



Sensibilidad climática y resiliencia de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco ante eventos de sequía

Climate sensitivity and resilience of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco to drought events

José Alexis Martínez-Rivas^{1, 2}, Andrea Cecilia Acosta-Hernández², Pablito Marcelo López-Serrano³, Christian Wehenkel³, Carlos Arturo Aguirre-Salado⁴, Marín Pompa-García^{2*}

Fecha de recepción/Reception date: 25 de agosto de 2025.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 13 de enero de 2026.

¹Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

²Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

³Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: mpgarcia@ujed.mx

*Corresponding-author; e-mail: mpgarcia@ujed.mx

Resumen

El cambio climático representa una amenaza para la dinámica y la resiliencia de los bosques templados, con profundas implicaciones para las especies con sensibilidad a la sequía y estrés hídrico. El objetivo fue evaluar la sensibilidad del crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* a la variabilidad climática, así como la resiliencia del Incremento en Área Basal (IAB) a eventos de sequía como *proxies* dendroecológicos. Se desarrolló una cronología versión residual (1948-2021) con 40 series de 20 árboles en un bosque de alto valor de conservación (BAVC) en Durango, México con técnicas dendrocronológicas estándar. Los datos climáticos temperatura máxima y mínima, precipitación y déficit de presión de vapor (*Tmax*, *Tmin*, *PP* y *DPV*) se obtuvieron de *TerraClimate* para el periodo 1958 a 2024, y el Índice Estandarizado de Evapotranspiración Precipitación (*SPEI*) a seis meses de *SPEI Drought Monitor*. El crecimiento radial se asoció positivamente con *PP* y la *Tmin* en invierno y principios de primavera. En contraste, *Tmax* de diciembre y *DPV* en primavera disminuyeron el crecimiento, al igual que el *SPEI* en escalas de 3 a 11 meses. El IAB tuvo una tendencia ascendente interrumpida por sequías severas en 1974, 1999, 2006 y 2011. Los índices de resiliencia evidenciaron una reducción en la resistencia y resiliencia frente a sequías, 1965 registró el evento con un tiempo de recuperación significativamente menor. Estos resultados confirman que *P. menziesii* es sensible a la disponibilidad hídrica invernal y primaveral, y las sequías comprometen su capacidad de resistencia y resiliencia ante eventos climáticos extremos recientes.

Palabras clave: Dendroecológico, Incremento en Área Basal, índices de resiliencia, variabilidad climática, sequías extremas, Sierra Madre Occidental.

Abstract

Climate change poses a threat to the dynamics and resilience of temperate forests, with profound implications for species sensitive to drought and water stress. The objective was to evaluate the sensitivity of the radial growth of *Pseudotsuga menziesii* to climate variability, as well as the resilience of the Basal Area Increment (*BAI*) to drought events as dendroecological proxies. A residual chronology (1948–2021) was developed with 40 series of 20 trees in a high conservation value forest (HCVF) in *Durango*, Mexico, using standard dendrochronological techniques. Climate data for maximum and minimum temperature, precipitation, and vapor pressure deficit (*Tmax*, *Tmin*, *PP*, and *VPD*) were obtained from TerraClimate for the period from 1958 to 2024, and the six-month Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (*SPEI*) from the *SPEI* Drought Monitor. Radial growth was positively associated with *PP* and *Tmin* in winter and early spring. In contrast, December *Tmax* and spring *VPD* negatively affected growth, as did *SPEI*, on 3- to 11-month scales. The *BAI* had an upward trend interrupted by severe droughts in 1974, 1999, 2006, and 2011. Resilience indices showed a reduction in resistance and resilience to droughts; 1965 registered the event with the significantly shortest recovery time. These results confirm that *P. menziesii* is sensitive to winter and spring water availability, and droughts compromise its resistance and resilience to recent extreme weather events.

Keywords: Dendroecological, Basal Area Increment, resilience indices, climate variability, extreme droughts, *Sierra Madre Occidental*.

Introducción

Las sequías representan una de las principales amenazas para la estabilidad de los ecosistemas forestales, ya que afectan su integridad estructural y funcionalidad (Bhandari et al., 2019; Cook et al., 2016); reducen la disponibilidad hídrica y alteran procesos fisiológicos como la formación de madera y follaje (Castruita-Esparza et al., 2019), lo que disminuye el crecimiento radial de las especies sensibles al estrés hídrico (Piraino et al., 2022). Ante este escenario, ha crecido el interés por entender cómo las especies arbóreas responden a la variabilidad climática y la sequía. En este contexto, el concepto de resiliencia forestal se ha consolidado como un enfoque clave en la evaluación de la capacidad de los taxa para resistir, recuperarse y sostener su crecimiento frente a alteraciones climáticas (Correa-Díaz et al., 2023; Thurm et al., 2016).

Los estudios dendroecológicos basados en el análisis de crecimiento radial permiten cuantificar indicadores de resistencia, recuperación y resiliencia tras perturbaciones extremas (Fang & Zhang, 2019; Lloret et al., 2011; Song et al., 2022). Combinado con el Índice Estandarizado de Evapotranspiración

Precipitación (*SPEI*), facilita la evaluación del estrés hídrico (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) y su efecto en el Incremento en Área Basal (*IAB*), un indicador más preciso que el ancho de anillo para comparar la productividad forestal en el tiempo (Rojas-García *et al.*, 2020; Serra-Maluquer *et al.*, 2018).

El crecimiento radial y la productividad forestal contribuyen a la mitigación del cambio climático al favorecer la captura y almacenamiento de carbono (Rais *et al.*, 2014). Por lo tanto, comprender la dinámica de crecimiento radial ante las variaciones climáticas es fundamental para conocer la capacidad de adaptación de las especies y establecer estrategias de manejo y conservación (Song *et al.*, 2022).

