

**RESILIENCIA DE *Abies durangensis*  
Martínez A SEQUÍAS EN EL  
SUROESTE DE DURANGO  
MEDIANTE PROXIES  
DENDROECOLÓGICOS**

**DROUGHT RESILIENCE OF *Abies*  
*durangensis* Martínez IN  
SOUTHWESTERN DURANGO  
USING DENDROECOLOGICAL  
PROXIES**

**Martínez-Rivas, J.A., A.C. Acosta-Hernández, E.D. Vivar-Vivar y N. Silva-Ávila**

RESILIENCIA DE *Abies durangensis* Martínez A SEQUÍAS EN EL SUROESTE DE DURANGO MEDIANTE PROXIES DENDROECOLÓGICOS

DROUGHT RESILIENCE OF *Abies durangensis* Martínez IN SOUTHWESTERN DURANGO USING DENDROECOLOGICAL PROXIES



## Resiliencia de *Abies durangensis* Martínez a sequías en el suroeste de Durango mediante proxies dendroecológicos

### Drought resilience of *Abies durangensis* Martínez in southwestern Durango using dendroecological proxies

José Alexis Martínez-Rivas,  
Andrea Cecilia Acosta-  
Hernández, Eduardo Daniel  
Vivar-Vivar y Nancy Silva-  
Ávila

RESILIENCIA DE *Abies*  
*durangensis* Martínez A  
SEQUIÁS EN EL SUROESTE  
DE DURANGO MEDIANTE  
PROXIES  
DENDROECOLÓGICOS

DROUGHT RESILIENCE OF  
*Abies durangensis* Martínez IN  
SOUTHWESTERN  
DURANGO USING  
DENDROECOLOGICAL  
PROXIES

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 97-115. Enero 2025

DOI:  
10.18387/polibotanica.59.6

José Alexis Martínez-Rivas. Autor de correspondencia: [mtz.alexis05@gmail.com](mailto:mtz.alexis05@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-7799-4168>

<sup>1</sup>Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales,  
Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan,  
Valle del Sur, 34120 Durango, México

<sup>2</sup>Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,  
Universidad Juárez del Estado de Durango

Andrea Cecilia Acosta-Hernández [andrea.acostah@hotmail.com](mailto:andrea.acostah@hotmail.com)

Eduardo Daniel Vivar-Vivar [unam.vivar@gmail.com](mailto:unam.vivar@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-2052-0404>

Nancy Silva-Ávila [nancysilvaavila09@outlook.com](mailto:nancysilvaavila09@outlook.com)

Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,  
Universidad Juárez del Estado de Durango, Río Papaloapan y Blvd. Durango s/n  
Col. Valle del Sur, Durango, Dgo., 34120, México

**RESUMEN:** Los ecosistemas forestales son esenciales para la captura y el almacenamiento de carbono y la conservación de la biodiversidad, pero se enfrentan a actividades humanas y presiones de procesos naturales que pueden alterar su estructura y crecimiento. Este estudio examinó la respuesta del crecimiento radial a las condiciones climáticas, y se evaluó la resiliencia a la sequía de los árboles de *Abies durangensis* Martínez en la Sierra Madre Occidental de Durango, México, durante el periodo 1900-2022. Se analizaron 42 núcleos de madera de 21 árboles, estudiando los anillos de crecimiento anual para correlacionar los datos climáticos y de sequía con el crecimiento radial. Además, se calcularon índices de resiliencia, que evalúan la capacidad del árbol para recuperarse después de eventos de estrés, como las sequías, analizando el crecimiento antes, durante y después del evento. Nuestros resultados revelaron una correlación positiva entre el crecimiento y las precipitaciones a principios de la estación de crecimiento (marzo del año posterior, Coeficiente = 0.206,  $p < 0.05$ ). Sin embargo, las temperaturas máximas (junio del año anterior; Coeficiente = -0.170,  $p < 0.05$ ) y mínimas (junio del año anterior; Coeficiente = -0.199,  $p < 0.05$ ), junto con las sequías prolongadas, afectaron negativamente al crecimiento radial. A pesar de la sensibilidad del crecimiento radial ante condiciones climáticas adversas, los índices de resiliencia mostraron resistencia moderada y alta resiliencia tras los eventos de sequía. Aunque estas condiciones pueden ser parte de su dinámica natural, su impacto negativo sugiere que la especie podría estar alcanzando límites críticos de adaptación, lo que representa un riesgo para su sostenibilidad a largo plazo. Sin embargo, *A. durangensis* demuestra una notable capacidad de adaptación a variaciones climáticas futuras, según los resultados obtenidos. **Palabras clave:** Crecimiento radial, Resiliencia, Sequía, Adaptación climática, Sensibilidad climática.

**ABSTRACT:** Forest ecosystems are essential for carbon capture and storage, as well as biodiversity conservation, but they face pressures from human activities and natural processes that can disrupt their structure and growth. This study examined the radial growth response of *Abies durangensis* Martínez to climate conditions and evaluated its

drought resilience in the Sierra Madre Occidental of Durango, Mexico, during the period 1900-2022. We analyzed 42 growth cores from 21 trees, studying annual growth rings to correlate climatic and drought data with radial growth. Additionally, resilience indices were calculated, which measure the tree's ability to recover after stress events, such as droughts, by analyzing growth before, during, and after the event. Our results revealed a positive correlation between growth and precipitation at the beginning of the growing season (March of the following year; Coefficient = 0.206,  $p < 0.05$ ). However, maximum temperatures (June of the previous year; Coefficient = -0.170,  $p < 0.05$ ) and minimum temperatures (June of the previous year; Coefficient = -0.199,  $p < 0.05$ ), along with prolonged droughts, negatively impacted radial growth. Despite the sensitivity of radial growth to adverse climatic conditions, resilience indices showed moderate resistance and high resilience following drought events. While these conditions may be part of the species' natural dynamics, their negative impact suggests that the species could be reaching critical adaptation limits, posing a risk to its long-term sustainability. Nonetheless, *A. durangensis* demonstrates a notable capacity for adaptation to future climatic variations, according to our findings.

**Key words:** Radial growth, Resilience, Droughts, Climate adaptation, Climate sensitivity.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales son uno de los principales sumideros de carbono terrestre (Ameray *et al.*, 2021), además, son proveedores de bienes y servicios a escala local, regional y global (Von Döhren & Haase, 2015). Sin embargo, estos ecosistemas están constantemente bajo presiones antropogénicas y naturales que modifican su composición, estructura del dosel, en procesos y funciones que se desarrollan dentro de los bosques (Grantham *et al.*, 2020; Patacca *et al.*, 2023). Se han producido rápidas modificaciones en la estructura y composición de los bosques pasando de maduros a jóvenes debido a la sobreexplotación forestal y a incendios, sequías, plagas y enfermedades, etc... (Allen *et al.*, 2010; O'Hara *et al.*, 2017; Hammond *et al.*, 2022). Asimismo, la distribución y la superficie de las áreas forestales ha disminuido por el aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías provocadas por el cambio climático, lo que ha intensificado la mortalidad de las especies forestales en el mundo (Abbass *et al.*, 2022). Por ende, la comunidad científica se ha centrado en entender la dinámica de los ecosistemas forestales y la transformación de su estructura bajo los efectos del cambio climático permite anticipar su capacidad de adaptación y resistencia (Muller-Landau *et al.*, 2021; Hartmann *et al.*, 2022; McDowell *et al.*, 2022). Es importante para desarrollar estrategias que aseguren la sostenibilidad de los bosques y mitiguen los efectos del cambio climático, como la pérdida de carbono y la alteración de ciclos ecológicos.

Actividades como la productividad forestal está asociada a las limitaciones del crecimiento del arbolado, un factor clave en el almacenamiento de carbono que ayuda a mitigar los efectos del cambio climático (p.e. aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías) (Girona *et al.*, 2023). Unos de los temas que más ha captado la atención de los ecólogos es la relación entre el clima, la edad, especie, manejo y disturbios en el crecimiento radial de los árboles (Wilmking *et al.*, 2020; Rydval *et al.*, 2024), así como también la respuesta del crecimiento radial a la sequía en un contexto de cambio climático (Anderegg *et al.*, 2019). Aun cuando el crecimiento forestal depende de múltiples factores ambientales y locales, la comunidad científica concuerda en que los anillos de los árboles son un proxy confiable para establecer estas relaciones clima-crecimiento (Babst *et al.*, 2018; Wilmking *et al.*, 2020). En este contexto, la resiliencia se define como la capacidad de un ecosistema para recuperar su estructura y función tras un evento de perturbación (Lloret *et al.*, 2011). Por lo tanto, es fundamental profundizar en este tipo de estudios para comprender el proceso de adaptación de las especies forestales ante escenarios adversos (Kannenber *et al.*, 2020).

