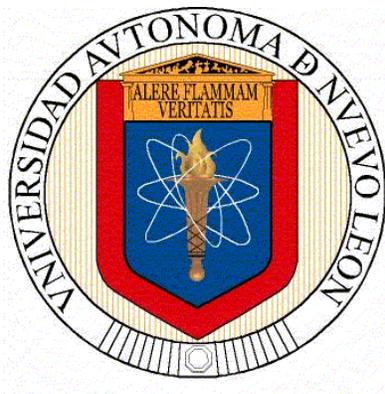


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



TESIS

**INCREMENTO DEL ÁREA BASAL DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. EN
DOS ALTITUDES DEL MUNICIPIO DE GÜÉMEZ, TAMAULIPAS.**

PRESENTADA POR

BIOL. ANGÉLICA TORRES GARCÍA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

DICIEMBRE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS

INCREMENTO DEL ÁREA BASAL DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. EN DOS
ALTITUDES DEL MUNICIPIO DE GÚEMEZ, TAMAULIPAS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias Forestales

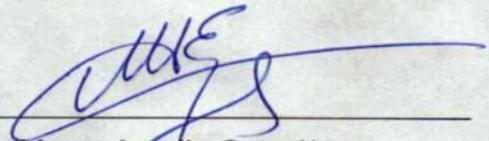
Presenta

BIOL. ANGELICA TORRES GARCÍA

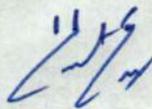
COMITÉ DE TESIS



Dra. Wibke Himmelsbach
Director de Tesis



Dr. Marco Aurelio González
Tagle
Asesor



Dr. Homero Alejandro Gárate
Escamilla
Asesor



Dr. Marcos González
Cásares
Asesor externo

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE DEL 2024

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores de tesis, Dra, Wibke Himmelsbach, Dr. Marco Aurelio González Tagle, Dr. Homero Alejandro Garate Escamilla y Dr. Marcos González Casares, por el tiempo dedicado y brindarme sus conocimientos en el proceso de la tesis.

A mi padre Pedro Torres Márquez, mi más profundo agradecimiento por su incondicional apoyo moral y por acompañarme en la toma de muestras durante este proyecto. Su fortaleza, paciencia y confianza que siempre tiene en mí fueron una fuente constante de motivación y aliento. Este logro no habría sido posible sin su respaldo.

A Biol. Sergio Ledezma Pineda por su apoyo y tiempo brindado durante la realización de este trabajo. Su acompañamiento en las tomas de muestras, su disposición para llevarme a los sitios de campo y su gestión al establecer contacto con las personas de los ejidos fueron muy importantes para el desarrollo de mi tesis.

A los Ejidos Los San Pedros y Rancho Nuevo por su apoyo al permitirme realizar este trabajo de investigación con muestras de su predio. Sin ellos no hubiera sido posible realizar esta investigación.

A las personas que me brindaron su apoyo para llevar a cabo la toma de muestras en los ejidos.

A la Facultad de Ciencias Forestales por darme la oportunidad de estudiar la Maestría en ciencias forestales.

A CONAHCYT por el apoyo económico que me otorgo para realizar el posgrado.

DEDICATORIA

Para mi mamá Aracely García González por su incondicional apoyo siempre y sus sabios consejos, que con ellos y los de mi papá, han sido la guía que me ha traído hasta este momento.

Para mi papá Pedro Torres Márquez por creer en mí y motivarme a seguir adelante en la búsqueda de mis metas.

Para mi hermana Paulina Aracely Torres García, por ser mi apoyo, por estar siempre dispuesta a escucharme y celebrar conmigo cada uno de mis logros.

Para mis sobrinos Melany y Pedro que solo con existir y escuchar sus voces me hacen la vida más feliz.

ÍNDICE

RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. JUSTIFICACIÓN.....	6
IV. HIPOTESIS.....	8
V. OBJETIVOS.....	8
V.1. Objetivos específicos.....	8
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	9
VI.1. Ubicación	9
VI.2. Caracterización del área de estudio.....	10
VI.2.1. Clima.....	10
VI.2.2. Suelo.....	11
VI.2.3. Tipos de vegetación	11
VI.3 Muestreo en campo.....	12
VI.3.1. Medición de los árboles de muestreo.....	12
VI.3.3. Procesado de las rodajas en el laboratorio	16
VI.3.3.1. Preparación (montado y pulido).....	16
VI.3.3.2. Fechado y medición de los anillos de crecimiento.....	17
VI.4 Cálculos de índices y análisis de datos.....	19
VII. RESULTADOS.....	21
VII.1. Medición de árboles de muestreo	21
VII.2. Incremento de área basal.....	26
VII.3. Índice de ancho de anillo (IAA).....	29
VII.4. Correlación clima-incremento.....	31
VIII. DISCUSIÓN.....	34
IX. CONCLUSIÓN	37
X. BIBLIOGRAFÍA	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio y de los árboles de muestreo en los Ejidos Los San Pedros, 1,500 msnm, y Rancho Nuevo a 2,500 msnm en el Municipio de Güémez, Tamaulipas.	9
Figura 2. Relación entre la edad y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. a 1,500 msnm en la Sierra Madre Oriental, Tamaulipas.....	23
Figura 3. Relación entre la edad y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. a 2,500 msnm en la Sierra Madre Oriental, Tamaulipas.....	26
Figura 4. Incremento del área basal de <i>Pinus pseudostrobus</i> a 1,500 msnm durante un periodo de 86 años (Ej. Los San Pedros, Tamaulipas).	27
Figura 5. Incremento de área basal de <i>Pinus pseudostrobus</i> a 2,500 msnm durante un periodo de 100 años (Ej. Rancho Nuevo).	28
Figura 6. Comparación del incremento del área basal (IAB) de <i>Pinus pseudostrobus</i> a una altitud de 1,500 y 2,500 msnm en Güémez, Tamaulipas, durante un periodo de 80 años.	29
Figura 7. Cronología de índice de ancho de anillo (IAA) de <i>Pinus pseudostrobus</i> a una altitud de 1,500 msnm (Ejido Los San Pedros) durante un periodo de 80 años. La línea azul representa los valores medios del IAA, la línea negra es la media del IAA y la línea punteada es el tamaño de muestra.	30
Figura 8. Cronología de índice de ancho de anillo (IAA) de <i>Pinus pseudostrobus</i> a una altitud de 2,500 msnm (Ejido Rancho Nuevo) durante un periodo de 80 años. La línea azul representa los valores medios de IAA, la línea negra es la media de IAA y la línea puntea es el tamaño de muestra.	31
Figura 9. Análisis de la correlación entre el clima y el incremento basal durante el periodo de 1980 a 2022, a una altitud de 1,500 msnm. Los meses en minúscula corresponden al año previo de crecimiento, mientras que los meses en mayúscula indican el año actual de crecimiento.	32
Figura 10. Análisis de la correlación entre el clima y el incremento basal durante el periodo de 1980 a 2022, a una altitud de 1,500 msnm. Los meses en minúscula corresponden al año previo de crecimiento, mientras que los meses en mayúscula indican el año actual de crecimiento.	33