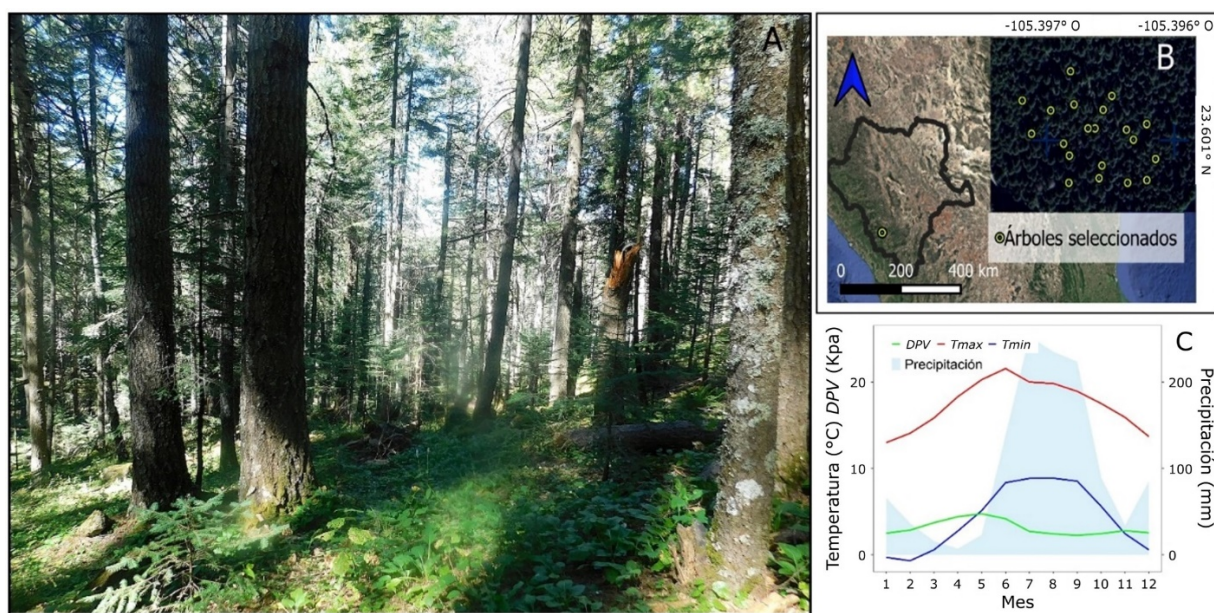
En México, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco presenta una distribución fragmentada (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2017) y está bajo protección especial por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2019). Su longevidad, sensibilidad climática y anillos bien definidos la convierten en un *proxy* confiable para reconstruir eventos climáticos extremos (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020; Villanueva-Díaz *et al.*, 2009, 2020) y para realizar inferencias históricas de precipitación (Chávez-Gándara *et al.*, 2017).

Debido a su vulnerabilidad ecológica y potencial dendroclimático, esta especie es adecuada para determinar el impacto de las variaciones climáticas sobre la resiliencia del *IAB*. En este sentido, se planteó evaluar la sensibilidad del crecimiento de ancho de anillo a las variaciones climáticas y de sequía, así como la resiliencia del *IAB* de *Pseudotsuga menziesii* mediante *proxies* dendroecológicos en un bosque de alto valor de conservación (BAVC) al suroeste de la Sierra Madre Occidental (SMO) en México. Específicamente, responder las preguntas de investigación: (1) ¿Cuáles son los elementos climáticos que modulan el crecimiento radial de *P. menziesii*?, y (2) ¿Existen diferencias significativas en los índices de resiliencia, recuperación y resistencia de la especie ante eventos de sequía inferidos por el *IAB*? Se formuló la siguiente hipótesis: el crecimiento radial de *P. menziesii* está influenciado por variables climáticas y los índices de resistencia, recuperación y resiliencia del *IAB* difieren significativamente ante eventos de sequía recientes.

Materiales y Métodos

Área de estudio y metodología dendroecológica

El BAVC se ubica en Pueblo Nuevo, Durango (23.601° N, -105.396° O, a 2 726 msnm), al suroeste de la SMO, México (Figura 1). El sitio corresponde a un bosque templado-frío dominado por *P. menziesii* y *Abies durangensis* Martínez, con árboles que superan los 25.96 (± 3.21) m de altura y 47.57 (± 14.01) cm de diámetro. El tipo de suelo predominante es el Cambisol dístico, con un horizonte superficial rico en materia orgánica, fertilidad moderada y textura media (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2024). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw), máximos de precipitación (*PP*) en julio y agosto (253 y 235 mm, respectivamente) y mínimos en abril (6.95 mm). Las temperaturas oscilan de 21.6 °C en junio a -0.7 °C en invierno. El Déficit de presión de vapor (*DPV*) es mayor de marzo a mayo (~ 0.743 -0.950 kPa), y menor en verano e invierno (~ 0.484 -0.541 kPa).



A = Vista general del BAVC; B = Macrolocalización y distribución del arbolado muestreado; C = Climograma del BAVC de *TerraClimate*. *DPV* = Déficit de presión de vapor; *Tmax* = Temperatura máxima; *Tmin* = Temperatura mínima.

Figura 1. Caracterización del sitio en el bosque de alto valor de conservación.

Se muestrearon los 20 árboles más cercanos a un árbol central al azar (González-Elizondo et al., 2005), extrayendo dos núcleos por árbol a 1.3 m (diámetro normal) con una barrena *Pressler* ($\Theta=5$ mm, *Forestry Suppliers*®) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las variables dasométricas y dendrocronológicas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Variable	<i>n</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>q1</i>	<i>q3</i>	<i>MA</i>	<i>DE</i>	<i>EE</i>
<i>Dn</i>	40	23	81.5	32	56.8	45	17.8	2.81
<i>H</i>	40	16	31.3	22.2	28.3	25	4.48	0.708
<i>Edad</i>	40	44	86	57.5	73.5	65.6	10.9	1.72
<i>Mean RWI</i>	40	0.963	4.86	1.75	3.5	2.56	1.08	0.171
<i>Stdev RWI</i>	40	0.516	3.77	0.76	1.33	1.14	0.609	0.096

Dn = Diámetro normal (cm); *H* = Altura total del árbol (m); *Edad* = Edad cambial (años); *Mean RWI* = Valor medio del Índice de ancho de anillo (*Ring Width Index*);

Stdev RWI = Desviación estándar del Índice de ancho de anillo; *n* = Número de observaciones; *Min* y *Max* = Valor mínimo y máximo de cada variable, respectivamente; *q1* = Primer cuartil (25 %); *q3* = Tercer cuartil (75 %); *MA* = Media aritmética; *DE* = Desviación estándar; *EE* = Error estándar.

Este enfoque permitió maximizar la representatividad del rodal natural, y aseguró que los árboles seleccionados reflejaran la variabilidad del sitio y no solo individuos en condiciones preferenciales (Pollard, 1971).

Los núcleos se montaron y procesaron mediante técnicas dendrocronológicas estándar (Fritts & Swetnam, 1989). El fechado visual se realizó con anillos marcadores (Stokes & Smiley, 1996) y las mediciones de ancho de anillo se obtuvieron con un sistema *VELMEX*® de alta precisión (0.001 mm; Bloomfield, NY, EE. UU.), el último año de medición correspondió al 2021. La calidad de la datación se validó con *COFECHA* (Holmes, 1983) y las tendencias ontogénicas se eliminaron aplicando un modelo exponencial negativo a cada serie, conservando la señal climática y de estrés (*i. e.* estandarización).