Las condiciones hidrológicas locales desempeñan un papel crucial a la hora de determinar la resiliencia al estrés causado por el calor y la sequía en los ecosistemas forestales (Song *et al.*, 2022; B. Wang *et al.*, 2022). La resiliencia en los árboles se refiere a la capacidad para mantener y recuperar una tasa de crecimiento estable después de una perturbación o un evento extremo

(p.e. sequías, incendios o plagas) (Lloret *et al.*, 2011; Marcotti *et al.*, 2021). La resiliencia está influenciada por diversos factores, como las condiciones hidrológicas locales, sequías, la variabilidad genética, la biogeografía, el tamaño de los árboles y la competencia por los recursos (Castagneri *et al.*, 2022; Locosselli *et al.*, 2024). Es por lo que analizar los efectos de estos factores y su temporalidad es valioso para cuantificar puntos de crecimiento o decrecimiento y determinar la persistencia de los bosques (Wang *et al.*, 2022). También, los árboles que integran las diferentes comunidades tienden a crecer de forma independiente en respuesta al clima, lo que muestra un patrón del crecimiento que contribuye a la estabilidad y resiliencia generales de los bosques (Castruita-Esparza *et al.*, 2019; Bernal *et al.*, 2023; Correa-Díaz *et al.*, 2023).

Existen evaluaciones que abordan la sensibilidad de la relación entre la respuesta al clima y el crecimiento (Acosta-Hernández *et al.*, 2017; Carlón Allende *et al.*, 2021). Sin embargo, nuestro conocimiento sobre cómo las especies forestales mexicanas responden a las variaciones y las condiciones climáticas locales, así como fenómenos a gran escala aún es limitado y requiere más investigación. Principalmente, las sequías extremas y los efectos acumulativos o legados afectan negativamente a los ecosistemas forestales, incidiendo más aún sobre aquellos ecosistemas especialmente vulnerables. Entre ellos, los Bosques de Alto Valor de Conservación (BAVC) son ricos en biodiversidad, constituyen el hábitat de especies en peligro, son refugios de fauna silvestre, y proporcionan servicios hidrológicos y de importancia social y cultural (Mikusiński *et al.*, 2021; García-Trujillo *et al.*, 2023).

Durango es la primera reserva forestal de México, donde destacan sus bosques de coníferas por ser ricos en biodiversidad con presencia de los géneros de *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus*, entre otras hojosas (Martínez-Rivas *et al.*, 2023); destacando las especies forestales de coníferas con distribución limitada como *Pseudotsuga*, *Picea* y *Abies*. La especie *Abies durangensis* Martínez tiene su distribución potencial centrada en grupos discontinuos en los estados de Chihuahua, Sinaloa, Jalisco y Durango (González-Elizondo *et al.*, 2012). Es una conífera endémica de México, que forma parte de comunidades con Alto Valor de Conservación, puede llegar a medir hasta 40 metros de altura, tiene conos erectos con semillas en ramas laterales sobre un corto pedúnculo y las hojas son de color verde brillante de 20-35 mm de longitud por 1-1.5 mm de ancho (CONABIO, 2016).

A pesar de que en la actualidad en México se están abordando investigaciones relacionadas con la resiliencia a la sequía de las especies forestales (Cabral-Alemán *et al.*, 2022; Correa-Díaz *et al.*, 2023), aún es necesario un mayor esfuerzo para comprender la dinámica de la resiliencia de los bosques y especies arbóreas mexicanas ante eventos climáticos extremos. En particular, responder la pregunta: ¿Cómo ha respondido el crecimiento radial de *A. durangensis* a las sequías en el suroeste de la Sierra Madre Occidental?, y ¿Cuál es su capacidad de resiliencia ante estos eventos? Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de los anillos de crecimiento radial a las condiciones climáticas y la resiliencia a los eventos de las sequías de *A. durangensis* en el suroeste de la Sierra Madre Occidental mediante *proxies* dendroecológicos. Se espera que *A. durangensis* presente una reducción significativa en el crecimiento radial durante los años de sequía, pero una alta resiliencia en las décadas más recientes debido a posibles adaptaciones a condiciones climáticas más extremas.

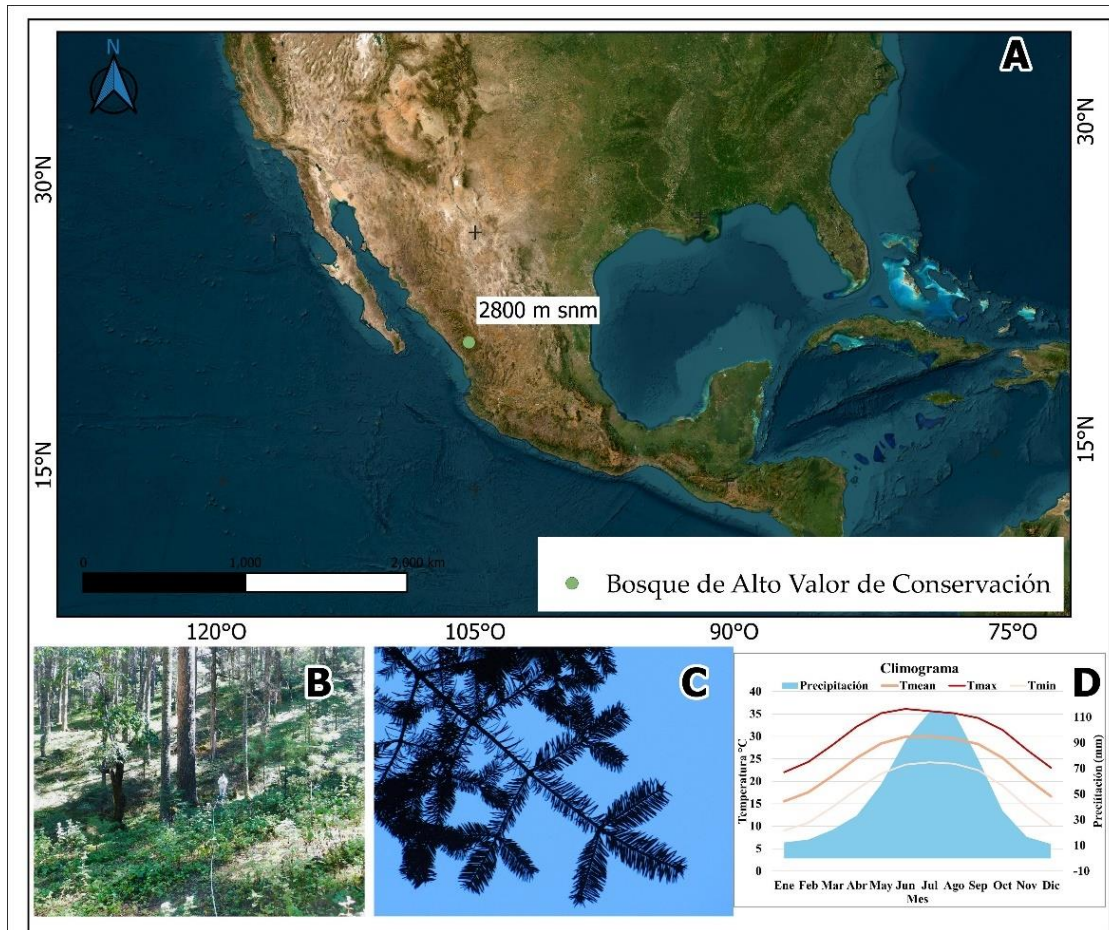
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio se ubica al suroeste del estado de Durango, en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental (SMO) a 2800 m.s.n.m. (23.6° N, -105.3°O; Figura 1).

Estos tipos de bosques se localizan principalmente en cañadas y laderas con exposición norte, cuya donde la orientación geográfica los protege de los fuertes vientos y la insolación intensa, formando un microclima húmedo y con temperaturas moderadas que favorece su adecuado crecimiento (González-Elizondo *et al.*, 2012). En el sitio de estudio convergen especies de los géneros *Abies*, *Pseudotsuga*, *Pinus*, *Juniperus* y *Quercus*, los árboles pueden alcanzar alturas de hasta 50 m y supera los 70 cm de diámetro normal.





**Figura 1.** Ubicación geográfica del área de estudio (A), Vista general de área de estudio (B), vista del follaje de *Abies durangensis* Martínez (C) y Climograma (D).

**Figure 1.** Geographical location of the study area (A), general overview of the study area (B), foliage view of *Abies durangensis* Martínez (C), and Climograph (D).

El clima del área de estudio tiene temperaturas máximas de 22.03 °C en enero a 36.11 °C en junio, mientras que las mínimas oscilan de 9.05 °C y 24.25 °C. La precipitación sigue un patrón estacional, siendo julio el mes más húmedo con 114.25 mm, mientras que enero y diciembre son los más secos, con 12.38 mm y 11.17 mm, respectivamente (Figura 1). El tipo de suelo es Cambisol dístico, y se caracteriza por un horizonte superficial rico en materia orgánica y buena fertilidad, con textura media (INEGI, 2017).

#### Colecta y procesamiento de datos dendrocronológicos

Fueron seleccionados 21 árboles de *A. durangensis* dominantes de edad desigual, contiguos a un árbol central elegido aleatoriamente, luego seleccionamos los 20 árboles adicionales ubicados más cerca del árbol centro (23.6°N, -105.3°O). Los árboles muestreados alrededor del árbol central incluyeron individuos adultos con diámetros mayores a 30 cm a una altura de 1.30 m. De cada individuo se colectaron dos núcleos de madera a una altura de 1.30 m utilizando una barrena de incremento de Pressler (5 mm de diámetro y 50 cm de longitud). Las muestras fueron montadas sobre bastidores de madera y secados a temperatura ambiente. Después se pulieron con papel lija de granulometría de gruesa a fina (100, 300, 600, 800 y 1000) hasta que fueran visibles los anillos de crecimiento (Stokes & Smiley, 1968).

