ambientales atípicas. La precipitación en ese año (910 mm) fue sustancialmente mayor en comparación con años anteriores (585 mm), lo que resultó en un incremento significativo en la disponibilidad de agua para los árboles. Los datos de precipitaciones registradas en las cinco estaciones evaluadas refuerzan esta hipótesis; entonces, la combinación de condiciones climáticas favorables de un año previo con las intervenciones de manejo forestal, parecen haber creado un ambiente propicio para el incremento sustancial de la productividad de los árboles.

Dentro de la agrupación espacial evaluada en la modelación estadística del IAB (e.g., anidación), se encontró que los mejores modelos correspondieron a árboles anidados dentro de sitio circular y árboles anidados dentro rodal. Sin embargo, el modelo de árboles anidados dentro de sitio mostró un menor AIC en comparación del resto, y, por tanto, fue seleccionado para el modelo final (efectos aleatorios). De igual manera, con base en este estadístico de ajuste (AIC), la estructura de varianza que mejor reflejó la correlación temporal para los datos fue del tipo potencia.

El tiempo (años), el método de manejo, las características intrínsecas del rodal (área basal y densidad arbórea) y las climáticas (precipitación y evaporación) fueron las variables más relevantes para explicar el comportamiento de IAB (efectos fijos). El método de manejo fue un factor importante con diferencias estadísticas entre todos los métodos de manejo ( $p < 0.001$ , Tabla 3). El área basal tuvo un efecto positivo en el crecimiento radial ( $0.354$ ,  $p < 0.001$ ), mientras que la densidad arbórea, negativo ( $-0.001$ ,  $p = 0.012$ ). Por tanto, aquellos rodales con un gran número de árboles están

asociados con valores pequeños de IAB. La remoción de arbolado derivado del manejo forestal suele estimular el crecimiento de la masa forestal residual a escala de rodal; sin embargo, a escala individual, algunos árboles pueden mostrar una respuesta contraria, posiblemente asociada a la ruptura de interacción con otros individuos. Esta información no podría obtenerse sin un análisis dendrocronológico detallado (Trujillo-Martínez et al., 2020).

Notablemente, años con alta precipitación influyen positivamente en el crecimiento radial de *P. patula*, mientras en años secos y de alta demanda evaporativa ocurre un reducido crecimiento (Tabla 3). También es importante mencionar que, en su modelación, los efectos fijos explican alrededor de 50% de varianza, mientras que los aleatorios una proporción del 25%; es decir, existe una variabilidad en el crecimiento de los árboles que es difícil de capturar, al menos con las variables seleccionadas en este estudio.

De la figura 4a se destaca que el arbolado bajo MMOBI presentó una asíntota de máximo crecimiento alrededor de 2010 (alrededor de  $30 \text{ cm}^2 \text{ año}^{-1}$ ), mientras que para MDS, este punto aún no se ha alcanzado; ya que los árboles tanto en regeneración como en liberación aún están en desarrollo. La asíntota observada en MMOBI es semejante a la registrada por autores como Rodríguez-Ortíz et al. (2011) y Santiago-García et al. (2016), quienes señalan que los árboles de *P. patula* llegan a un punto de inflexión en su crecimiento entre los 20 años y los 30 años. Así mismo, el arbolado de referencia, si bien ha mantenido su ritmo de crecimiento, está notablemente por debajo de lo observado con aquellos que presentan un manejo silvícola. La alta capacidad de crecimiento de *P. patula* ha sido documentada con anterioridad; por ejemplo, Figueroa-Navarro et al. (2019) destacan la rápida recuperación de biomasa en rodales con *P. patula* manejados con MDS, lo que denota su alta capacidad de resiliencia.