Se utilizó la cronología residual para eliminar la influencia de la edad y tamaño del árbol, conservando únicamente la señal de crecimiento inducida por el clima (Pompa-García et al., 2014). Esta cronología se generó con el paquete *dplR* del *software R studio* versión 4.5.0 (R Core Team, 2025), y su calidad se evaluó con la autocorrelación de primer orden (*AC*), la sensibilidad media (*MS*), la correlación media entre series (*Rbar*) y la correlación árbol-árbol (*Rbt*). La validez estadística para fines climáticos se determinó con la señal de población expresada ($EPS > 0.85$).

Relación datos climáticos-crecimiento radial

Los datos climáticos mensuales de *DPV*, *Tmax*, *Tmin* y *PP* se obtuvieron de la base *TerraClimate* (Abatzoglou et al., 2018), la cual proporciona series de alta resolución espacial (~ 4 km) y cobertura global desde 1958 hasta 2024. Para evaluar la influencia de las sequías se correlacionó la cronología residual con el *SPEI* de seis meses, descargado con una resolución de 0.5° y una escala temporal de 1-48 meses de *SPEI Drought Monitor* (Vicente-Serrano et al., 2010). Para analizar la relación entre el crecimiento radial (1958-2021) y las variables climáticas, se aplicaron correlaciones de *Pearson* con la paquetería *treeclim* en *R studio* versión 4.5.0 (R Core Team, 2025).

Estimación del *IAB* e índices de resiliencia frente a sequías

El *IAB* permite estimar la producción anual de la madera eliminando el efecto geométrico del crecimiento radial (Ecuación 1) (Biondi & Qeadan, 2008).

$$IAB = \pi(R_t^2 - R_{t-1}^2) \quad (1)$$

Donde:

IAB = Incremento en área basal

R_t^2 = Radio acumulado del tronco hasta el año *t*

R_{t-1}^2 = Radio acumulado del tronco hasta el año anterior *t-1*

Las series *IAB* se analizaron con la paquetería *pointRes* 2.0 (van der Maaten-Theunissen et al., 2021) en *R studio* versión 4.5.0 (R Core Team, 2025). Los años puntero se identificaron mediante el método de Neuwirth et al. (2007), que utiliza una normalización con ventana móvil de 13 años para comparar el *IAB* anual con el promedio de los años previos. Los años punteros se clasificaron en tres niveles de intensidad: débil, fuerte y extremo (0.9, 1.15, y 1.5, respectivamente) que reflejan grados de variación en el crecimiento radial. A partir de las series del *IAB* se estimaron los índices de resiliencia propuestos por Lloret et al. (2011): recuperación, resiliencia y resistencia, (Ecuación R_c , 2; R_s , 3; R_t , 4, respectivamente), para ello se consideró el *IAB* antes, durante y después de los eventos de sequía. También se calculó el periodo de recuperación para determinar los efectos de legado, que evalúa el tiempo necesario para que el arbolado regrese a condiciones de crecimiento previas al disturbio.

$$R_c = \frac{IAB_Dr_{post}}{IAB_Dr} \quad (2)$$

$$R_s = \frac{IAB_Dr_{post}}{IAB_Dr_{pre}} \quad (3)$$

$$R_t = \frac{IAB_Dr}{IAB_Dr_{pre}} \quad (4)$$

Donde:

IAB_Dr_{pre} , IAB_Dr e IAB_Dr_{post} = Indican el *IAB* de los 5 años antes, durante y 5 años después de la sequía, respectivamente

Para evaluar diferencias significativas en los índices de resiliencia del *IAB* entre eventos de sequía, se aplicaron pruebas de *t* de *Student* para muestras independientes mediante la paquetería *rstatix* versión 0.7.3 (Kassambara, 2025). Las comparaciones múltiples se ajustaron con el método de *Bonferroni* (Bland & Altman, 1995), con un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$.

Resultados

Respuesta a las variaciones climáticas

La anchura total promedio de los anillos fue de 2.56 ± 1.08 mm. La cronología residual se generó a partir de 40 series de crecimiento con un total de 2 622 mediciones, para el periodo de 1936 a 2021. La $Rbar$ fue 0.369, $MS=0.282$, $Rbt=0.409$ y la AC fue de -0.112. Dado que el valor de EPS superó el umbral recomendado de 0.85 a partir de 1948, los análisis se realizaron para el periodo 1948–2021 (Figura 2).

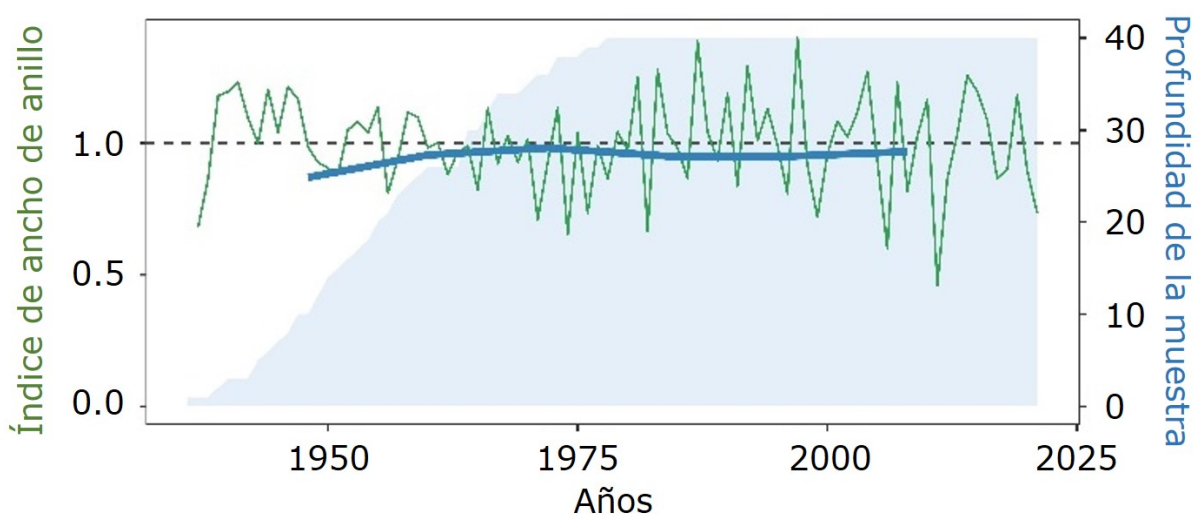
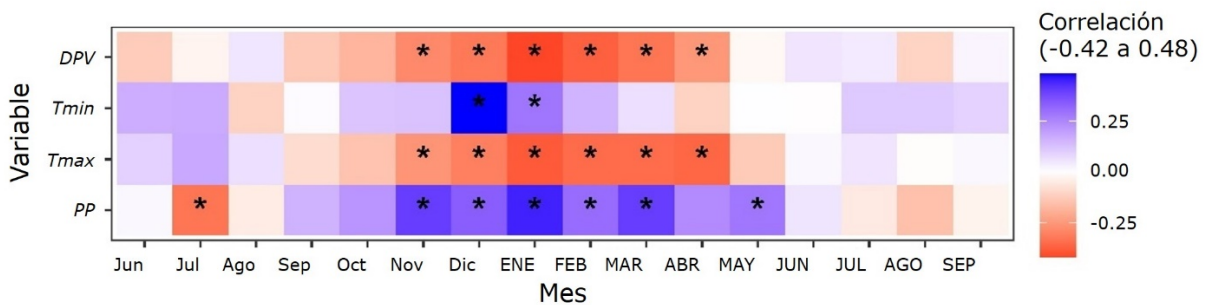


Figura 2. Cronología residual del Índice de ancho de anillo (línea verde), EPS dinámico (línea azul) y profundidad de la muestra (área azul) de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco para 1947-2021.