INDICE DE FOTOS

Foto. 1. Medición de la altura total de un árbol de muestreo de Pinus.....	12
Foto. 2. Medición de la longitud del diámetro a la altura del pecho (DAP)	13
Foto. 3. Toma de coordenadas con un GPS 65s GARMIN en el ejido Los	13
Foto. 4. Corta de rodajas con motosierra como muestras para los análisis	14
Foto. 5. Corta de segmentos de rodajas de 2-4 cm de grosor con.....	15
Foto. 6. Las rodajas fueron numeradas y etiquetadas en campo para.....	15
Foto. 7. Muestras de secciones transversales dimensionadas y montadas.....	16
Foto. 8. Pulido de las secciones transversales con diferentes lijas hasta	17
Foto. 9. Fechado de muestras con el estereomicroscopio (AmScope™ SM-4TPZ-B) en el Laboratorio de Dendrocronología de la FCF.....	18
Foto. 10. Muestra de una sección transversal con el fechado y medición de ..	18

RESUMEN

El incremento del área basal (IAB) de un árbol es un parámetro fundamental en los estudios forestales, ya que permite evaluar su crecimiento y productividad a lo largo del tiempo (Lendínez et al., 2013). El objetivo de esta investigación fue determinar por medio de técnicas dendrocronológicas el incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en dos altitudes a 1,500 msnm (Ejido Los San Pedros) y 2,500 msnm (Ejido Rancho Nuevo), en el Municipio de Güémez, Tamaulipas. Se seleccionaron 20 árboles en cada altitud de los cuales se colectaron secciones transversales de *Pinus pseudostrobus* a 30 cm desde el nivel del suelo. Se realizó el fechado y medición de los anillos, el ancho de cada anillo se midió con el sistema de medición VELMEX® y el software Measure J2X y el control de calidad de la medición de anillos se realizó con el software COFECHA. Se obtuvo que el patrón de incremento del área basal en las dos altitudes fue similar hasta el año 2010, aunque a 1,500 msnm mostró incrementos mayores en comparación con el de 2,500 msnm en los años de crecimiento antes del año 2015. Sin embargo, a partir de 2015 se evidenció un mayor IAB a 2,500 msnm en comparación a la altitud de 1,500 msnm. Podemos concluir que el IAB de *Pinus pseudostrobus* se invirtió durante los últimos 10 años de valores mayores a 1,500 msnm a valores mayores después de 2015 a la elevación de 2,500 msnm. Esto podría ser un indicador para el cambio de factores favorables para el crecimiento de la especie de 1,500 msnm a una altitud de 2,500 msnm, un dato importante para su consideración en el manejo forestal.

Palabras claves: Aprovechamiento forestal, Cambio climático, Dendrocronología, Manejo forestal, *Pinus pseudostrobus*.

ABSTRACT

The basal area increment (BAI) of a tree is a fundamental parameter in forestry studies, since it allows evaluating its growth and productivity over time (Lendínez et al., 2013). The objective of this research was to determine by means of dendrochronological techniques the increase in basal area of *Pinus pseudostrabus* Lindl. at two altitudes at 1,500 msnm (Ejido Los San Pedros) and 2,500 msnm (Ejido Rancho Nuevo), in the municipality of Güémez, Tamaulipas. Twenty trees were selected at each altitude from which *Pinus pseudostrabus* cross sections were collected at 30 cm from ground level. The width of each ring was measured with the VELMEX® measurement system and Measure J2X software, and the quality control of the ring measurement was carried out with COFECHA software. It was obtained that the pattern of basal area increase in the two altitudes was similar until 2010, although at 1,500 msnm it showed larger increases compared to that at 2,500 msnm in the growth years before 2015. However, from 2015 onwards, a higher IAB at 2,500 msnm compared to the altitude of 1,500 msnm was evidenced. We can conclude that the IAB of *Pinus pseudostrabus* reversed during the last 10 years from higher values at 1,500 msnm to higher values after 2015 at the elevation of 2,500 msnm. This could be an indicator for the change of favorable factors for the growth of the species from 1,500 msnm to an altitude of 2,500 msnm, an important data for consideration in forest management.

Key words: Forest harvesting, climate change, dendrochronology, forestry management, *Pinus pseudostrabus*.