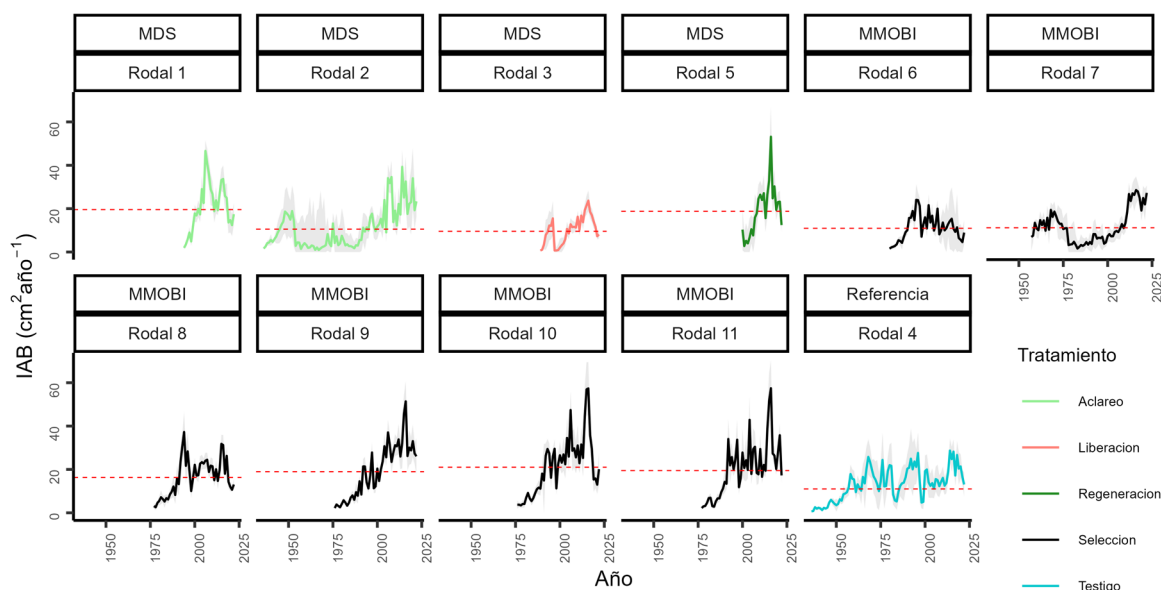


FIGURA 3. Series temporales de incremento en área basal (IAB) dividido por método de manejo (Método de Desarrollo Silvícola- MDS, Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares – MMOBI y referencia (Testigo).

Área gris representa el error estándar entre árboles de un mismo rodal. Línea punteada es el promedio de IAB por rodal.



TABLA 3. Efecto del método de manejo silvícola, características del rodal y del clima en el crecimiento de *Pinus patula* en Chignahuapan, Puebla.

Variable	Coefficiente	Intervalo de confianza	p-value
Año	5.061	4.292 – 5.829	<0.001
Método [MMOBI]	1.853	0.937 – 2.768	<0.001
Método [Referencia]	4.253	3.184 – 5.322	<0.001
Área basal	0.354	0.204 – 0.504	<0.001
Densidad arbórea	-0.001	-0.002 – -0.000	<b>0.012</b>
Pendiente	0.003	-0.010 – 0.017	0.629
Elevación	0.004	-0.001 – 0.009	0.101
Precipitación	0.001	0.001 – 0.002	<0.001
Temperatura máxima	-0.005	-0.013 – 0.003	0.230
Evaporación	-0.001	-0.001 – -0.001	<0.001
<b>Efectos aleatorios</b>			
$\sigma^2$	0.34	R <sup>2</sup> marginal	0.463
T <sub>00</sub> árbol	0.00	R <sup>2</sup> condicional	0.697
T <sub>00</sub> sitio	0.51		
N árbol	126		
N sitio	34		
Observaciones	4228		

Valores en negrita son estadísticamente significativos.