La variabilidad del crecimiento radial de *P. menziesii* se evidenció en los años 1971, 1974, 1976, 1982, 1999, 2006, 2011 y 2021 que presentaron reducciones; mientras que los años 1981, 1983, 1987, 1992, 1997, 2004, 2007 y 2014 exhibieron incrementos. El crecimiento radial de *P. menziesii* mostró correlaciones significativas ($p < 0.05$) con las variables climáticas (Figura 3). La *Tmin* se asoció positivamente en diciembre del año previo al crecimiento (otoño-invierno) y en enero del año actual (primavera-verano) ($r = 0.48$ y 0.29 , respectivamente). Por el contrario, la *Tmax* en noviembre y diciembre del año previo y de enero-abril del año actual limitó el crecimiento ($r = -0.39$, -0.35 , -0.35 y -0.36 , respectivamente; Figura 3). Respecto a la *PP*, presentó asociaciones positivas de noviembre del año previo a abril del año actual, enero fue el mes de mayor influencia ($r = 0.45$). Mientras que julio del año previo registró una correlación negativa ($r = -0.33$). El *DPV* se relacionó negativamente en noviembre y diciembre del año previo ($r = -0.28$ y $r = -0.31$) y en enero-abril del año actual ($r = -0.42$, -0.37 , -0.33 y -0.26 , respectivamente; Figura 3), lo cual indicó que la alta presión de vapor en primavera limita el crecimiento.



Meses en minúscula = Año anterior; Mayúscula = Año actual. *DPV* = Déficit de presión de vapor; *Tmax* y *Tmin* = Temperatura máxima y mínima; *PP* = Precipitación. Los asteriscos corresponden a correlaciones significativas con un $\alpha = 0.05$.

Figura 3. Correlaciones climáticas mensuales con el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

El crecimiento radial de *P. menziesii* presentó correlaciones positivas con el *SPEI* acumulado a escalas de 3 a 11 meses, particularmente entre marzo y julio (Figura 4). Los valores de correlación altos (>0.35) se concentraron en abril y mayo.

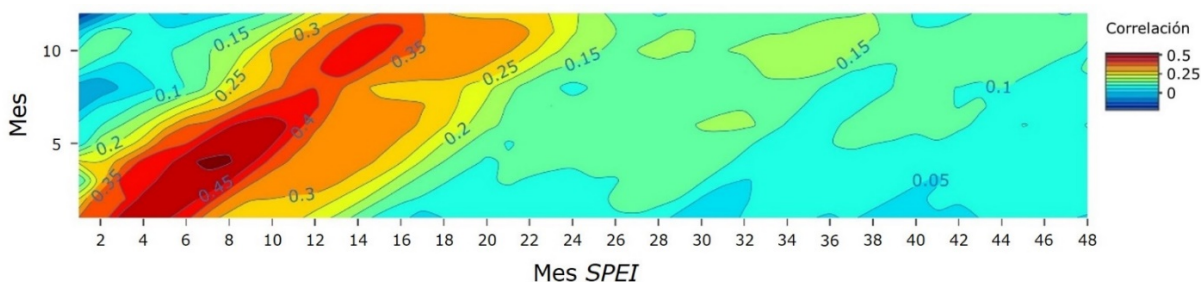
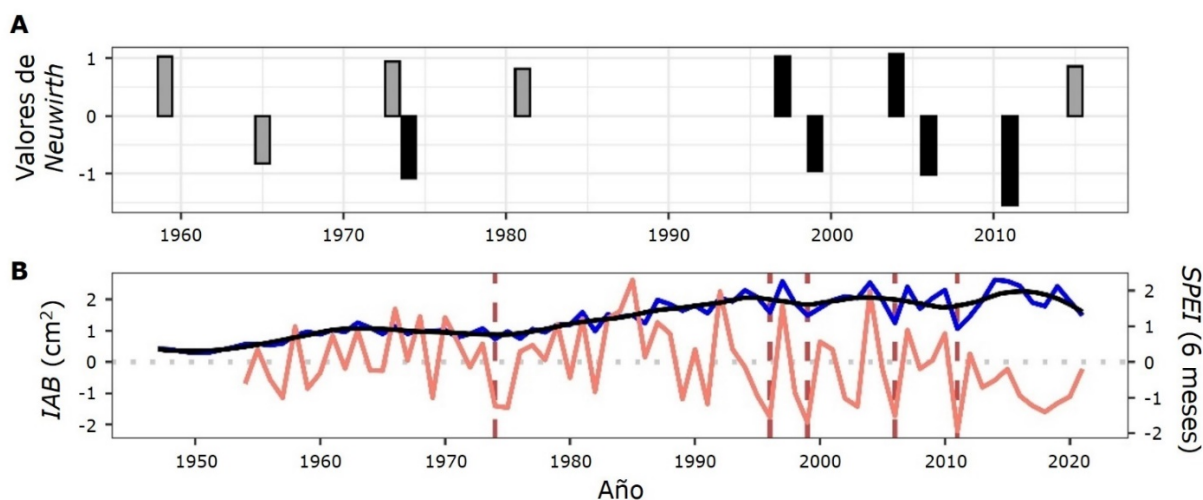


Figura 4. Coeficientes de correlación de *Pearson* entre el Índice *SPEI* y la cronología residual de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Dinámica del crecimiento y su respuesta de los índices de resiliencia frente a sequías

Los años punteros estimados a partir del *IAB* de *P. menziesii* mostraron alternancia de eventos positivos y negativos (Figura 5). Los eventos negativos extremos fueron en 1974, 1999, 2006 y 2011, mientras que 1965 se consideró fuerte. Se observó un patrón cíclico de eventos negativos aproximadamente cada nueve años, destacó la alta frecuencia y severidad de 2011, 2006 y 1999.