I. INTRODUCCIÓN

La Sierra Madre Oriental (SMO) es una de las principales cadenas montañosas en el este de México y se extiende del norte al sur atravesando varios estados como Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Texas, San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla, Querétaro, Tlaxcala y Veracruz. La heterogeneidad del relieve de la SMO conlleva a que exista una gran diversidad de microclimas y esto crea una gran variedad de tipos de vegetación con funciones diversas (Salinas et al., 2018). Debido a estas particularidades de la Sierra Madre Oriental existen diversos tipos de vegetación los más comunes son el matorral desértico y los bosques templados. (Salinas et al., 2018).

El crecimiento anual de los árboles en esta región está influenciado por varios factores ambientales que interactúan entre sí, como son la radiación solar, temperatura, precipitación, entre otros. Por lo tanto, dependiendo de las condiciones ambientales y de las características propias de cada especie, estos factores pueden favorecer o afectar el crecimiento e incremento basal (Fritts, 1976; Bogino & Bravo, 2008). Igualmente es de gran importancia conocer cómo se reflejan estas condiciones en el incremento basal de los árboles para una adecuada planeación del manejo forestal (Jiménez & Kramer, 1992).

El área basal de un árbol es un parámetro esencial en los estudios forestales, ya que permite evaluar su crecimiento y productividad a lo largo del tiempo (C. Lendínez et al., 2013). Mediante el uso de técnicas dendrocronológicas, es posible analizar el incremento del área basal de los árboles en función de sus anillos de crecimiento y comparar su desarrollo en diferentes altitudes (Núñez-García et al., 2021). Estos estudios son fundamentales para entender la dinámica del crecimiento forestal y su relación con el ambiente, lo que a su vez puede contribuir a estrategias de manejo sostenible (Rojas-García et al., 2020).

El presente estudio tuvo como objetivo determinar el incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a través de técnicas dendrocronológicas en dos altitudes dentro del municipio de Güémez, Tamaulipas. De esta manera, se obtuvo la edad, el índice de ancho de anillo y la comparación del área basal de *Pinus pseudostrobus* a lo largo de diferentes décadas. La hipótesis planteada sugiere que los árboles ubicados a 1,500 msnm presentan un mayor incremento en el área basal en comparación con aquellos a 2,500 msnm.

Los resultados de este estudio contribuirán a un mejor entendimiento del crecimiento de *Pinus pseudostrobus* en diferentes altitudes y servirán como base para futuras estrategias de manejo forestal en la región. La información generada será de gran utilidad para la implementación de planes de conservación y aprovechamiento sustentable de los bosques. Por lo tanto, la evaluación del incremento de área basal en diferentes altitudes y periodos de tiempo se convierte en una herramienta esencial para la planificación y sostenibilidad de los recursos forestales.

II. ANTECEDENTES

El relieve divide a México en 15 provincias fisiográficas, de las cuales cinco corresponden a las principales cadenas montañosas del país, la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Chiapas y Faja Volcánica Transmexicana (Cervantes-Zamora et al., 1990). Estas regiones presentan una heterogeneidad significativa que favorece la existencia de una gran diversidad de microclimas, flora y fauna. Además, contribuye a una eficaz regulación de los escurrimientos hídricos y funcionan como corredores migratorios esenciales (Körner y Spehn, 2002).

En los últimos años La producción forestal maderable en México ha mostrado una tendencia a la baja. Durante el periodo del 2009 al 2018, se registró una disminución significativa. Tan solo entre 2017 y 2018, esta producción se redujo en un 7.5%, equivalente a 0.7 millones de metros cúbicos rollo ($m^3 r$). En 2018, los estados de Durango (30.2%), Chihuahua (19.9%), Oaxaca (9.5%), Veracruz (6.1%) y Michoacán (5.4%), aportaron el 71.1% de la producción nacional, sumando un total de 5.9 millones de $m^3 r$ (SEMARNAT, 2018).

En el 2023 el sector forestal contribuyó en el PIB nacional un 0.30% que equivale a \$ 95,016 millones de pesos y la industria de la madera representa el 55.04% del PIB forestal (Sistema Nacional de Información Forestal, 2024). Por lo tanto, a nivel nacional no contribuye significativamente al PIB. Sin embargo, existen comunidades rurales, para cuales su principal fuente de ingresos es el aprovechamiento maderable como es el caso de los ejidos Los San Pedros y Rancho Nuevo en Tamaulipas. De Los San Pedros se extrae aproximadamente un volumen anual de 3,929.80 $m^3 r$ y de Rancho Nuevo 2,123.10 $m^3 r$ por año (Reyes-Hernández, 2015). El aprovechamiento forestal maderable es la principal fuente de empleo de aproximadamente 81 familias en estos ejidos. Esta actividad les proporciona un ingreso de aproximadamente \$ 12,800,000 anuales (Reyes-Hernández, 2015).

La sustentabilidad implica lograr una prosperidad económica sostenida a largo plazo, preservando simultáneamente los recursos naturales y garantizando una alta calidad de vida (A. M. Calvente, 2007). En este contexto, los estudios dendrocronológicos nos ayudan a analizar la variabilidad del clima a lo largo de los años y determina como influyen los patrones atmosféricos en el incremento de los árboles. Estos estudios aportan soluciones a problemas ecológicos, hidrológicos y climáticos (Villanueva-Diaz et al., 2004).

Un ejemplo de la utilidad de la dendrocronología se observa en el estudio de Vasquez (2019), quien evaluó el crecimiento y rendimiento de *Guazuma crinita* Mart en plantaciones agroforestales de cuatro años en Tablón, Chirinos, San Ignacio. Con base en un inventario de 331 individuos y el cálculo de incremento medio anual, se concluyó que la especie presenta un rápido crecimiento y alto potencial volumétrico.