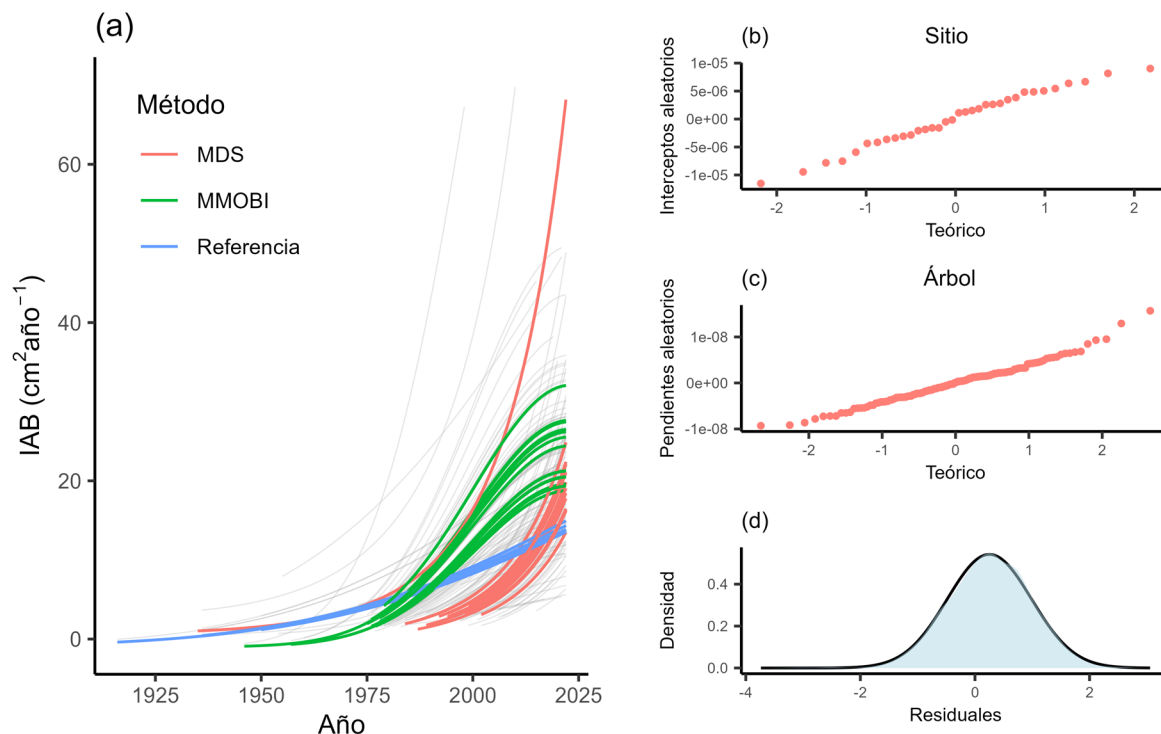


FIGURA 4. (a) Incremento en área basal predicho con el modelo seleccionado en la tabla 3 para los diferentes métodos de manejo.

A diferencia de otros estudios donde se modela el crecimiento radial con curvas como Chapman-Richards o Weibull, el uso de modelos mixtos permite incorporar la autocorrelación temporal y espacial de los datos, la variabilidad inherente a cada árbol analizado y entre grupos de árboles, así como el efecto de covariables de interés (Tabla 3 y Fig. 4). Las variables consideradas dentro del modelo final presentaron un VIF < 4, por lo que no existió problema de multicolinealidad. Así mismo, los interceptos a escala de sitio, pendientes de los árboles y los residuales del modelo tendieron a la normalidad, lo que asegura una correcta interpretación del modelo final (Fig. 4b, c y d).

La importancia de este tipo de estudios en el manejo forestal, incorporando información dendrocronológica, es la de tener indicadores confiables acerca del efecto de diferentes tratamientos silvícolas en conjunto con el efecto del clima sobre los bosques, considerando a la par una perspectiva de cambio climático y resiliencia (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007; Correa-Díaz et al., 2023). Por ejemplo, en los últimos años se han detectado, con mayor frecuencia, evidencia de procesos de declinación forestal, asociados a mortalidad masiva o ataque de plagas y presencia de enfermedades, donde *P. patula* no es la excepción (Sáenz-Romero et al., 2020).

## CONCLUSIONES

Los estudios dendrocronológicos permiten analizar de manera eficiente el desarrollo de las masas forestales a distintas escalas de agregación (árbol, rodal y bosque), identificando no solo los efectos del clima, sino también de los diferentes tratamientos silvícolas en el crecimiento radial. Esto resalta la importancia de una gestión forestal informada a nivel predial. El clima, en particular la precipitación y evaporación, ejerce una fuerte influencia en el crecimiento de *P. patula*, afectando diferencialmente de acuerdo con el método de manejo aplicado. En este sentido, la remoción de arbolado constituye un factor que modifica la relación clima-crecimiento en esta especie. El crecimiento de la especie fue explicado por las variables de área basal, densidad arbórea, precipitación, evaporación y método de

manejo, mediante modelos mixtos que consideran la variabilidad en el comportamiento de los árboles, anidados dentro de cada sitio de muestreo como efecto aleatorio. Finalmente, los rodales sin manejo no solo limitan el crecimiento de madera, como un bien de valor económico, sino también la posible acumulación de biomasa y carbono, lo que reduce su potencial como estrategia de mitigación al cambio climático.