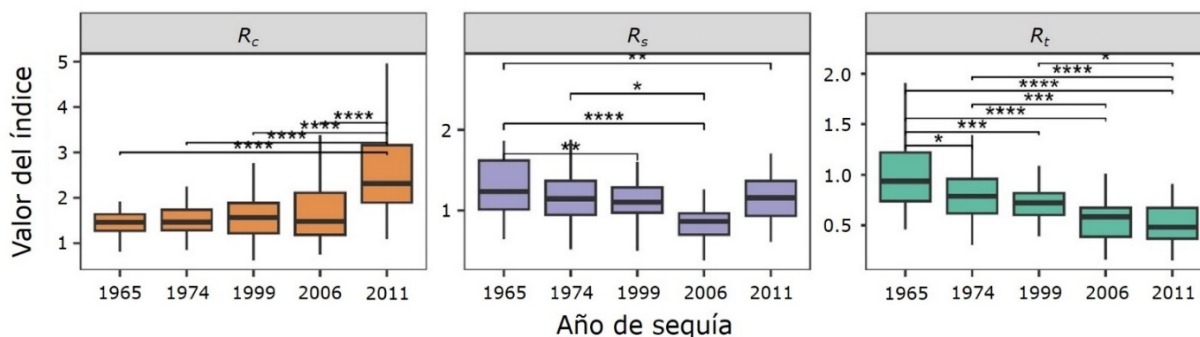
A = Años punteros: año puntero fuerte (gris) y extremo (negro); B = Variación temporal del *IAB* (línea azul, tendencia línea negra) y del índice *SPEI* a seis meses (línea naranja) para el periodo 1947-2021. Las líneas verticales discontinuas indican los años asociados a eventos de sequía severa.

Figura 5. Identificación de los años punteros y variación temporal del *IAB* en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *SPEI*.

El *IAB* tuvo una tendencia ascendente de 1947-1997, los valores iniciales (1947-1950) promediaron $\sim 0.40 \text{ cm}^2$ y aumentaron en 1960-1970 hasta $\sim 1.2 \text{ cm}^2$. Entre 1980 y 2000 se registró mayor variabilidad, con picos en 1987 (1.98 cm^2), 1994 (2.29 cm^2) y 1997 (2.57 cm^2), intercalados con descensos asociados a sequías. El *IAB* se mantuvo alto desde 1995 ($\sim 2.0 \text{ cm}^2$), con una estabilización después del 2000, el máximo se alcanzó en 2014 (2.62 cm^2). Estos resultados sugieren un aumento sostenido del crecimiento radial, interrumpido ocasionalmente por eventos de sequía (Figura 5).

En la Figura 6 se observan la recuperación, resistencia y resiliencia del *IAB* de *P. menziesii* durante sequías. El Índice R_c en 2011 presentó diferencias significativas con respecto a otros años críticos (1965, 1974, 1999 y 2006). El índice R_t mostró la mayor cantidad de comparaciones significativas, lo cual evidenció una disminución de la resistencia en eventos recientes. El año 1965 difirió estadísticamente de 1974, 1999,

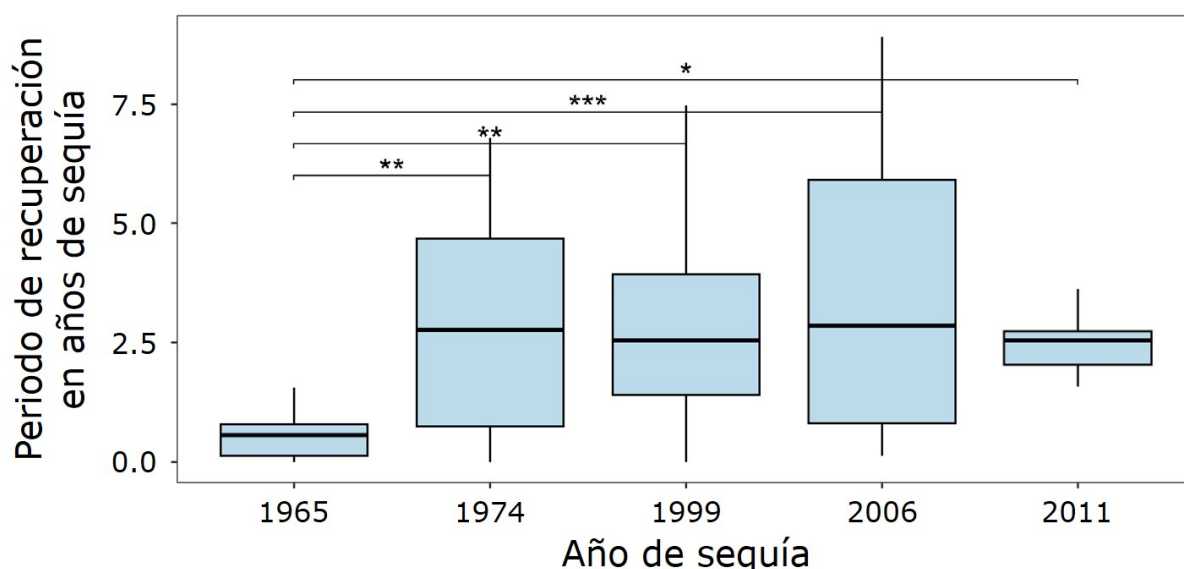
2006 y 2011; 1974 de 2006 y de 2011 y 1999 de 2011. Este patrón indicó que la capacidad de resistencia para mantener el crecimiento se redujo en 2006 y 2011.



Las líneas sobre los *boxplots* indican las comparaciones significativas entre años de sequía y los asteriscos indican el nivel de significancia según la prueba *t* pareada con corrección de *Bonferroni*: $p \leq 0.05$ (*), 0.01 (**), 0.001 (***), 0.0001 (****).

Figura 6. Índices de Recuperación (R_c), Resiliencia (R_s) y Resistencia (R_t) del *IAB* de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

El Índice R_s , indicó que la resiliencia también se comprometió en 2006 y 2011, reflejando estrés acumulado o menor disponibilidad hídrica. Estos resultados revelan una tendencia de disminución en la resiliencia tras los eventos de sequía, que denotan vulnerabilidad de *P. menziesii* (Figura 4 y 5), aunque con una alta capacidad de recuperación del crecimiento en años subsecuentes (Figura 6). El periodo de recuperación presentó diferencias significativas entre las sequías (Figura 7). La sequía de 1965 evidenció una recuperación rápida, mientras que el evento de 2011 exhibió un periodo de recuperación más homogéneo. Los eventos recientes presentaron tiempos de recuperación significativamente más prolongados y una mayor variabilidad.



Los asteriscos sobre las líneas indican comparaciones con diferencias significativas según pruebas *t* pareadas con corrección de *Bonferroni*: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Figura 7. Comparación del periodo de recuperación en años de sequía.