Diversos estudios han analizado el crecimiento de especies forestales. Por ejemplo, Wehenkel et al. (2022) evaluaron el crecimiento radial acumulado en *Picea martinezii* y *Picea mexicana* mediante la extracción de núcleos de crecimiento con un taladro de Pressler. El objetivo fue determinar si el crecimiento acumulado seguía un modelo sigmoideal. Se identificó que el ICA máximo generalmente ocurre antes que el IMA máximo, lo que sugiere que un modelo sigmoideal podría describir el crecimiento de las especies de *Picea* estudiadas. No obstante, en varios casos, el ICA máximo se presentó a edades inusualmente tempranas (entre 5 y 7 años), lo que no es coherente con lo esperado, ya que normalmente el ICA máximo debería ocurrir en edades más avanzadas. Esta anomalía podría estar relacionada con la variabilidad en las condiciones de crecimiento de los árboles muestreados y resalta la necesidad de considerar factores ambientales y de competencia en futuros estudios. Los resultados obtenidos en este estudio permitieron identificar, de manera general, los patrones y tendencias en las curvas de crecimiento acumulado del diámetro de los árboles, así como en el Índice de Crecimiento Anual (ICA) y el Índice de Crecimiento Medio Anual (IMA).

Por otro lado, González Tagle et al. (2024) estudiaron como la topografía influye en la respuesta de *Pinus arizonica* a la variabilidad climática. Encontraron que la temperatura máxima limita el crecimiento, mientras que la precipitación lo favorece en determinados periodos. Estos resultados subrayan la importancia de integrar factores climáticos y topográficos en las estrategias de manejo forestal.

Núñez-García et al. (2021). Investigaron las cronologías de anillos de crecimiento y el incremento de área basal (IAB) de *Pinus hartwegii* Lindl. En altitudes de 3,700 y 3,800 m. Identificaron que el IAB responde favorablemente a incrementos de temperatura, especialmente en altitudes con exposición suroeste.

Bernal Salazar y Terrazas Salgado (2000) analizaron en *Abies religiosa* cómo las variables climáticas afectan las dimensiones de las traqueidas. Se observó que las temperaturas máximas influyen en la actividad del cámbium vascular, lo que impacta en las características de los anillos de crecimiento. Este análisis es esencial para comprender los efectos del cambio climático en especies forestales.

Pinus pseudostrobus Lindl. pertenece a la familia de las Pinaceae y es un árbol de mediano a gran tamaño, alcanzando hasta 45 m de altura y 100 cm de diámetro. Sus acículas, de color verde glauco miden entre 20 y 30 cm, mientras que sus conos femeninos son ovoides y alcanzan dimensiones de 8 a 12 cm de largo. Esta especie tiene un alto potencial para el aprovechamiento maderable, siempre que se gestione de manera sustentable (Escobar-Alonso, 2021).

III. JUSTIFICACIÓN

El análisis del ancho de los anillos de crecimiento permite evaluar el desarrollo de especies forestales, lo que resulta clave para optimizar la planificación de la producción. Esto resulta especialmente importante en áreas donde las recomendaciones técnicas existentes no son suficientemente efectivas o adecuadas para el lugar (Tang et al., 2016). Por lo tanto, la dendrocronología contribuye a una gestión forestal de manera más precisa y adaptada a las necesidades específicas de cada región.

En este contexto, el estudio del área basal de *Pinus pseudostrobus* en dos altitudes de Güémez, Tamaulipas, adquiere relevancia ecológica y social. Esta especie, predominante en áreas montañosas, desempeña un papel crucial en la regulación de ciclos naturales, contribuye a la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales (García y González, 2003; Ramírez-Herrera et al., 2005).

El cambio climático, que afecta de manera significativa a los ecosistemas forestales, especialmente en regiones con marcadas variaciones altitudinales, puede modificar el patrón de crecimiento de los árboles (Murga et al., 2021). Comprender cómo *Pinus pseudostrobus* responde a estas variaciones resulta fundamental para mejorar la gestión forestal en Tamaulipas, donde ejidos como Los San Pedros y Rancho Nuevo dependen de la madera como un recurso clave para su economía.

Además, la comparación del incremento basal de *Pinus pseudostrobus* a lo largo de diferentes décadas es clave para entender cómo factores ambientales y climáticos han influido en el crecimiento de esta especie a través del tiempo (Cerano-Paredes et al., 2011). Este análisis no solo proporciona una perspectiva histórica de su desarrollo, sino que también ofrece información valiosa para anticipar su respuesta frente a escenarios futuros, lo que resulta crucial para diseñar estrategias de manejo forestal sostenibles y adaptativas (Manzanilla-Quiñones et al., 2020; González-Tagle et al., 2024).

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo proporcionar datos fundamentales sobre el incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* y analizar cómo la altitud influye en dicho crecimiento en un entorno sujeto a cambios constantes. Los resultados obtenidos son esenciales para comprender las dinámicas de desarrollo de esta especie, lo que permitirá mejorar las estrategias de manejo forestal y contribuir a la adaptación de los ecosistemas frente a un clima en transformación.

IV. HIPOTESIS

El incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la altitud de 1,500 msnm es mayor que a los 2,500 msnm en el Municipio de Güémez, Tamaulipas.

V. OBJETIVOS

Determinar el incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en dos altitudes por medio de técnicas dendrocronológicas.

V.1. Objetivos específicos

- Obtener la edad de *Pinus pseudostrobus* aplicando métodos dendrocronológicos.
- Determinar el incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus*.
- Calcular el índice de ancho de anillo (IAA).
- Comparar el incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* a lo largo de diferentes décadas.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

VI.1. Ubicación

El estudio se llevó a cabo en los ejidos Los San Pedros y Rancho Nuevo, ubicados en la zona oeste del municipio de Güémez, Tamaulipas, sus coordenadas geográficas son: 23°51'47.28", 99°22'49.52" y 23°56'18.99", 99°28'49.22" respectivamente. El área de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental (SMO). Las alturas son de 1,500 metros sobre nivel del mar para Los San Pedros y 2,500 msnm para Rancho Nuevo. (Figura 1).