## RECONOCIMIENTOS

Se agradece al ejido Emiliano Zapata, Chignahuapan, Puebla, por las facilidades otorgadas en la fase de campo. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias a través del financiamiento del proyecto “Manejo integrado de recursos forestales para la sustentabilidad de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático”.

## REFERENCIAS

- Addou, R., Hanchane, M., Obda, K., Krakauer, N. Y., El Khazzan, B., Kessabi, R., & Achiban, H. (2022). Monthly precipitation over Northern Middle atlas, Eastern Morocco: Homogenization and Trends. *Applied Sciences*, 12(23), 12496. <https://doi.org/10.3390/app122312496>
- Belay, T. T. (2016). Climate-growth relationship of *Pinus patula* Schldl. et Cham. in Wondo Genet, South Central Ethiopia. *Journal of Climatology and Weather Forecasting* 4(3), 1-8. doi:10.4172/2332-2594.1000181
- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115-124. <https://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola-Ávila, J. G., Sánchez-Cohen, I., & Valdez-Cepeda, R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1521189>
- Cervantes-Martínez, R., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Martínez, G., Villanueva-Díaz, J., Esquivel-Arriaga, G., Cambrón-Sandoval, V. H., Méndez-González, J., & Castruita-Esparza, L. U. (2019). Brotes históricos de descortezadores en México, Guatemala y Honduras (1895-2015) y su relación con las sequías. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 269-290. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.006>



- Chávez-Aguilar, G., Pérez-Suárez, M., Gayosso-Barragán, O., López-López, M. Á., & Ángeles-Pérez, G. (2022). El manejo forestal acelera la acumulación de biomasa aérea en un bosque templado del centro de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(1), 15–33. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.014>
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2022). Estado que guarda el sector forestal en México 2021. 459 p. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/778473/Libro\\_completo\\_EGSFM\\_DIGITAL\\_1NOV\\_\\_1\\_\\_compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/778473/Libro_completo_EGSFM_DIGITAL_1NOV__1__compressed.pdf)
- Correa-Díaz, A., Villanueva-Díaz, J., Gómez-Guerrero, A., Martínez-Bautista, H., Castruita-Esparza, L. U., Horwath, W. R., & Silva, L. C. R. (2023). A comprehensive resilience assessment of Mexican tree species and their relationship with drought events over the last century. *Global Change Biology*, 29(13), 3652–3666. <https://doi.org/10.1111/gcb.16705>
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2016). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Everitt, B. S. (2005). Analysis of repeated measures data. In B. S. Everitt, *An R and S-PLUS® Companion to Multivariate Analysis* (pp. 171–199). Springer London. [https://doi.org/10.1007/1-84628-124-5\\_9](https://doi.org/10.1007/1-84628-124-5_9)
- Figueroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & de los Santos-Posadas, H. c. M. (2019). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schlt. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105–112. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.658>
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press Inc, London.
- Galicia, L., Gamboa-Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez-Vergara, B., Peña-Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2015). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–29.
- Gómez-Mendoza, L., & Arriaga, L. (2007). Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology*, 21(6), 1545–1555. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x>
- Guijarro, J. A. (2019). *Climatol. A package for the R software*. <https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/climatol.pdf>
- Hernández-López, A., Martínez-Reyes, M., Vargas-Hemández, J. 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 Mexicana de Ciencias Forestales*, 21(80), 40–55. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/987>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983(43), 51–67. <http://hdl.handle.net/10150/261223>
- Jevšenak, J., & Levanič, T. (2018). dendroTools: R package for studying linear and nonlinear responses between tree-rings and daily environmental data. *Dendrochronologia*, 48, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.01.005>
- Lazcano-Hernández, I. (2006). *Estimación de secuestro de carbono para cuatro coníferas en la región de Chignahuapan, Puebla*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/3475>
- Ortega-Rodríguez, D. R. (2014). *Evaluación de la influencia del raleo en el crecimiento de Pinus patula Schl. et Cham. aplicando técnicas dendrocronológicas en plantaciones de Cajamarca-Perú*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/3759ee8f-96f5-492d-ad2a-b65739268a94>
- Ortiz-Reyes, A. D., Barrera-Ortega, D., Velasco-Bautista, E., Romero-Sánchez, M. E., & Correa-Díaz, A. (2024). Predicting forest parameters through generalized linear mixed models using GEDI metrics in a temperate forest in Oaxaca, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2396565>
- Peterson, R. A. (2021). Finding optimal normalizing transformations via bestNormalize. *R Journal*, 13(1), 310–329. <https://journal.r-project.org/archive/2021/RJ-2021-041/RJ-2021-041.pdf>
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., & Team, R. C. (2018). nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. *R package version 3.1131.1*.
- Quezada-Rivera, D. A. (2013). Potencial dendrocronológico de *Pinus patula* (Schl. et Cham.) y reconstrucción de la precipitación para Tlaxcala-Puebla. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/781>
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. In R Foundation for Statistical Computing.
- Rodríguez-Ortiz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., Héctor, M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*?. *Agrociencia*, 45(6), 719–732.