Discusión

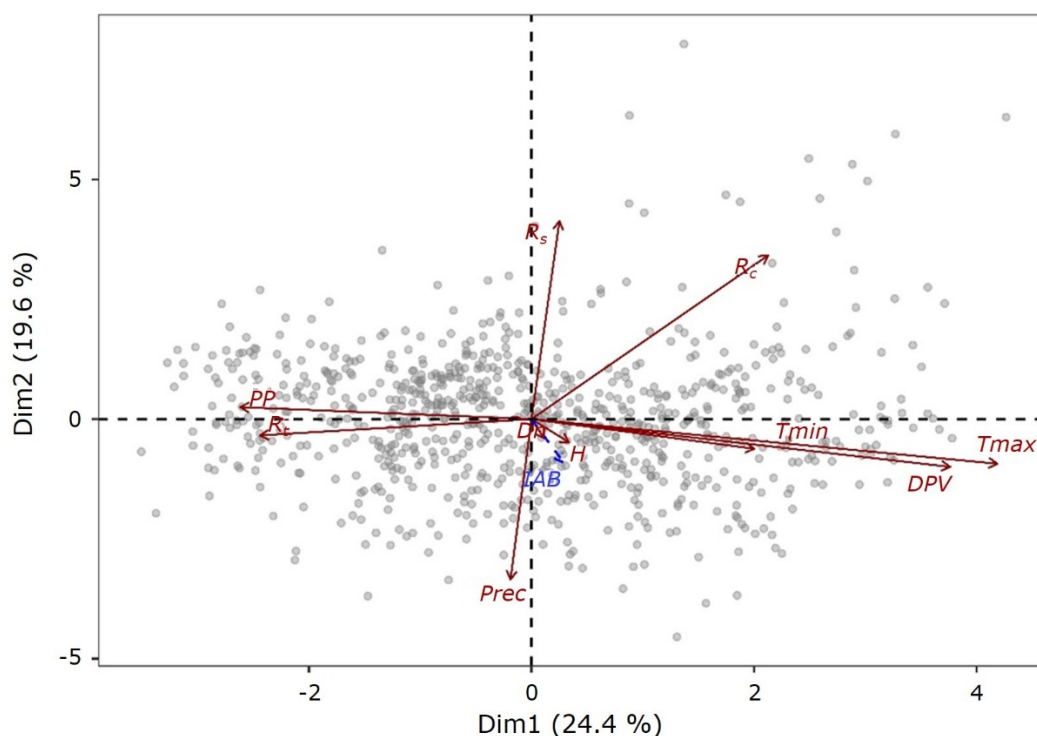
La dinámica de crecimiento de *P. menziesii* ofrece una ventana excepcional para comprender la relación entre el clima y la resiliencia forestal. La especie mostró su potencial dendrocronológico, con una cronología de gran calidad (Figura 2), comparable a registros de *Pinus lumholtzii* B. L. Rob. & Fernald, *Pinus arizonica* Engelm., *Abies durangensis*, *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. y *P. menziesii* del norte de México (Villanueva-Díaz et al., 2020). Ello permitió analizar además la respuesta del *IAB* ante sequías y su resiliencia (Figura 5 y 6). Los resultados confirman que *P. menziesii* es susceptible a las variaciones climáticas (Figura 3). Altos valores de *Tmax* y *DPV* en invierno y primavera aumentan la evapotranspiración y reducen la

humedad del suelo, mientras que la *PP* invernal previa ayuda a recargarla. Así, condiciones cálidas y secas limitan la productividad radial (Figura 3), patrón consistente con *P. menziesii* y *Pinus arizonica* en el norte de México.

La correlación positiva entre *PP* y *Tmin* del invierno previo y los primeros meses del año actual favorece el crecimiento radial (Figura 3), patrón observado en registros históricos de *P. menziesii* en la Sierra Madre Occidental (González-Elizondo *et al.*, 2005). Sin embargo, heladas tardías y sequías intensas pueden dañar los tejidos en formación y afectar el crecimiento (Greenwood *et al.*, 2017). La *Tmin* y la *PP* invernal del año previo y principios del actual ayudan a retener agua en el suelo, promoviendo el crecimiento radial (Chávez-Gándara *et al.*, 2017). En *P. menziesii*, el *DPV* tuvo correlaciones negativas significativas en invierno previo y primavera, lo cual indica que la baja disponibilidad de agua en el ambiente limita el crecimiento al inicio de la estación de crecimiento. Este patrón coincide con reconstrucciones dendroclimáticas de *P. menziesii* en la cuenca del río Mayo, cuya correlación es positiva y significativa con el *SPEI* (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020) y con estudios de *Tsuga dumosa* (D. Don) Eichler en Nepal (Bhandari *et al.*, 2019); resultados que evidencian la importancia de la humedad estacional.

En este estudio, la correlación con el *SPEI* resalta la influencia de la sequía sobre el crecimiento (Figura 4). Las sequías recientes que afectaron el crecimiento de *P. menziesii* también impactaron a *Pinus durangensis* Martínez en la Sierra Madre Occidental (Cabral-Alemán *et al.*, 2023), ambos patrones similares de reducción del crecimiento, aunque con diferencias en la magnitud y temporalidad (Villanueva-Díaz *et al.*, 2020). Probablemente, debido a la mayor variabilidad climática reciente y la estrategia de muestreo, reduciendo la variabilidad interanual y la sensibilidad climática de las cronologías.

Durante las sequías extremas el *IAB* de *P. menziesii* disminuyó, patrón semejante al del oeste de México (*P. menziesii*) (Castruita-Esparza *et al.*, 2019) con intensidad superior en un bosque natural según los parámetros de resiliencia (Figura 8).



Dim1 = Primer componente principal, que explica la mayor proporción de la varianza total; Dim2 = Segundo componente principal, ortogonal a Dim1; *PP* = Precipitación; *R_s* = Índice de resiliencia; *R_c* = Índice de recuperación; *R_t* = Índice de resistencia; *T_{min}* = Temperatura mínima; *T_{max}* = Temperatura máxima; *DPV* = Déficit de presión de vapor; *IAB* = Incremento en Área Basal; *Prec* = Periodo de recuperación; *Dn* = Diámetro normal (cm); *H* = Altura total del árbol (m). Variables activas en vector de color café y el *IAB* como variable suplementaria en azul. Los puntos grises representan los individuos, y los vectores indican la dirección y magnitud de la influencia de cada variable sobre los dos primeros componentes principales.

Figura 8. Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA) con *IAB* como variable suplementaria.