Las series de crecimiento radial fueron datadas y sincronizadas mediante la identificación de años de crecimiento característicos, que son aquellos en los que los árboles muestran un crecimiento radial inusualmente rápido (anillo ancho) o reducido (anillos estrechos), generalmente en

respuesta a condiciones climáticas extremas. El ancho total de anillo o TRW (Tree Ring Width, por sus siglas en inglés), fue medido sobre cada muestra utilizando el sistema de VELMEX el cual ofrece una alta precisión (0,001 micras) (VELMEX Inc. 2016, Bloomfield, NY, EE. UU.). Luego del fechado visual y la medición de las series, se validó estadísticamente la datación cruzada mediante el programa estadístico COFECHA (Holmes, 1983). Los efectos biológicos y las tendencias geométricas de los árboles fueron eliminados mediante un modelo exponencial negativo como medio de estandarización. Este proceso se llevó a cabo utilizando la biblioteca *dplR* (Bunn, 2008) del programa estadístico R studio (R. Core Team, 2018), lo que asegura que los datos reflejan adecuadamente las variaciones en el crecimiento radial sin la influencia de estos factores. Las cronologías son consideradas registros que muestran cómo varía el crecimiento anual de los árboles con el tiempo, se generaron posterior a la estandarización a partir de las mediciones de los anillos de crecimiento (madera temprana, madera tardía y ancho total de anillo) para finalmente obtener los índices de ancho de anillo (RWI), índice que se caracteriza por su adimensionalidad, media cercana a 1,0 y varianza homogénea. Así mismo, fue calculada la señal poblacional expresada (EPS; Wigley *et al.*, 1984) para el periodo 1871–2021 para determinar la idoneidad de las cronologías en términos de la señal poblacional (EPS > 0.85), las ventanas utilizadas en el análisis fueron 50 observaciones con un paso de 25. Esto implica que se evaluaron segmentos de datos de 50 años, avanzando 25 años en cada iteración.

### Relaciones clima-crecimiento

Con el fin de identificar la influencia del clima sobre el crecimiento radial anual, se calcularon correlaciones de Pearson mediante la paquetería *treeclim* entre las variables climáticas mensuales y cronología del crecimiento radial. Se utilizó la plataforma *Climate Explorer* (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>, acceso el 20 de mayo del 2024; Trouet & Van Oldenborgh, 2013), a una resolución de 0.5° de la base de datos CRU TS v. 4.04 (Harris *et al.*, 2020) para acceder a una serie temporal consistente y de calidad que abarca desde 1900-2022, lo que permite un análisis detallado de las tendencias climáticas. La información mensual descargada correspondió a las variables temperatura mínima (TMIN), temperatura máxima (TMAX) y precipitación (PP) dentro del periodo común de 1900 a 2022.

La influencia de la intensidad y duración de la sequía sobre el crecimiento radial fue evaluada mediante correlaciones de Pearson calculadas entre la corología y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Beguería *et al.*, 2014) fue el indicador empleado para representar la sequía. Este índice basado en el balance hídrico y considera datos de precipitación y temperatura a diferentes escalas de tiempo. Los datos del SPEI fueron extraídos de la página oficial (<https://spei.csic.es/>, acceso el 20 de mayo del 2024), con una resolución espacial de 0.5° y una escala temporal de 1-48 meses para el periodo de crecimiento de 1954–2021. El SPEI es utilizado para monitorear sequías, basado en la relación entre la precipitación y la evapotranspiración, una herramienta útil para evaluar la disponibilidad hídrica en diferentes escalas temporales (Lee *et al.*, 2024).

### Índices de resiliencia

Se utilizó el paquete estadístico *pointRes* (van der Maaten-Theunissen *et al.*, 2015) para analizar años característicos y los diferentes índices de resiliencia de las cronologías de crecimiento en R studio (R Core Team, 2018). Para identificar años característicos, identificados como crecimiento anormalmente ancho o estrecho, se procedió mediante el método de normalización de ventana móvil de Neuwirth (Neuwirth *et al.*, 2007), el cual ajusta los datos de crecimiento a través de un análisis de ventanas móviles para detectar anomalías en el ancho de los anillos en comparación con las expectativas normales de crecimiento. Para conocer la capacidad de recuperar el crecimiento anterior a un disturbio, se utilizó el cálculo de los índices de resistencia, recuperación, resiliencia y periodo de recuperación de *A. durangensis* a la sequía (Lloret *et al.*, 2011).

La resistencia mide la capacidad de la vegetación para mantener su funcionamiento (por ejemplo, crecimiento, producción de biomasa) durante una sequía. Se calcula como la proporción del estado del crecimiento durante la sequía en comparación con su estado antes de la sequía.

$$Rt = \frac{Dr}{PreDr}$$

Donde: *Dr*: Crecimiento durante la sequía y *PreDr*: Crecimiento en el período previo 5 años de la sequía.

La recuperación mide la capacidad del ecosistema para volver a su estado original después de que la sequía ha terminado. Se calcula como la proporción del estado del crecimiento después de la sequía en comparación con su estado durante la sequía.

$$Rc = \frac{\text{PostDr}}{\text{Dr}}$$

Donde: *PostDr*: Crecimiento después de la sequía y *Dr*: Crecimiento durante la sequía.

La resiliencia combina la resistencia y la recuperación, proporcionando una medida global de la capacidad del ecosistema para soportar y recuperarse de la sequía. Se calcula como la proporción del estado del crecimiento después de la sequía en comparación con su estado antes de la sequía.

$$Rs = \left( \frac{\text{PostDr} - \text{Dr}}{\text{PreDr} - \text{Dr}} \right) \left( 1 - \left( \frac{\text{Dr}}{\text{PreDr}} \right) \right)$$

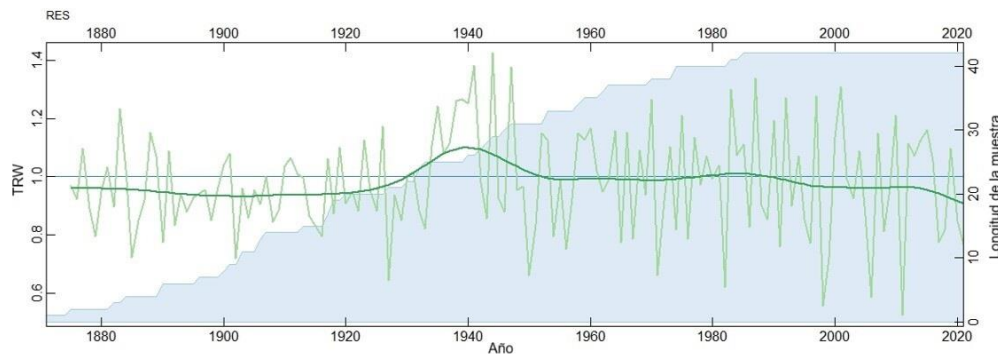
Donde: *PostDr*: Crecimiento después de la sequía y *PreDr*: Crecimiento en el período previo a la sequía y *Dr*: Crecimiento durante la sequía.

El periodo de recuperación representa el tiempo necesario para que el crecimiento alcance los niveles previos a la perturbación, lo cual es crucial para entender la dinámica de la respuesta del ecosistema a eventos estresantes como la sequía.

## RESULTADOS

### Crecimiento de radial

Las mediciones de ancho total de anillo para *A. durangensis* mostraron un crecimiento promedio de  $0.961 \pm 0.251$  mm/año con una amplitud o extensión de 151 años correspondientes al periodo 1870-2022, la intercorrelación entre series fue de 0.655, con una sensibilidad media de 0.274 mostró una autocorrelación de primer orden de 0.802 y se registró un EPS de 0.981, Estos resultados sugieren que *A. durangensis* presenta patrones de crecimiento particulares, los cuales se reflejan en años indicadores comunes (Figura 2). La variabilidad interanual del crecimiento puede ser evaluada analíticamente, considerando que los anillos de crecimiento pueden ser clasificados como anillos estrechos, asociados a condiciones de sequía, o anillos anchos relacionados con años húmedos. Por ejemplo, los años 2011, 2006, 1998, 1991, 1983, 1962, 1950, 1927, 1902, 1890 y 1885 son identificados como anillos estrechos, mientras que 2010, 2005, 2002, 1996, 1990, 1986, 1983, 1961, 1948, 1945 y 1941 corresponden a anillos anchos.