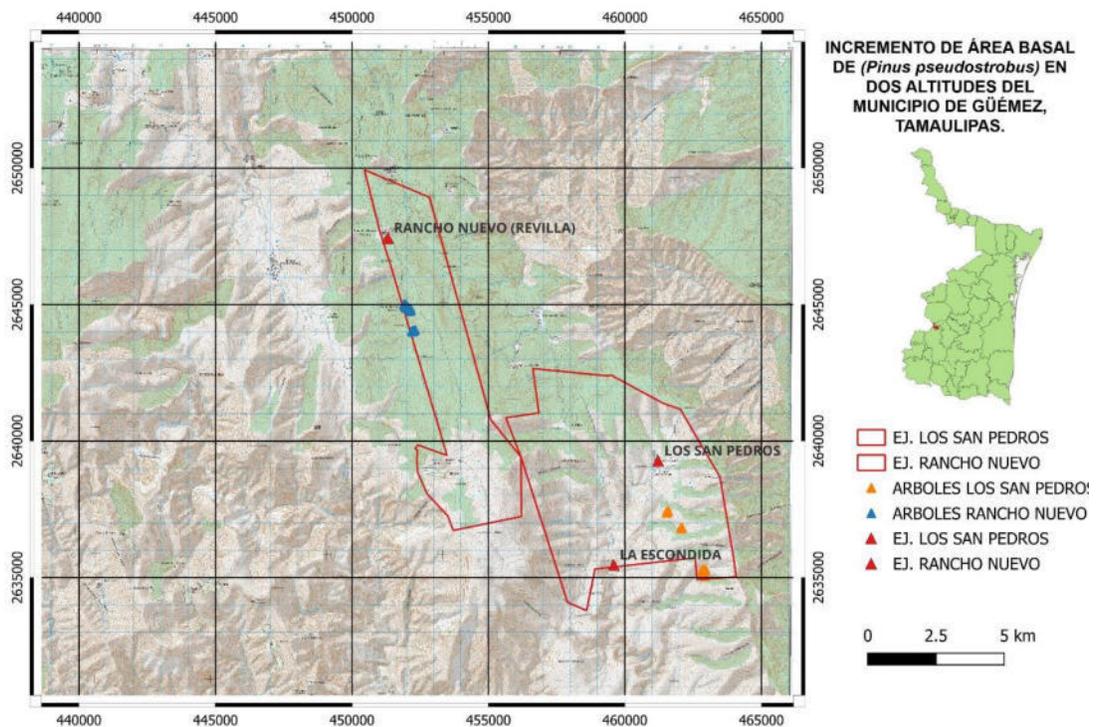


Figura 1. Localización del área de estudio y de los árboles de muestreo en los Ejidos Los San Pedros, 1,500 msnm, y Rancho Nuevo a 2,500 msnm en el Municipio de Güémez, Tamaulipas.

VI.2. Caracterización del área de estudio

VI.2.1. Clima

De acuerdo con la clasificación de clima de Köppen los climas presentes en el municipio Güémez son de tipo semicálidos subhúmedos con lluvias en verano (A)C(w1), templados subhúmedos con lluvias en verano C(w2), semicálido subhúmedo con lluvias en verano (A)C(w0) y templados subhúmedos con humedad media C(w1) (INEGI, 2021).

En el área de estudio se identifican dos tipos de clima según la altitud. A 1,500 msnm predomina un clima semicálido subhúmedo con lluvias de verano ((A)C(w0)). En contraste, a 2,500 msnm el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano C(w2)(INEGI, 2021).

En el ejido Los San Pedros a 1,500 msnm, con clima semicálido subhúmedo ((A)C(w0)), la temperatura media anual supera los 18 °C y la humedad relativa es inferior al 43.2%. La máxima precipitación ocurre entre mayo y octubre, con al menos diez veces más lluvia en el mes más húmedo que en el mes más seco, la precipitación es menor de 43.2 mm. Por otro lado, el ejido Rancho Nuevo a 2,500 msnm presenta un clima templado subhúmedo los más secos de los subhúmedos (C(w2)), con temperaturas medias anuales que varían entre 12 °C y 18 °C. Durante el mes más frío, las temperaturas oscilan entre -3 °C y 18 °C, mientras que en el mes más cálido no superan los 22 °C. Las precipitaciones anuales en esta región alcanzan de 200 hasta 1,800 mm y precipitación del mes mas seco es <40 mm, las lluvias de verano son entre 5 y 10.2% anual (INEGI, 2021).

Para llevar a cabo la comparación entre los datos climáticos y los resultados de la medición de los anillos de crecimiento, se emplearon promedios mensuales de temperatura y precipitación. Estos datos climáticos de los sitios fueron obtenidos de la base de datos de la Climate Research Unit (CRU) y referenciados según (González-Tagle et al., 2024). El periodo analizado comprendió registros correspondientes a los años 1980 a 2022.

VI.2.2. Suelo

Los tipos de suelo en la región se distribuyen de acuerdo con su altitud y características edáficas. A 1,500 msnm, se encuentran suelos Leptosol (LP) y Phaeozem (PH), mientras que a 2,500 msnm solo se observan suelos de tipo Leptosol (LP). (INEGI, 2004).

El Leptosol (LP) se caracteriza por su limitada profundidad debido a la presencia de roca dura continua a menos de 25 cm de la superficie, lo que restringe su desarrollo. Este tipo de suelo es común en áreas con pendientes pronunciadas y en zonas montañosas, donde la acumulación de material orgánico es reducida. (Instituto Nacional de Estadística, 2004).