<https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/913/913>

- Rojas-García, F., Gómez-Guerrero, A., Gutiérrez García, G., Ángeles Pérez, G., Reyes Hernández, V. J., & de Jong, B. H. J. (2020). Aplicaciones de la dendroecología en el manejo forestal: una revisión. *Madera y Bosques*, 26(3), e2632116. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632116>
- Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Blanco-García, A., Endara-Agramont, A. R., Lúndig-Cisneros, R., López-Upton, J., Trejo-Ramírez, O., Wehenkel, C., Cibrián-Tovar, D., Flores-López, C., Plascencia-González, A., & Vargas-Hernández, J. J. (2020). Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 843-854. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Salaya-Domínguez, J. M., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 46(5). <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/973/973>
- Salinas-Cruz, E., González-Guillén, M. d. J., León-Merino, A., & Rodríguez-Hernández, R. (2017). La actividad forestal en el desarrollo económico de Chignahuapan, Puebla. *Región y Sociedad*, 29(69). <https://doi.org/10.22198/rys.2017.69.a270>
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Corral-Rivas, J. J., Rodríguez-Ortiz, G., & Santiago-García, E. (2016). Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 21(3), 95-110. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.213459>
- Santiago-García, W., los Santos-Posadas, D., Héctor, M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Valle-Paniagua, D., David, H., & Corral-Rivas, J. J. (2013). Auto-aclareo y guías de densidad para *Pinus patula* mediante el enfoque de regresión de frontera estocástica. *Agrociencia*, 47(1), 75-89.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (2021). *Anuario estadístico de la producción forestal 2018*. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- Speer, J. (2010). *Fundamentals of tree ring research*. The University of Arizona Press. USA.
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, M. C. A., Szejner, P., & Howard, I. M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34-60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>
- Trujillo-Martínez, H. A., Reyes-Hernández, V. J., Gómez-Guerrero, A., & Borja-de la Rosa, M. A. (2020). Radial growth of pine species in stands subject to selection cutting in Santa María Lachixío, Oaxaca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 123-139. doi: 10.5154/r.rchscfa.2018.09.064
- Unión de Ejidos de Producción, Explotación, Comercialización, Industrialización Agropecuaria y Forestal de la Sierra Norte de Puebla [Upeciafsnp] (s/f). *Programa de manejo forestal a nivel avanzado para el aprovechamiento persistente de los recursos forestales maderables del "Ejido Emiliano Zapata, Municipio de Chignahuapan, Puebla*.
- van Zonneveld, M., Jarvis, A., Dvorak, W., Lema, G., & Leibing, C. (2009). Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management*, 257(7), 1566-1576. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.12.027>

Manuscrito recibido el 23 de enero de 2025

Aceptado el 15 de julio de 2025

Publicado el 13 de octubre de 2025

Este documento se debe citar como:

Correa-Díaz, A., Villanueva-Díaz, J., Gutiérrez-García, J. V., Velasco-Bautista, E., Moreno-Sánchez, F., & Zamora-Morales, B. P. (2025). Efecto del clima y el manejo forestal en el crecimiento radial de un bosque de coníferas en Puebla, México. *Madera y Bosques*, 31, e312717. <https://doi.org/10.21829/myb.2025.312717>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.