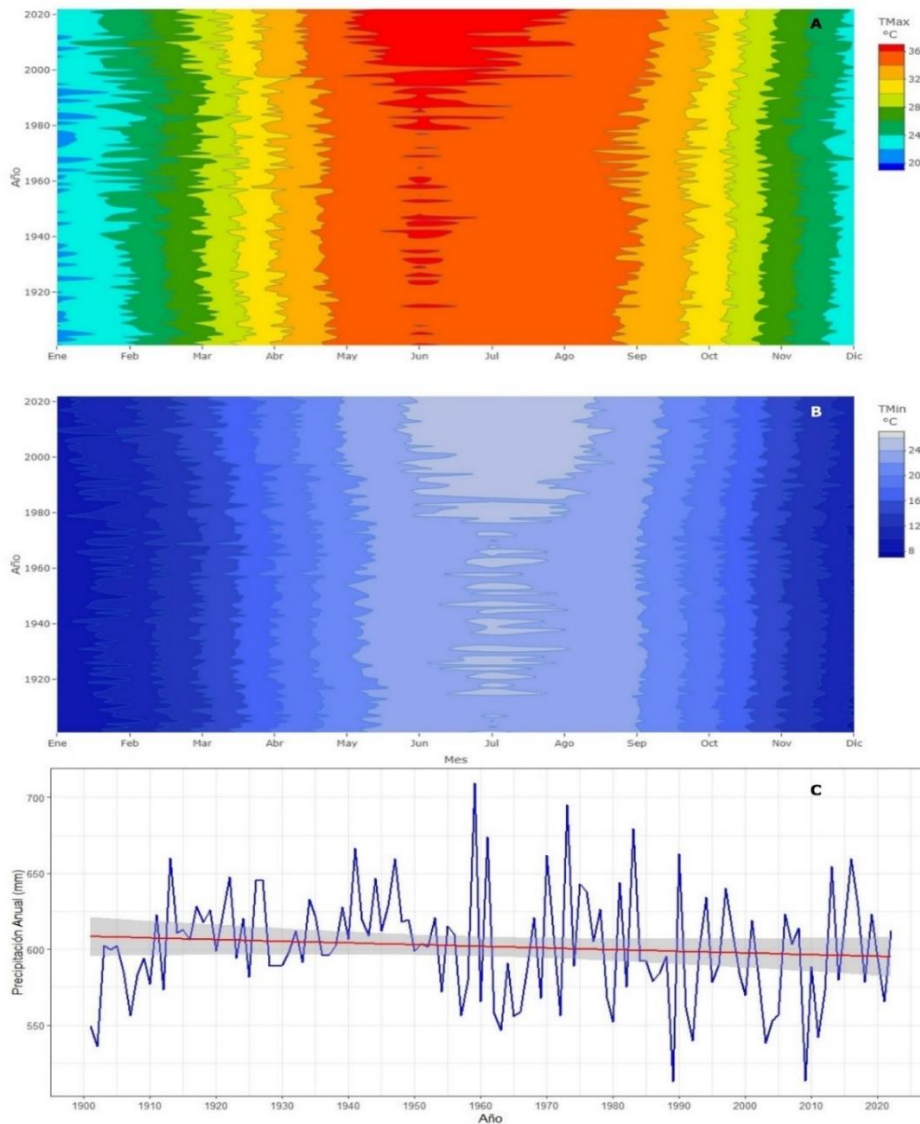
**Figura 2.** Cronología residual de índice de ancho de anillo (verde olivo) de *A. durangensis*. La línea verde oscura representa el spliline, mientras que el área azul indica el número de radios medidos (profundidad de la muestra) para cada año (eje y derecho).

**Figure 2:** Residual chronology of *A. durangensis* tree ring width index (olive green). The dark green line represents the moving averages, while the blue area indicates the number of measured radii (sample depth) for each year (right y-axis).

Sin embargo, el índice de ancho de anillo de *A. durangensis* también revela que, en algunos periodos, como de 1940 a 2022, presenta una correlación más clara con los aumentos en la temperatura máxima (TMAX), sugiriendo que no solo la precipitación, sino también la temperatura, tiene un rol clave en la variabilidad del crecimiento radial. (Figura 2). Las variaciones de temperatura máxima y mínima también comienzan a tener un incremento a partir de 1940, mientras que la precipitación no mostró una tendencia temporal por lo que la disminución del índice de TRW tiene correspondencia con el incremento de temperatura (Figura 3).

### Correlación con clima

De acuerdo con los datos obtenidos de *Climate Explorer*, se puede observar que, las temperaturas máximas y mínimas promedio de cada mes, han comenzado a incrementarse a partir de 1980 (Figura 3). Caso contrario con lo que ocurre con la precipitación a partir de ese año, que no muestra una tendencia significativa en este periodo, sin embargo, ha comenzado a disminuir (Figura 3).

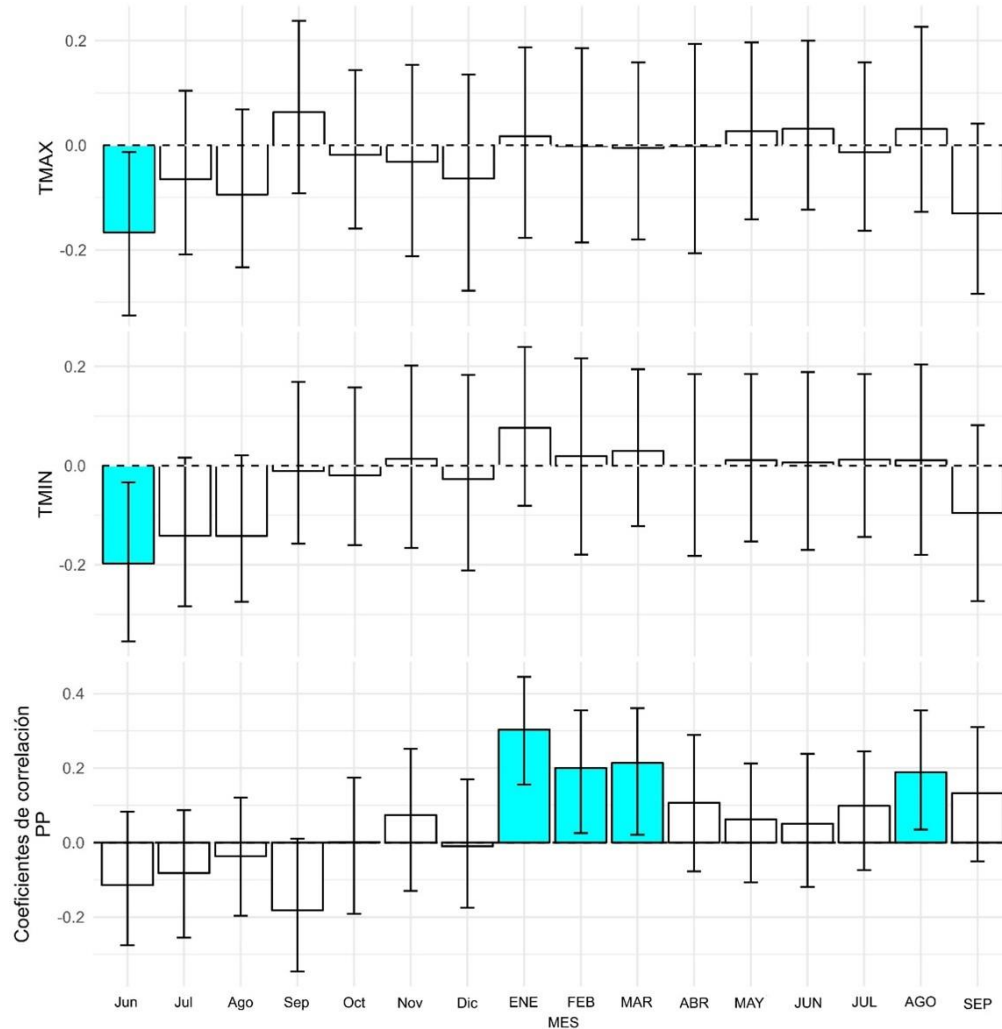


**Figura 3.** Registros históricos mensuales a partir de 1900 de Temperatura máxima, mínima y precipitación obtenidos a partir de *Cimate Explorer*.

**Figure 3.** Monthly historical records dating back to 1900 of maximum temperature, minimum temperature, and precipitation obtained from *Climate Explorer*.



El análisis de correlación realizado mediante el paquete estadístico treeclim para el periodo 1900-2021 reveló la relación entre las variables climáticas y el crecimiento de los anillos de *A. durangensis*. Estos coeficientes indican la magnitud y el signo de la correlación entre las variables climáticas y el crecimiento de los anillos (Figura 4).



**Figura 4.** Correlaciones de la cronología del ancho de anillo con la temperatura máxima, la temperatura mínima y la precipitación (TMAX, TMIN y PP, respectivamente). Los meses en minúsculas corresponden al periodo de crecimiento anterior, mientras que los que están en mayúsculas representan el año actual. Las correlaciones que son estadísticamente significativas se destacan en cian y se obtuvieron a un nivel de confianza del 95%.

**Figure 4.** Correlations of the ring-width chronology with maximum temperature, minimum temperature, and precipitation (TMAX, TMIN, and PP, respectively). The months in lowercase refer to the previous growth period, while those in uppercase indicate the current year. Statistically significant correlations are highlighted in cyan and were obtained at a 95% confidence level.