El Phaeozem (PH), por su parte, se distingue por su capa superficial oscura, rica en materia orgánica y nutrientes. Este suelo es típico de zonas semiáridas a templadas o tropicales, y se encuentra en terrenos desde planos hasta montañosos. La vegetación que lo caracteriza es variada, adaptándose a diversos climas. La susceptibilidad a la erosión depende del tipo de terreno en el que se localiza. En el estado, el Phaeozem se asocia a climas semicálidos y zonas montañosas, y se utiliza tanto para la agricultura como para la actividad forestal en las zonas más altas de la sierra (Instituto Nacional de Estadística, 2004).

VI.2.3. Tipos de vegetación

Según la serie VI del INEGI 2019, los tipos de vegetación en el ejido Los San Pedros a 1,500 msnm incluyen bosques mesófilos de montaña, bosques de encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, bosques de pino-encino y pastizal inducido. En el ejido Rancho Nuevo a 2,500 msnm, se encuentran bosques mesófilos de montaña, bosques de encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, bosques de encino-pino, y bosques de pino-encino. Es importante destacar que los sitios de muestreo se ubican en

un bosque de pino-encino a 1,500 msnm y una combinación de bosques de encino-pino y pino-encino a 2,500 msnm.

VI.3 Muestreo en campo

VI.3.1. Medición de los árboles de muestreo

En cada altitud, a 1,500 msnm y a 2,500 msnm, se seleccionaron 20 árboles muestras, individuos aprovechados en el área de corta correspondiente al año 2023. De cada individuo, se registraron las coordenadas geográficas (GPS MAP 65s GARMIN), la altura total (medida con cinta métrica) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) (medido con cinta diamétrica) (Foto 1,2 y 3).



Foto. 1. Medición de la altura total de un árbol de muestreo de *Pinus pseudostrobus* con una cinta métrica en el ejido Los San Pedros, Güémez, Tamaulipas.



Foto. 2. Medición de la longitud del diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles muestreo en el ejido Los San Pedros, Güémez, Tamaulipas utilizando una cinta diamétrica.



Foto. 3. Toma de coordenadas con un GPS 65s GARMIN en el ejido Los San Pedros, Güémez, Tamaulipas.

VI.3.2. Extracción de rodajas

Además, en cada altitud (a 1,500 msnm y a 2,500 msnm), se colectaron 20 secciones transversales (rodajas) del tocón a 30 cm desde el nivel del suelo de *Pinus pseudostrobus* (González-Cásares et al., 2017) (Foto 4). Las rodajas, con un grosor varía entre de 3 a 4 centímetros, fueron cortadas utilizando una motosierra (STHIL, MS361 de 25") (Foto 3), numeradas y etiquetadas en el campo para facilitar su posterior asociación con los datos dimensionales de los árboles individuales.



Foto. 4. Corta de rodajas con motosierra como muestras para los análisis dendrocronológicos de árboles aprovechados en el área de corta actual del ejido Rancho Nuevo, Güémez, Tamaulipas.



Foto. 5. Corta de segmentos de rodajas de 2-4 cm de grosor con motosierra a 0.30 m desde el nivel del suelo como muestras para el análisis dendrocronológico.



Foto. 6. Las rodajas fueron numeradas y etiquetadas en campo para facilitar su posterior asociación con los datos de cada muestra.

VI.3.3. Procesado de las rodajas en el laboratorio

Preparación (montado y pulido)

Las secciones transversales colectadas, rodajas o segmentos de rodajas, fueron sometidas a un proceso de secado a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras fueron dimensionadas y adheridas a una base de triplay utilizando Sika MaxTack® para su estabilización (Foto 6). El pulido se realizó con lija de diferentes tamaños de grano hasta diferenciar claramente los anillos (Foto 7 y 8) (González-Tagle et al., 2022). Los granos de la lija utilizados fueron del número 80 a 120. Dicho procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales.



Foto. 7. Muestras de secciones transversales dimensionadas y montadas en triplay con pegamento para permitir el pulido.



Foto. 8. Pulido de las secciones transversales con diferentes lijas hasta lograr una clara diferenciación de los anillos de crecimiento.

Fechado y medición de los anillos de crecimiento

Cada muestra fue fechada utilizando un estereoscopio (AmScope™ SM-4TPZ-B) (Foto 9). Durante el análisis, se realizó el conteo de anillos marcando las décadas con un punto, los periodos de cincuenta años con dos puntos y los intervalos de cien años con tres puntos (Villanueva et al., 2004).



Foto. 9. Fechado de muestras con el estereomicroscopio (AmScope™ SM-4TPZ-B) en el Laboratorio de Dendrocronología de la FCF.

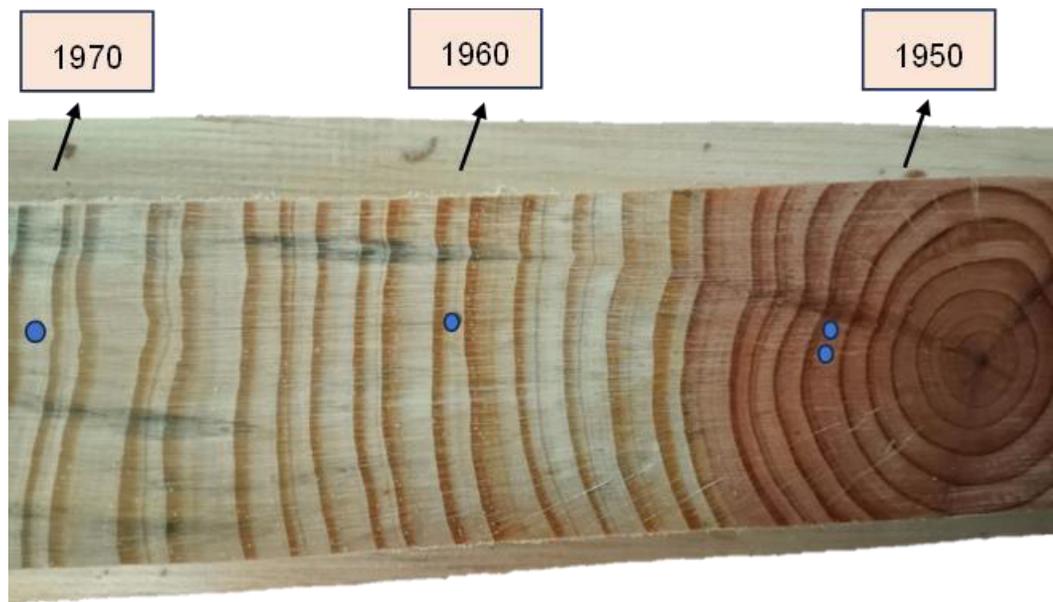


Foto. 10. Muestra de una sección transversal con el fechado y medición de anillos. Un punto azul indican la década y los dos puntos indican los periodos de 50 años