Los años de reducción coinciden con sequías registradas al norte de México (Cook et al., 2016; Villanueva-Díaz et al., 2020). Sin embargo, la resiliencia de *P. menziesii* fue menor en 2006 y 2011, con una recuperación mayor en eventos negativos más

recientes. Esa tendencia decreciente del crecimiento debido a sequías extremas se ha documentado en el Tíbet, donde los árboles expuestos a eventos recurrentes muestran disminución progresiva en la resistencia (Fang & Zhang, 2019). A diferencia de las poblaciones europeas de *P. menziesii* que registraron mayor resiliencia e incluso aumento en la resistencia bajo sequías extremas (Mondek et al., 2021; Vejprustková & Čihák, 2019). Estas diferencias podrían deberse a que en Europa son plantaciones, mientras que las poblaciones naturales mexicanas presentan una vulnerabilidad mayor, posiblemente por crecer bajo condiciones ambientales más variables y sin manejo silvícola.

Los mayores periodos de recuperación ocurrieron en las sequías más recientes (Figura 7), es decir que *P. menziesii* requiere más tiempo para recuperarse, en comparación con sequías históricas. Los años de reducción coincidieron con sequías severas registradas en el norte de México por otras pináceas (González-Tagle et al., 2024; Villanueva-Díaz et al., 2020), lo que evidencia la vulnerabilidad de las coníferas y su limitada resiliencia ante condiciones hídricas extremas (Correa-Díaz et al., 2023). Las sequías recurrentes reducen progresivamente la resiliencia de *P. menziesii* al generar un agotamiento fisiológico acumulativo (e. g., efectos de legado). Los periodos de recuperación se prolongan en las sequías más recientes (Figura 7), lo que indica que los árboles requieren más tiempo para restablecer sus tasas de crecimiento. Este patrón coincide con las observaciones realizadas por Linares et al. (2013), quienes señalaron que la edad y el tamaño de los árboles influyen en la capacidad de recuperación; así, los individuos más grandes son menos resistentes y resilientes (Serra-Maluquer et al., 2018; Thurm et al., 2016). En contraste, López-Upton et al. (2015) señalan que la edad no siempre es un factor determinante, lo que sugiere una interacción compleja entre el estrés ambiental, la estructura del árbol y su historia de crecimiento.

La interacción entre los periodos de recuperación heredados y las sequías recurrentes sugiere que los árboles reducen su resistencia frente a episodios de estrés subsecuentes (Figura 7). Este comportamiento explica la tendencia hacia una menor resiliencia, y coincide con los patrones descritos en otras especies de bosques templados (Camarero et al., 2010; Lloret et al., 2011).

Este tipo de estudios tiene implicaciones ecológicas y de manejo forestal relevantes. Comprender cómo la especie responde a las variaciones climáticas permite identificar su vulnerabilidad y orientar estrategias de manejo adaptativo frente al cambio climático. Se ha sugerido que los aclareos y la composición del rodal pueden reducir la competencia hídrica y la dependencia climática del crecimiento, mejorando la resistencia y resiliencia de los árboles a sequías (Manrique-Alba et al., 2022; Pardos et al., 2021; Rais et al., 2014).

Finalmente, las limitaciones del presente trabajo radican en su enfoque monoespecífico y en la falta de integración de variables estructurales y fisiológicas. Por ello, se sugiere ampliar la investigación a diferentes especies y regiones, además de incorporar enfoques complementarios como el uso de sensores remotos y el análisis de xilogénesis para comprender los procesos de crecimiento a distintas escalas temporales (Camarero et al., 2010).

Conclusión

Mediante el enfoque dendroecológico fue posible cuantificar los índices de resiliencia. Los resultados confirman la hipótesis de que *P. menziesii* es sensible a la variabilidad climática y a las sequías, reflejado en la reducción de su crecimiento y del *IAB* afectado por la disponibilidad hídrica. El tiempo de recuperación muestra que *P. menziesii* presenta periodos prolongados para compensar pérdidas de crecimiento, evidenciando su vulnerabilidad ante escenarios de sequías más frecuentes, combinados con olas de calor en la zona de estudio. Los resultados constituyen parámetros confiables que aportan evidencia sólida sobre la respuesta ecológica de *P. menziesii* al cambio climático, posicionándola como un bioindicador clave de la dinámica de los bosques templados bajo escenarios de creciente variabilidad climática.

Agradecimientos

El primer autor agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca para realizar sus estudios de doctorado. Agradecemos al equipo de DendroRed (<https://dendrored.ujed.mx>) y al Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Juárez del Estado de Durango por su apoyo en la toma de datos de campo y su procesamiento.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existe conflicto de interés.

Contribución por autor

José Alexis Martínez-Rivas y Marín Pompa-García: conceptualización y supervisión del estudio; José Alexis Martínez-Rivas y Andrea Cecilia Acosta-Hernández: trabajo de campo y análisis de datos; Pablito Marcelo López-Serrano y Christian Wehenkel: diseño metodológico y análisis estadístico; Carlos Arturo Aguirre-Salado: interpretación de resultados y revisión técnica. Todos los autores contribuyeron a la redacción, revisión crítica y aprobación de la versión final del manuscrito.

Referencias

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, Article 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>

- Bhandari, S., Gaire, N. P., Shah, S. K., Speer, J. H., Bhujju, D. R., & Thapa, U. K. (2019). A 307-year tree-ring SPEI reconstruction indicates modern drought in western Nepal Himalayas. *Tree-Ring Research*, 75(2), 73-85. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-75.2.73>
- Biondi, F., & Qeadan, F. (2008). A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree-Ring Research*, 64(2), 81-96. <https://doi.org/10.3959/2008-6.1>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1995). Multiple significance tests: the Bonferroni method. *The British Medical Journal*, 310(6973), 170. <https://doi.org/10.1136/bmj.310.6973.170>
- Cabral-Alemán, C., Villanueva-Díaz, J., Quiñonez-Barraza, G., & Gómez-Guerrero, A. (2023). Resilience of *Pinus durangensis* Martínez in extreme drought periods: vertical and horizontal response of tree rings. *Atmosphere*, 14(1), 43. <https://doi.org/10.3390/ATMOS14010043>
- Camarero, J. J., Olano, J. M., & Parras, A. (2010). Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *New Phytologist*, 185(2), 471-480. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03073.x>
- Castruita-Esparza, L. U., Silva, L. C. R., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Correa-Díaz, A., & Horwath, W. R. (2019). Coping with extreme events: growth and water-use efficiency of trees in Western Mexico during the driest and wettest periods of the past one hundred sixty years. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(11), 3419-3431. <https://doi.org/10.1029/2019JG005294>
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Cruz-Cobos, F., & Corral-Rivas, S. (2017). Winter-spring precipitation reconstruction from tree-rings for San Dimas region, Durango, Mexico. *Bosque*, 38(2), 387-399. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>
- Cook, B. I., Cook, E. R., Smerdon, J. E., Seager, R., Williams, A. P., Coats, S., Stahle, D. W., & Villanueva-Díaz, J. (2016). North American megadroughts in the Common