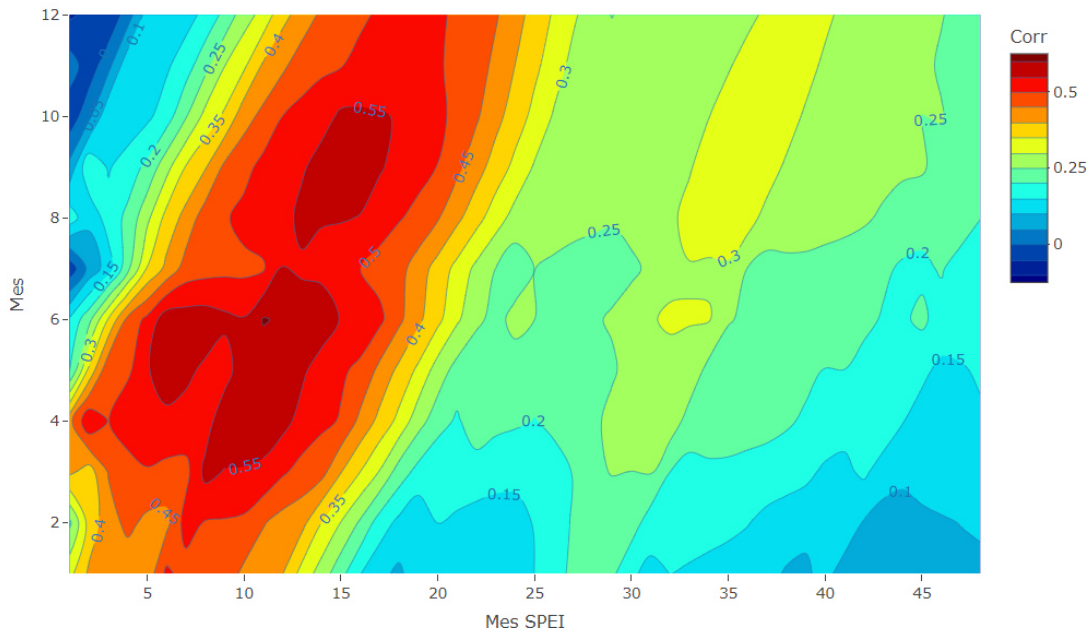
Para la TMAX, el coeficiente de correlación para junio del año anterior es -0.172, lo que sugiere una correlación negativa significativa ( $p < 0.05$ ) con el crecimiento del ancho de anillo. Esto indica que temperaturas máximas diarias mayores en junio del año anterior están asociadas con anillos de crecimiento más estrechos en el año siguiente.

En cuanto a la TMIN, en junio (-0.202) las temperaturas mínimas nocturnas más elevadas están asociadas con anillos de crecimiento más estrechos en el año siguiente ( $p < 0.05$ ). Estos resultados sugieren que los patrones de temperatura mínima durante estos meses pueden tener un impacto significativo en el crecimiento de los anillos de *A. durangensis*. Por otro lado, para la PP se

muestran correlaciones positivas significativas con el crecimiento de los anillos en enero, febrero, marzo y agosto del año siguiente con incrementos porcentuales del 30.6%, 20.1%, 20.9% y 19.1%, respectivamente. Esto sugiere que una mayor precipitación durante estos meses está asociada con anillos de crecimiento más anchos en el mismo año (Figura 4).

### SPEI y TRW

El análisis de las correlaciones entre los meses del año del SPEI y TRW, revelan una fuerte relación entre la variabilidad climática y el crecimiento radial de los árboles. Las correlaciones de 0.39-0.60 indican que los patrones de crecimiento radial están estrechamente vinculados con el SPEI en diferentes periodos del año. Durante los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, y diciembre y la sequía acumulada desde 2 a 20 meses se observan correlaciones de 0.39 (Figura 5). Esto sugiere que el SPEI tiene un impacto significativo en el crecimiento radial de los árboles. En términos ecológicos, esto significa que la disponibilidad de agua es un factor crítico que influye en la capacidad de los árboles para crecer y desarrollarse. Un balance hídrico positivo, donde la precipitación es suficiente para satisfacer las demandas de evapotranspiración, se traduce en un aumento en el crecimiento radial.



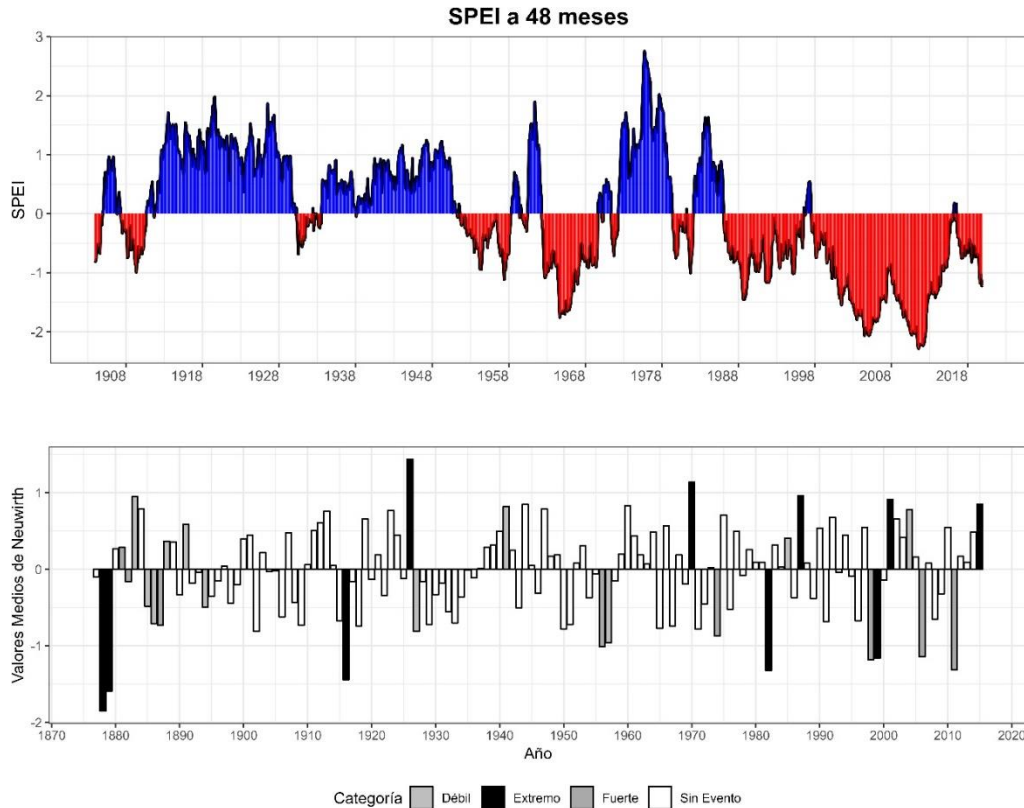
**Figura 5.** Correlaciones de los meses de crecimiento (enero-diciembre [1-12], eje y) en relación con la sequía y el crecimiento de *A. durangensis* relacionando con TRW y el índice de sequía SPEI acumulado, considerando escalas de hasta 48 meses (eje x). Las correlaciones se calcularon para el periodo común y mejor replicado 1900-2021. Los coeficientes de correlación por encima de los valores de 0.30- 0.60 son significativos en  $P < 0.05$  y  $P < 0.01$ , respectivamente.

**Figure 5.** Correlations of growth months (January-December [1-12], y-axis) in relation to drought and growth of *A. durangensis*, linking with TRW and the accumulated drought index SPEI, considering scales of up to 48 months (x-axis). The correlations were calculated for the common and best-replicated period of 1900-2021. Correlation coefficients above the values of 0.30-0.60 are significant at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively.

### Índices de Resiliencia

Los años característicos indica que los años extremos corresponden a eventos climáticos extremos, ya sean adversos o favorables y tienen un impacto significativo en el crecimiento de los anillos *A. durangensis*, ya sea de manera negativa o positiva. Los años característicos negativos extremos, como 1999, 1982, 1916, 1880 y 1879, sugieren sequías u otros factores ambientales negativos que resultaron en anillos más estrechos. En contraste, los años característicos positivos extremos registrados fueron 2015, 2001, 1987, 1970 y 1921. Los años

característicos negativos fuertes fueron 2011, 2006, 1998, 1974, 1956, y 1987, mientras que solo 1881 fue positivo fuerte.

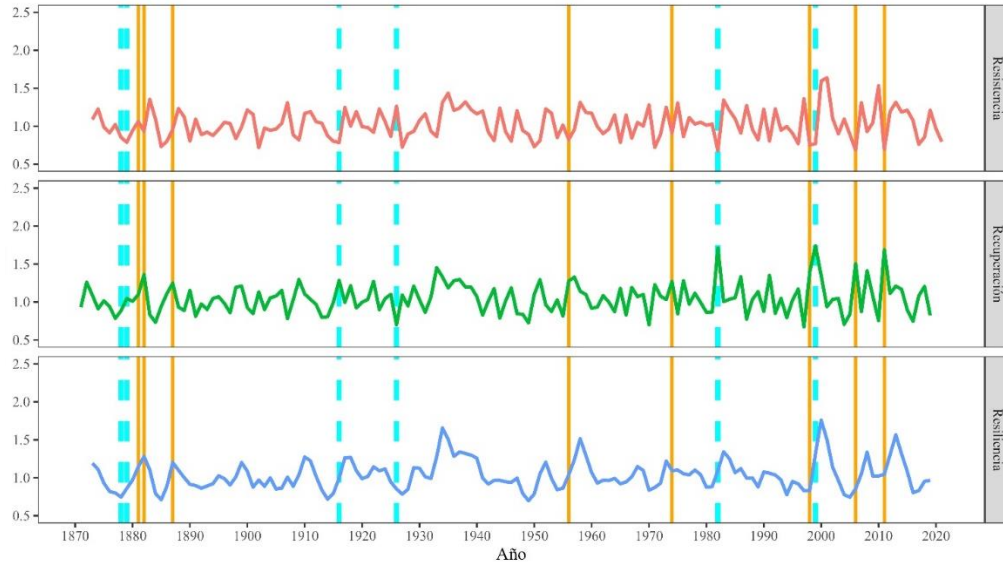


**Figura 6.** SPEI a 48 meses (superior) para el periodo 1900-2020 y valores medios de Neuwirth para el periodo 1878-2020 (inferior). Años característicos positivos y negativos mostrando aumentos y reducciones en el crecimiento radial (TRW, Tree-Ring Width), respectivamente.