El ancho de cada anillo se midió con el sistema de medición VELMEX® y el software Measure J2X V5.03 (VoorTech Consulting, 2021). El control de calidad de la medición de anillos se realizó con el software COFECHA.

El software J2X trabaja en conjunto con el sistema VELMEX®. La medición de los anillos se lleva a cabo de la siguiente manera el operador avanza de un anillo a otro, observando la transición entre los límites de los anillos (madera tardía) y marcando las medidas en el software. Cada distancia entre los límites de los anillos se registra automáticamente y se guarda como una serie temporal, esto representando el crecimiento anual del árbol. Las mediciones se guardan en formato.rwl.

Para el control de calidad se importa al programa el archivo .rwl , el software posteriormente calcula correlaciones entre las mediciones de diferentes muestras del mismo árbol o de diferentes árboles del sitio. Esto nos permitió identificar patrones comunes en el crecimiento. Si se encuentran errores en las mediciones y anillos omitidos COFECHA señala los años específicos en los que los datos no coinciden y si es necesario se ajustan las mediciones en Measure J2X.

VI.4 Cálculos de índices y análisis de datos

Para calcular el incremento de área basal (IAB) de *Pinus pseudostrobus* se utilizó la fórmula de Bunn et al. (2023):

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

Donde:

IAB = Incremento del área basal

R = Radio del árbol sin corteza la altura donde se extrajo el núcleo (0.30 m)

t = Año de formación del anillo

El cálculo del IAB se realizó con el paquete dplR (Dendrochronology Program Library in R) (Bunn et al., 2023) del Software R (R Core Team, 2023).

Para obtener los índices de ancho de anillo (IAA) se estandarizaron las series de ancho de anillo para eliminar las tendencias de crecimiento no asociadas al clima

como son la geometría y la edad del árbol. Estos índices residuales de ancho de anillo se utilizaron para eliminar la mayor parte de la autocorrelación temporal relacionada al crecimiento del año anterior (Cook and Holmes, 1986).

Se analizó la correlación entre el índice de ancho de anillo y las variables climáticas para evaluar la respuesta climática de *Pinus pseudostrobus*. Este análisis se realizó utilizando el paquete treeclim del software R (Zang & Biondi, 2015). Con esta herramienta, se correlacionaron los datos climáticos con la cronología residual de *Pinus pseudostrobus* en las altitudes, 1,500 msnm y 2,500 msnm, considerando el periodo comprendido entre 1980 y 2022.

VII. RESULTADOS

VII.1. Medición de árboles de muestreo

En la tabla 1 se muestran las mediciones dendrométricas de 20 árboles a 1,500 metros sobre el nivel del mar, considerando las variables: diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), altura total (Alt, m) y edad (años). Estas variables permiten evaluar el desarrollo y las características de crecimiento de los árboles, aportando información valiosa para la comprensión de los factores que influyen en su dinámica.

El diámetro a la altura del pecho de los árboles oscila entre 15 cm y 75 cm, lo que refleja una notable heterogeneidad en el desarrollo diamétrico de los individuos. La altura total varía de 11.7 m y 22.8 m, mientras que la edad de los árboles se sitúa en un rango de 53 a 100 años (Tabla 1).

Los árboles 10, 23 y 32, con edades superiores a los 80 años, presentan un DAP de entre 50 y 65 cm. Sin embargo, se identifican casos atípicos, como el árbol 7 de una edad de 26 años, exhibe un DAP elevado 55 cm (Figura 2).

Tabla 1. Mediciones dendrométricas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a 1500 msnm en la Sierra Madre Oriental, Tamaulipas.

Mediciones dendrométricas de árboles a 1,500 msnm			
Árbol	DAP (cm)	Atura (m)	Edad (años)
3	15	24.7	80
4	50	23.8	83
6	50	23.2	79
7	55	11.7	26
9	55	26.4	83
10	50	20.7	84
14	50	23	80

Mediciones dendrométricas de árboles a 1,500 msnm			
Árbol	DAP (cm)	Atura (m)	Edad (años)
15	75	22.4	72
17	70	21.1	81
19	50	23.6	76
20	60	23.1	80
21	45	24.6	78
22	60	19.6	69
23	65	17	86
27	40	18.8	48
28	60	18.9	68
29	50	20.3	55
30	55	21.8	84
31	50	20.8	84
32	65	25.9	81

La Figura 2 muestra la relación entre la edad de los árboles y su diámetro a la altura del pecho (DAP) a los 1,500 msnm. Los datos indican que la edad de los árboles varía entre 26 y 86 años, mientras que el DAP oscila entre 15 cm y 75 cm.

Se observa una tendencia general en la que los árboles de mayor edad tienden a presentar un mayor DAP, aunque la relación no es completamente lineal. El árbol más joven (26 años) tiene un DAP de 55 cm, lo que indica un crecimiento acelerado en comparación con otros individuos de mayor edad.

Se identifican árboles con edades avanzadas y DAP moderados, como el individuo de 86 años con un DAP de 65 cm y otro de 84 años con un DAP de 50 cm.