- Era: Reconstructions and simulations. *WIREs Climate Change*, 7(3), 411-432. <https://doi.org/10.1002/WCC.394>
- 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>
- Fang, O., & Zhang, Q.-B. (2019). Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 25(1), 245-253. <https://doi.org/10.1111/gcb.14470>
- Fritts, H. C., & Swetnam, T. W. (1989). Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*, 19, 111-188. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60158-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60158-0)
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Návar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681-2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213(1-3), 39-53. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2005.03.012>
- González-Tagle, M. A., González-Cásares, M., Himmelsbach, W., & Gárate-Escamilla, H. A. (2024). Diferencias en la respuesta de indicadores dendrocronológicos a condiciones climáticas y topográficas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(81), 59-82. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1435>
- Greenwood, S., Ruiz-Benito, P., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Kitzberger, T., Allen, C. D., Fensham, R., Laughlin, D. C., Kattge, J., Bönisch, G., Kraft, N. J. B., & Jump, A. S. (2017). Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area. *Ecology letters*, 20, 539-553. <https://doi.org/10.1111/ele.12748>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 51-67. <http://hdl.handle.net/10150/261223>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2017). *Capa vectorial de uso de suelo y vegetación Serie VI* [Mapa]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo nacional* [Datos vectoriales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551131916>
- Kassambara, A. (2025). *rstatix: Pipe-friendly framework for basic statistical tests* (version 0.7.3) [Software]. Comprehensive R Archive Network. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.rstatix>
- Linares, J. C., Taïqui, L., Sangüesa-Barreda, G., Seco, J. I., & Camarero, J. J. (2013). Age-related drought sensitivity of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Dendrochronologia*, 31(2), 88-96. <https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2012.08.003>
- Lloret, F., Keeling, E. G., & Sala, A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120(12), 1909-1920. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0706.2011.19372.X>
- López-Upton, J., Valdez-Lazalde, J. R., Ventura-Ríos, A., Vargas-Hernández, J. J., & Guerra-de la Cruz, V. (2015). Extinction risk of *Pseudotsuga menziesii* populations in the central region of Mexico: An AHP analysis. *Forests*, 6(5), 1598-1612. <https://doi.org/10.3390/F6051598>
- Manrique-Alba, À., Beguería, S., & Camarero, J. J. (2022). Long-term effects of forest management on post-drought growth resilience: An analytical framework. *Science of the Total Environment*, 810, Article 152374. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152374>
- Martínez-Sifuentes, A. R., Villanueva-Díaz, J., & Estrada-Ávalos, J. (2020). Runoff reconstruction and climatic influence with tree rings, in the Mayo river basin, Sonora, Mexico. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 13(2), 98-106. <https://doi.org/10.3832/ifor3190-013>
- Mondek, J., Matějka, K., Gallo, J., Prokůpková, A., & Hájek, V. (2021). *Picea abies* and *Pseudotsuga menziesii* radial growth in relation to climate: case study from South Bohemia. *Austrian Journal of Forest Science*, 138(3), 209-244. https://www.forestsscience.at/content/dam/holz/forest-science/2021/03/CB2103_Art4.pdf

- Neuwirth, B., Schweingruber, F. H., & Winiger, M. (2007). Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, 24(2-3), 79-89. <https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2006.05.004>
- Pardos, M., del Río, M., Pretzsch, H., Jactel, H., Bielak, K., Bravo, F., Brazaitis, G., Defosse, E., Engel, M., Godvot, K., Jacobs, K., Jansone, L., Jansons, A., Morin, X., Nothdurft, A., Oreti, L., Ponette, Q., Pach, M., Riofrío, J., ... Calama, R. (2021). The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition: Analysis along a climate gradient across Europe. *Forest Ecology and Management*, 481, Article 118687. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118687>
- Piraino, S., Arco-Molina, J., Hadad, M. A., & Roig-Juñent, F. A. (2022). Resilience capacity of *Araucaria araucana* to extreme drought events. *Dendrochronologia*, 75, Article 125996. <https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2022.125996>
- Pollard, J. H. (1971). On distance estimators of density in randomly distributed forests. *Biometrics*, 27(4), 991-1002. <https://doi.org/10.2307/2528833>
- Pompa-García, M., Dávalos-Sotelo, R., Rodríguez-Téllez, E., Aguirre-Calderón, O. A., & Treviño-Garza, E. J. (2014). Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana. *Madera y Bosques*, 20(3), 139-151. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n3/v20n3a12.pdf>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.5.0) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rais, A., van de Kuilen, J.-W. G., & Pretzsch, H. (2014). Growth reaction patterns of tree height, diameter, and volume of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) under acute drought stress in Southern Germany. *European Journal of Forest Research*, 133(6), 1043-1056. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0821-7>
- 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), Artículo e2632116. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632116>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). *MODIFICACIÓN del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-*

059-SEMARNAT-2010, *Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*, publicada el 30 de diciembre de 2010. Diario Oficial de la Federación. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/5578808>

Serra-Maluquer, X., Mencuccini, M., & Martínez-Vilalta, J. (2018). Changes in tree resistance, recovery and resilience across three successive extreme droughts in the northeast Iberian Peninsula. *Oecologia*, 187(1), 343-354. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4118-2>

Song, Y., Sterck, F., Sass-Klaassen, U., Li, C., & Poorter, L. (2022). Growth resilience of conifer species decreases with early, long-lasting and intense droughts but cannot be explained by hydraulic traits. *Journal of Ecology*, 110(9), 2088-2104. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13931>

Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating* (2nd edition). The University of Arizona Press. https://books.google.com.mx/books?id=THEVAQAAIAAJ&hl=es&source=gbv_book_other_versions_r&cad=3

Thurm, E. A., Uhl, E., & Pretzsch, H. (2016). Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *Forest Ecology and Management*, 376, 205-220. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2016.06.020>

van der Maaten-Theunissen, M., Trouillier, M., Schwarz, J., Skiadaresis, G., Thurm, E. A., & van der Maaten, E. (2021). pointRes 2.0: New functions to describe tree resilience. *Dendrochronologia*, 70, Article 125899. <https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2021.125899>

Vejpustková, M., & Čihák, T. (2019). Climate response of Douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in Central Europe. *Forests*, 10(2), 97. <https://doi.org/10.3390/F10020097>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Cerano-Paredes, J., Estrada-Ávalos, J., & Sánchez-Cohen, I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Ciencia forestal en México*, 34(105), 39-71. <https://www.scielo.org.mx/pdf/cfm/v34n105/v34n105a3.pdf>

Villanueva-Díaz, J., Castruita-Esparza, L. U., Martínez-Sifuentes, A. R., Loera-Chaparro, R., & Estrada-Ávalos, J. (2020). Chihuahua southwestern hydroclimatic variability inferred with coniferous growth rings. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), 373-389. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2019.09.071>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.