**Figure 6.** 48-month SPEI (top) for the period 1900-2020 and Neuwirth mean values for the period 1878-2020 (bottom). Positive and negative pointer years show increases and decreases in radial growth (TRW, Tree-Ring Width), respectively.

Aunque es probable que las sequías hayan sido un factor clave, es necesario considerar otros posibles factores ambientales negativos, como la competencia del suelo o perturbaciones biológicas, que podrían contribuir al desarrollo de anillos más estrechos (Figura 6).

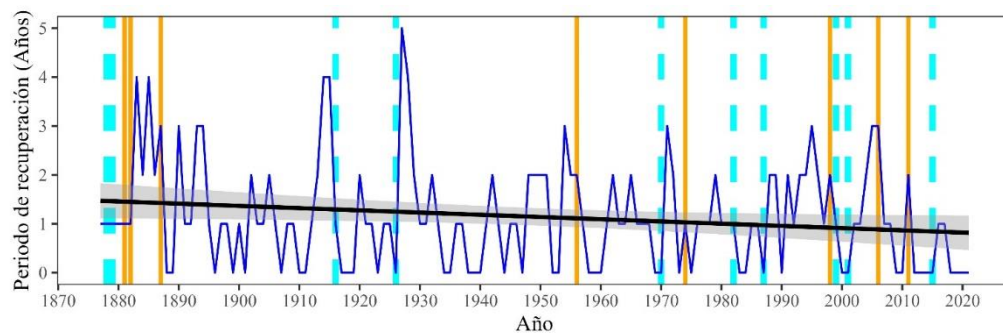
En la Figura 7 se muestra la variación anual de los índices de resistencia, recuperación y resiliencia de TRW de *A. durangensis* para la extensión de la cronología de 1870-2021. A partir de 1990, los índices de recuperación, resistencia y resiliencia tienen una mayor variación que en los años anteriores, coincidiendo con una reducción del crecimiento medio de *A. durangensis*. Sin embargo, para los años identificados como característicos extremos negativos 1999, 1982 y los años negativos fuertes 1956, 1957, 1974, 1998, 2006 y 2011, éstos presentan registros más elevados de estos índices en comparación con los años no característicos. La resistencia registro los menores valores en los años 1982, 1998, 1999, 2006 y 2011. En cuanto a la recuperación, registró los mayores valores para esos mismos años. La resiliencia mostró variaciones a lo largo del periodo. En 1998, 1999, 2011 y 2012 se observaron valores de resiliencia con mayor frecuencia partir del fin del siglo XX. Se muestra que, las reducciones en el crecimiento son más irregulares e intensas, en donde se ve reflejado en la resistencia, la recuperación y resiliencia (Figura 7).



**Figura 7.** Índices de resistencia, recuperación y resiliencia para el periodo de 1870-2021. Años característicos negativos extremos: línea cyan y años característicos fuertes: líneas naranja.

**Figure 7.** Resistance, recovery, and resilience indices for the period 1870-2021. Extreme negative pointer years: cyan line, and strong pointer years: orange lines

El análisis del periodo de recuperación ha revelado una disminución significativa del tiempo de recuperación a lo largo del tiempo (pendiente =  $-0.0045$ ,  $p = 0.0381$ ), lo que indica que, en promedio, la especie está tardando menos en recuperar a los niveles de crecimiento pre-sequía (Figura 8). Este hallazgo parece contradictorio al considerar que la resistencia ha disminuido. Sin embargo, una posible explicación es que las condiciones post-evento, como la disponibilidad de agua y nutrientes, han mejorado en algunos casos, permitiendo que los árboles se recuperen más rápidamente. Alternativamente, podría haber un efecto compensatorio, donde la especie invierte más recursos en su recuperación a expensas de otros procesos, como el crecimiento a largo plazo.



**Figura 8.** Tendencia del Periodo de recuperación de *Abies durangensis* de 1880-2021 (línea azul). Años característicos negativos extremos: línea cyan, años característicos negativos fuertes: líneas naranja, y línea de tendencia: línea negra.

**Figure 8.** Trend of *Abies durangensis* Recovery Period from 1880-2021 (blue line). Extreme negative pointer years: cyan line, strong negative pointer years: orange lines, and trend line: black line.

A pesar de la disminución en el tiempo de recuperación, la estabilidad en los índices de resiliencia sugiere que *A. durangensis* mantiene una capacidad para recuperarse, pero sin lograr una adaptación superior en el tiempo. Esto resalta la complejidad de la dinámica de crecimiento post-sequía, en donde factores como el cambio climático, la disponibilidad de recursos y las perturbaciones forestales juegan roles interrelacionados. Aunque la especie puede recuperarse



más rápidamente, su resistencia y resiliencia no han mejorado significativamente, lo que podría tener implicaciones importantes en la capacidad de *A. durangensis* para enfrentar futuros eventos extremos. Es crucial profundizar en el análisis de estos patrones para entender si el cambio en el tiempo de recuperación está vinculado a una mayor vulnerabilidad general del ecosistema o si responde a cambios en las dinámicas forestales a nivel local.

## DISCUSIÓN

La cronología evaluada muestra robustez, con un valor de señal poblacional expresada (EPS) de 0.981, similar a las reportadas en otros estudios (Villanueva-Díaz *et al.*, 2016), indicando una alta fiabilidad en la serie cronológica. Con 42 núcleos y un total de 861 anillos, la correlación media ( $\bar{r}$ ) fue de 0.546, lo que sugiere una adecuada consistencia entre las muestras.

Estudios anteriores han abordado la respuesta de crecimiento de los bosques a las condiciones climáticas, mostrando discrepancias entre los autores respecto al impacto de las señales climáticas por la edad. Mientras que algunos sugieren que la edad influye en dichas señales (Hadad *et al.*, 2015; Jiao *et al.*, 2017; Belokopytova *et al.*, 2022), otros indican que las respuestas de crecimiento ante el clima son independientes de la edad (Linares *et al.*, 2013). Esta divergencia sugiere que factores adicionales podrían estar modulando las respuestas del crecimiento de las especies arbóreas frente a las condiciones climáticas. Aunque no se evaluó directamente en este estudio, se reconoce que la edad puede ser un factor relevante en futuras investigaciones más específicas sobre el papel de la edad y otros factores en diferentes especies y regiones. Estos métodos no destructivos son una opción para evitar la remoción del arbolado, y necesarios para nuestra comprensión de la influencia de estos procesos naturales en el crecimiento de los árboles a condiciones extremas cada vez más recurrentes. Además, estos cálculos son vitales para sustentar propuestas de mitigación al cambio climático (Cabral-Alemán *et al.*, 2022).

Esta investigación contribuye al posicionamiento de México en la agenda internacional sobre el tema de resiliencia de especies ante el cambio climático (Gazol *et al.*, 2017; Schwarz *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2022). Los resultados de esta investigación comprenden 151 años de resiliencia a la sequía en *A. durangensis* al suroeste de la SMO de Durango. En términos de vulnerabilidad climática, encontramos que *A. durangensis* es sensible al estrés por sequía similar a lo reportado anteriormente (Pompa-García *et al.*, 2017), lo que pone en evidencia que será más vulnerable a las condiciones cada vez más cálidas y secas durante este siglo (Wang & Wang, 2024).

La sensibilidad de las especies forestales a las variaciones climáticas es contrastante, especialmente en términos de condiciones cálidas (Camarero *et al.*, 2021). Por ejemplo, *A. durangensis* se correlacionó negativamente con las TMAX y TMIN en el mes de junio (Figura 4). En concordancia, las reducciones del crecimiento radial de TRW (Figura 2) decrecieron cuando comenzaron a incrementar las TMAX y TMIN a partir de 1970 (Figura 2 y 3) este mismo comportamiento también fue reportado por Pompa-García *et al.* (2017). Un coeficiente de correlación bajo no necesariamente indica que no haya una relación significativa; podría reflejar la complejidad de los factores ambientales y biológicos que interactúan en el proceso de crecimiento. A pesar de la existencia de una relación, otros factores influyentes en el crecimiento de los anillos no están siendo considerados en este análisis y, por lo tanto, podrían ser objeto de investigaciones adicionales para comprender mejor la variabilidad observada.

La falta de correlación entre la precipitación y el crecimiento radial sugiere que la respuesta del crecimiento a la humedad del suelo puede ser retardada y dependiente de otros factores como la temperatura y la luz solar. Además, el estrés hídrico acumulado puede limitar el crecimiento, resaltando la complejidad de la relación entre estas variables (Lloret *et al.*, 2011). Además, se ha documentado que *A. durangensis* responde significativamente al clima en su crecimiento radial, los anchos de los anillos son más sensibles a las condiciones de humedad, mientras que la densidad de la madera se ve más afectada por la temperatura. (González-Cásares, Pompa-García & Venegas-González, 2019).

Los meses de primavera y verano (marzo a agosto) muestran correlaciones altas. Estos meses coinciden con la temporada de crecimiento activo de los árboles. En otoño (septiembre a noviembre), las correlaciones altas sugieren que la disponibilidad de agua sigue siendo importante para el crecimiento radial, posiblemente debido a la acumulación de reservas y la

preparación para el invierno. Incluso en diciembre, las correlaciones positivas indican que el balance hídrico puede estar reflejando los efectos acumulativos o residuales de las condiciones climáticas a lo largo del año. Las correlaciones mayores a 0.39 entre el SPEI y los meses del año de crecimiento destacan la importancia del balance hídrico en el crecimiento radial de los árboles. Estas relaciones subrayan la sensibilidad de *A. durangensis* a las variaciones climáticas, especialmente en términos de disponibilidad de agua.

Nuestros resultados sugieren que desde 1990 a 2022 han ocurrido 4 eventos de reducciones del crecimiento (1998, 1999, 2006 y 2011). Estos eventos han sido identificados en otras investigaciones como sequías en el norte del país (Pompa-García *et al.*, 2017; Castruita-Esparza *et al.*, 2019; Cabral-Alemán *et al.*, 2022). Además, los años 1956, 1974 y 1982 también fueron registrados como reducciones de crecimiento por sequías en otras investigaciones del norte el país (Carlón Allende *et al.*, 2021; Cabral-Alemán *et al.*, 2022; Correa-Díaz *et al.*, 2023). En los años 1878 y 1879 los estados del norte de México sufrieron una sequía que provocó gran escasez y carencia de alimentos (Cerano Paredes *et al.*, 2011; Domínguez, 2016). Estos eventos también fueron registrados en esta investigación como eventos extremos de reducción del crecimiento radial.

En total fueron registradas 9 reducciones del crecimiento radial a lo largo de 1910-2020 años que corresponden a sequías históricas que azotaron el norte de México. Nuestros resultados sugieren que *A. durangensis* ha estado sometido a mayores presiones climáticas, lo que se refleja en una disminución de su resistencia y un aumento en la capacidad de recuperación. Esto ha llevado a una mayor resiliencia frente a la creciente recurrencia e intensidad de los periodos secos en México durante las últimas décadas (Stahle *et al.*, 2016; Pompa-García *et al.*, 2017; Correa-Díaz *et al.*, 2023). Sin embargo, esta interpretación podría deberse a otros factores no climáticos, como la competencia intraespecífica, las condiciones edáficas o perturbaciones bióticas, que pudieron haber influido en el crecimiento de los anillos. Para mejorar la precisión, sería conveniente complementar el análisis con datos ambientales, como humedad del suelo, plagas y enfermedades que ayuden a determinar el origen multifactorial de las observaciones.

Los valores de resistencia, recuperación y resiliencia tienen concordancia con los registrados para otras especies mexicanas. Por ejemplo, Correa-Díaz *et al.* (2023) encontraron que *Abies concolor* y *Pinus jeffreyi* presentaron una baja resistencia a la sequía, pero mostraron una alta capacidad de recuperación. En contraste con *Pinus lumholtzi* tuvo un valor de resistencia más alto, aunque su recuperación fue menor. Por otro lado, *Pinus lambertana* mostró una resistencia intermedia y una buena capacidad de recuperación. Además, también mostraron concordancia con especies como *Pinus ponderosa* Douglas en E.E.U.U y *Araucaria araucana* (Molina) en Argentina (Lloret *et al.*, 2011; Piraino *et al.*, 2022).

Una limitante de nuestra investigación fue la evaluación del comportamiento dendroclimático de un solo sitio para la especie, lo que no representa un gradiente geográfico amplio que podría revelar las limitaciones de la respuesta a los factores climáticos bajo condiciones diferentes. Además, otra limitante son los datos climáticos, pues al no tener datos climáticos detallados a nivel local podría subestimar la correlación precisa entre las variables climáticas con los anillos de crecimiento, lo que podría afectar en la exactitud de las conclusiones sobre la relación clima-crecimiento. Por tanto, se sugiere para futuros estudios complementar datos climáticos de mayor resolución u otras fuentes de datos climáticos.

## CONCLUSIONES

El crecimiento radial de *A. durangensis* durante el periodo 1910-2020 mostró una correlación positiva con las precipitaciones y negativas con la temperatura máxima y mínima. Este crecimiento fue especialmente sensible a los periodos de sequía acumulada, mientras que años con abundantes precipitaciones y temperaturas moderadas favorecieron el crecimiento radial. *A. durangensis* muestra una notable capacidad para recuperarse de eventos climáticos extremos, aprovechando eficientemente los recursos hídricos y restaurando su tasa de crecimiento anterior. Aunque mantiene su resistencia durante periodos de sequía, la recuperación puede verse afectada. A pesar de un aumento en la resiliencia para recuperar tasas de crecimiento previas a estos

eventos, la creciente frecuencia e intensidad de las sequías asociadas al cambio climático podría comprometer su capacidad de recuperación.

La protección de los BAVC es esencial para mantener servicios ecosistémicos críticos. Este estudio resalta la importancia de priorizar la conservación de estos bosques, enfocándose en estrategias prácticas que promuevan su resiliencia ante el cambio climático. Se recomienda adaptar las prácticas de manejo forestal para aumentar su resistencia a condiciones climáticas extremas, así como fomentar la reforestación garantizando la preservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Los estudios dendroecológicos no destructivos constituyen una evaluación del pasado que permite realizar una proyección del comportamiento futuro de nuestros bosques. Analizar los anillos de crecimiento mediante técnicas no destructivas ayuda comprender la vida y el comportamiento de las especies forestales, y permiten pronosticar como influyen los cambios ambientales en el crecimiento de especies forestales.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo de la beca doctoral 1012625. Agradecemos al equipo de DendroRed (<https://dendrored.ujed.mx/>) y al Laboratorio de Dendroecología de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Juárez del Estado de Durango por las facilidades para la toma de datos de campo y procesamiento de muestras.

## LITERATURA CITADA

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). An Updated Review of Dendrochronological Investigations in Mexico, a Megadiverse Country with a High Potential for Tree-Ring Sciences. *Forests* 2017, Vol. 8, Page 160, 8(5), 160. <https://doi.org/10.3390/f8050160>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., . . . Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., & et al. (2021). Forest Carbon Management: a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*, 7, 245–266. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>
- Anderegg, W. R. L., Trugman, A. T., Bowling, D. R., Salvucci, G., & Tuttle, S. E. (2019). Plant functional traits and climate influence drought intensification and land–atmosphere feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(28), 14071–14076. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904747116>
- Babst, F., Bodesheim, P., Charney, N., Friend, A. D., Girardin, M. P., Klesse, S., Moore, D. J. P., Seftigen, K., Björklund, J., Bouriaud, O., Dawson, A., DeRose, R. J., Dietze, M. C., Eckes, A. H., Enquist, B., Frank, D. C., Mahecha, M. D., Poulter, B., Record, S., . . . Evans, M. E. K. (2018). When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro- and prospective insight. *Quaternary Science Reviews*, 197, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.009>
- Beguera, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>

- Belokopytova, L. V., Zhirnova, D. F., Krutovsky, K. V., Mapitov, N. B., Vaganov, E. A., & Babushkina, E. A. (2022). Species-and Age-Specific Growth Reactions to Extreme Droughts of the Keystone Tree Species across Forest-Steppe and Sub-Taiga Habitats of South Siberia. *Forests*, 13(7), 1027. <https://doi.org/10.3390/f13071027>
- Bernal, A. A., Kane, J. M., Knapp, E. E., & Zald, H. S. J. (2023). Tree resistance to drought and bark beetle-associated mortality following thinning and prescribed fire treatments. *Forest Ecology and Management*, 530, 120758. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120758>
- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Cabral-Alemán, C., Villanueva-Díaz, J., Quiñonez-Barraza, G., & Gómez-Guerrero, A. (2022). Resilience of *Pinus durangensis* Martínez in Extreme Drought Periods: Vertical and Horizontal Response of Tree Rings. *Atmosphere* 2023, Vol. 14, Page 43, 14(1), 43. <https://doi.org/10.3390/atmos14010043>
- Camarero, J. J., Gazol, A., Linares, J. C., Fajardo, A., Colangelo, M., Valeriano, C., Sánchez-Salguero, R., Sangüesa-Barreda, G., Granda, E., & Gimeno, T. E. (2021). Differences in temperature sensitivity and drought recovery between natural stands and plantations of conifers are species-specific. *Science of The Total Environment*, 796, 148930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148930>
- Carlón Allende, T., Villanueva Díaz, J., Soto Castro, G., Mendoza, M. E., & Macías, J. L. (2021). Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico. *Ecological Indicators*, 120, 106920. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920>
- Castagneri, D., Vacchiano, G., Hacket-Pain, A., DeRose, R. J., Klein, T., & Bottero, A. (2022). Meta-analysis Reveals Different Competition Effects on Tree Growth Resistance and Resilience to Drought. *Ecosystems*, 25(1), 30–43. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00638-4>
- 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>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, D. R., Méndez-González, J., & Constante-García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 235–249. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a6.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2016). *Oyamel norteño (Abies durangensis)*. EncicloVida. <https://enciclovida.mx/especies/155240-abies-durangensis>
- 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>
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 77–93. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000500077&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500077&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- García-Trujillo, Z. H. M. K., Torres-Pérez, J. A., Cázares-Morán, M. A., Avitia-Deras, A., Claudia Palafox-Barcenas, & Ku-De Dios, E. N. (2023). Percepción social de las reservas naturales en Ejidos de Quintana Roo: Social perception of natural reserves in Ejidos de Quintana Roo. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(1), 126–139. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n1-012>
- Gazol, A., Camarero, J. J., Anderegg, W. R. L., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. *Global Ecology and Biogeography*, 26(2), 166–176. <https://doi.org/10.1111/geb.12526>
- Girona, M. M., Aakala, T., Aquilué, N., Bélisle, A. C., Chaste, E., Danneyrolles, V., Díaz-Yáñez, O., D'Orangeville, L., Grosbois, G., Hester, A., Kim, S., Kulha, N., Martin, M., Moussaoui,



- L., Pappas, C., Portier, J., Teitelbaum, S., Tremblay, J. P., Svensson, J., ... Gauthier, S. (2023). Challenges for the Sustainable Management of the Boreal Forest Under Climate Change. *Advances in Global Change Research*, 74, 773–837. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_31)
- González-Cásares, M., Pompa-García, M., & Venegas-González, A. (2019). Climate signals from intra-annual wood density fluctuations in *Abies durangensis*. *IAWA journal*, 40(2), 276–287. Disponible en: <https://doi.org/10.1163/22941932-40190217>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la sierra madre occidental, México: una síntesis. *Acta Botanica Mexicana*, 100, 351–403. <https://www.scielo.org.mx/pdf/abm/n100/n100a12.pdf>
- Grantham, H. S., Duncan, A., Evans, T. D., Jones, K. R., Beyer, H. L., Schuster, R., Walston, J., Ray, J. C., Robinson, J. G., Callow, M., Clements, T., Costa, H. M., DeGemmis, A., Elsen, P. R., Ervin, J., Franco, P., Goldman, E., Goetz, S., Hansen, A., ... Watson, J. E. M. (2020). Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19493-3>
- Hadad, M. A., Roig Juñent, F. A., Boninsegna, J. A., & Patón, D. (2015). Age effects on the climatic signal in *Araucaria araucana* from xeric sites in Patagonia, Argentina. *Plant Ecology & Diversity*, 8(3), 343–351. <https://doi.org/10.1080/17550874.2014.980350>
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., ... Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), 1761. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 2020 7:1, 7(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hartmann, H., Bastos, A., Das, A. J., Esquivel-Muelbert, A., Hammond, W. M., Martínez-Vilalta, J., McDowell, N. G., Powers, J. S., Pugh, T. A. M., Ruthrof, K. X., & Allen, C. D. (2022). Climate Change Risks to Global Forest Health: Emergence of Unexpected Events of Elevated Tree Mortality Worldwide. *Annual Review of Plant Biology*, 73(Volume 73, 2022), 673–702. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012804>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement Item Type Article Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 43. <http://hdl.handle.net/10150/261223>
- INEGI. (2017). Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250,000, Serie VI. Dirección General de Geografía. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Ags., México.
- Jiao, L., Jiang, Y., Wang, M., Zhang, W., & Zhang, Y. (2017). Age-Effect Radial Growth Responses of *Picea schrenkiana* to Climate Change in the Eastern Tianshan Mountains, Northwest China. *Forests* 2017, Vol. 8, Page 294, 8(9), 294. <https://doi.org/10.3390/f8090294>
- Kannenbergh, S. A., Schwalm, C. R., & Anderegg, W. R. L. (2020). Ghosts of the past: how drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling. *Ecology Letters*, 23(5), 891–901. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ele.13485>
- Lee, S., Moriasi, D. N., Mehr, A. D., & Mirchi, A. (2024). Sensitivity of Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) to the choice of SPEI probability distribution and evapotranspiration method. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101761. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101761>
- 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>

- Locosselli, G. M., Cintra, B. B. L., Ferreira, L. S., da Silva-Luz, C. L., Miyahara, A. A. L., Brienen, R. J. W., Gloor, E., Boom, A., Grandis, A., & Buckeridge, M. S. (2024). Stress-tolerant trees for resilient cities: Tree-ring analysis reveals species suitable for a future climate. *Urban Climate*, 55, 101964. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101964>
- Marcotti, E., Amoroso, M. M., Rodríguez-Catón, M., Vega, L., Srur, A. M., & Villalba, R. (2021). Growth resilience of *Austrocedrus chilensis* to drought along a precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management*, 496, 119388. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119388>
- Martínez-Rivas, J. A., Vargas-Larreta, B., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., Hernández, F. J., & Ángeles-Pérez, G. (2023). Understanding Soil Respiration Dynamics in Temperate Forests in Northwestern Mexico. *Forests* 2023, Vol. 14, Page 1763, 14(9), 1763. <https://doi.org/10.3390/f14091763>
- McDowell, N. G., Sapes, G., Pivovarov, A., Adams, H. D., Allen, C. D., Anderegg, W. R. L., Arend, M., Breshears, D. D., Brodribb, T., Choat, B., Cochard, H., De Cáceres, M., De Kauwe, M. G., Grossiord, C., Hammond, W. M., Hartmann, H., Hoch, G., Kahmen, A., Klein, T., ... Xu, C. (2022). Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO<sub>2</sub> and vapour pressure deficit. *Nature Reviews Earth & Environment* 2022 3:5, 3(5), 294–308. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00272-1>
- Mikusiński, G., Orlikowska, E. H., Bubnicki, J. W., Jonsson, B. G., & Svensson, J. (2021). Strengthening the Network of High Conservation Value Forests in Boreal Landscapes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 595730. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.595730>
- Muller-Landau, H. C., Cushman, K. C., Arroyo, E. E., Martinez Cano, I., Anderson-Teixeira, K. J., & Backiel, B. (2021). Patterns and mechanisms of spatial variation in tropical forest productivity, woody residence time, and biomass. *New Phytologist*, 229(6), 3065–3087. <https://doi.org/10.1111/nph.17084>
- 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>
- O'Hara, K. L., Cox, L. E., Nikolaeva, S., Bauer, J. J., & Hedges, R. (2017). Regeneration Dynamics of Coast Redwood, a Sprouting Conifer Species: A Review with Implications for Management and Restoration. *Forests* 2017, Vol. 8, Page 144, 8(5), 144. <https://doi.org/10.3390/f8050144>
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., ... & Schelhaas, M. J. (2023). Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global change biology*, 29(5), 1359–1376. <https://doi.org/10.1111/gcb.16531>
- Piraino, S., Molina, J. A., Hadad, M. A., & Juñent, F. A. R. (2022). Resilience capacity of *Araucaria araucana* to extreme drought events. *Dendrochronologia*, 75, 125996. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125996>
- Pompa-García, M., Sánchez-Salguero, R., & Camarero, J. J. (2017). Observed and projected impacts of climate on radial growth of three endangered conifers in northern Mexico indicate high vulnerability of drought-sensitive species from mesic habitats. *Dendrochronologia*, 45, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.08.006>
- R. Core Team. (2018). *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>
- Rydval, M., Björklund, J., von Arx, G., Begović, K., Lexa, M., Nogueira, J., Schurman, J. S., & Jiang, Y. (2024). Ultra-high-resolution reflected-light imaging for dendrochronology. *Dendrochronologia*, 83, 126160. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126160>
- Schwarz, J., Skiadasis, G., Kohler, M., Kunz, J., Schnabel, F., Vitali, V., & Bauhus, J. (2020). Quantifying Growth Responses of Trees to Drought—a Critique of Commonly Used Resilience Indices and Recommendations for Future Studies. *Current Forestry Reports*, 6(3), 185–200. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00119-2>
- 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>

**Recibido:**  
3/junio/2024

**Aceptado:**  
4/noviembre/2024

- 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>
- Stokes, M.A. & Smiley, T.L. (1968). *An Introduction to Tree Ring Dating*; University of Chicago Press: Chicago, IL, USA.
- Trouet, V., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). KNMI Climate Explorer: A Web-Based Research Tool for High-Resolution Paleoclimatology. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.1.3>, *69*(1), 3–13. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.1.3>
- van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., & Bouriaud, O. (2015). pointRes: An R package to analyze pointer years and components of resilience. *Dendrochronologia*, *35*, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.006>
- 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/https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N. A., & Franco-Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el monte Tláloc, México. *Revista fitotecnia mexicana*, *39*(2), 175–185. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v39n2/0187-7380-rfm-39-02-00175.pdf>
- Von Döhren, P., & Haase, D. (2015). Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological Indicators*, *52*, 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.027>
- Wang, B., Chen, T., Li, C., Xu, G., Wu, G., & Liu, G. (2022). Discrepancy in growth resilience to drought among different stand-aged forests declines going from a semi-humid region to an arid region. *Forest Ecology and Management*, *511*, 120135. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120135>
- Wang, X., & Wang, X. (2024). Hotter drought and trade-off between fast and slow growth strategies as major drivers of tree-ring growth variability of global conifers. *Journal of Ecology*, *112*(5), 1123–1139. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14290>
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *23*(2), 201-213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2)
- Wilmking, M., van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Scharnweber, T., Buras, A., Biermann, C., Gurskaya, M., Hallinger, M., Lange, J., Shetti, R., Smiljanic, M., & Trouillier, M. (2020). Global assessment of relationships between climate and tree growth. *Global Change Biology*, *26*(6), 3212–3220. <https://doi.org/10.1111/gcb.15057>