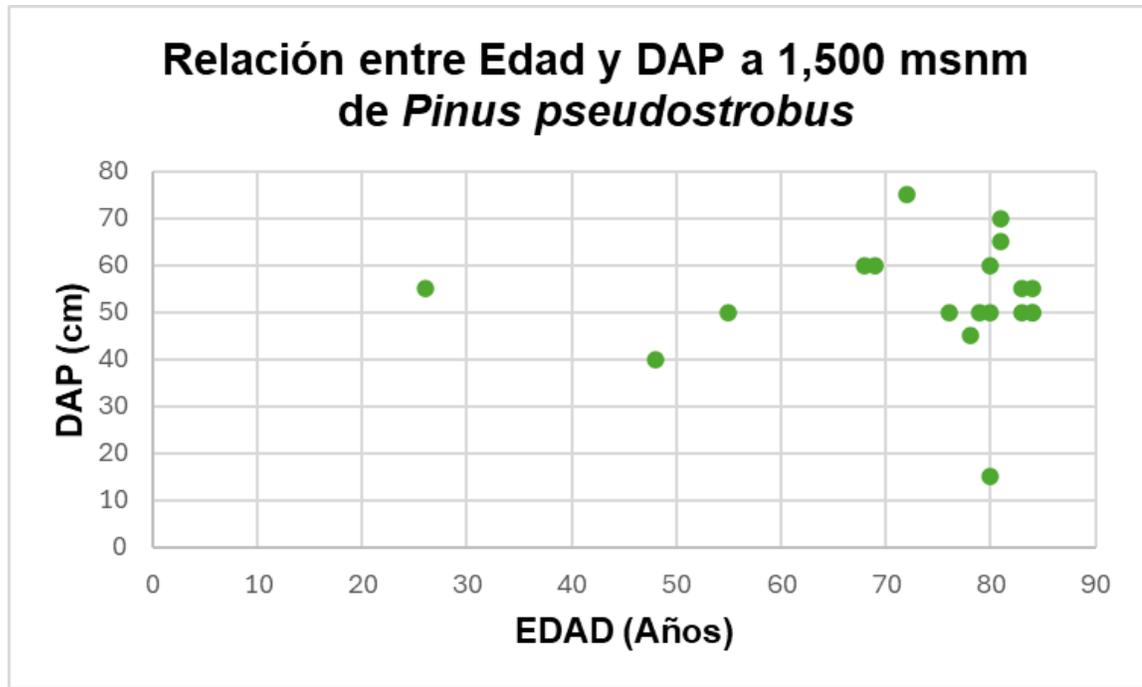


Figura 2. Relación entre la edad y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a 1,500 msnm en la Sierra Madre Oriental, Tamaulipas.

En Tabla 2 podemos observar las mediciones dendrométricas de 20 árboles a 2,500 metros sobre el nivel del mar, considerando las variables: diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), altura total (Alt, m) y edad (años). Estas variables permiten evaluar el desarrollo y las características de crecimiento de los árboles, aportando información valiosa para la comprensión de los factores que influyen en su dinámica.

El diámetro a la altura del pecho de los árboles oscila entre 36.7 cm y 60.9 cm, lo que refleja una notable heterogeneidad en el desarrollo diamétrico de los individuos. La altura total varía de 13.6 m y 264 m, mientras que la edad de los árboles se sitúa en un rango de 26 a 86 años (Tabla 2).

En los árboles más longevos, como el árbol 2 (100 años, DAP = 50 cm) y el árbol 3 (92 años, DAP = 50 cm), se observa un desarrollo diamétrico considerable, consistente con el tiempo de crecimiento acumulado. Asimismo, el árbol 22, con 90 años, tiene un DAP de 60 cm, destacando entre los individuos de mayor edad. Sin embargo, esta tendencia no es uniforme ya que el árbol 18, con 83 años, tiene un DAP de 60 cm, superando significativamente al árbol 3, que con 92 años alcanza solo 50 cm. Del mismo modo, el árbol 16 (80 años, DAP = 60 cm) refleja un crecimiento diamétrico acelerado en comparación con otros árboles de edad similar (Tabla 2).

Tabla 2. Mediciones dendrométricas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a 2,500 msnm en la Sierra Madre Oriental, Tamaulipas.

Mediciones dendrométricas de árboles a 2,500 msnm			
Árbol	DAP (cm)	Atura (m)	Edad (años)
2	50	18	100
3	50	18	92
5	40	14.5	53
6	40	13.6	61
7	35	15.1	64
8	30	21.1	60
10	60	23.6	86
11	45	16.5	75
12	35	15.3	63
13	55	22.8	66
14	50	15.3	66
15	50	19.5	86
16	60	19.5	80
18	60	22.8	83

Mediciones dendrométricas de árboles a 2,500 msnm			
Árbol	DAP (cm)	Atura (m)	Edad (años)
19	50	21.3	72
20	50	16.8	84
22	60	17.3	90
23	50	16.8	92
24	50	18.4	77

La Figura 3 muestra la relación entre la edad y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles en un sitio ubicado a 2,500 msnm. Los datos indican que la edad de los árboles varía entre 53 y 100 años, mientras que el DAP oscila entre 30 cm y 60 cm.

Se observa una tendencia general en la que los árboles de mayor edad tienden a presentar un DAP más alto. Sin embargo, la relación entre ambas variables no es completamente lineal, ya que se encuentran árboles con edades similares pero con diferencias notables en su diámetro. A los 66 años, los individuos presentan diámetros de entre 50 cm y 55 cm, a la misma edad diferencia en diámetro. Los diámetros más altos (60 cm) se registran en árboles de distintas edades, como 80, 83 y 86 años; en contraste, el árbol más longevo (100 años) presenta un DAP de 50 cm (Figura 3).

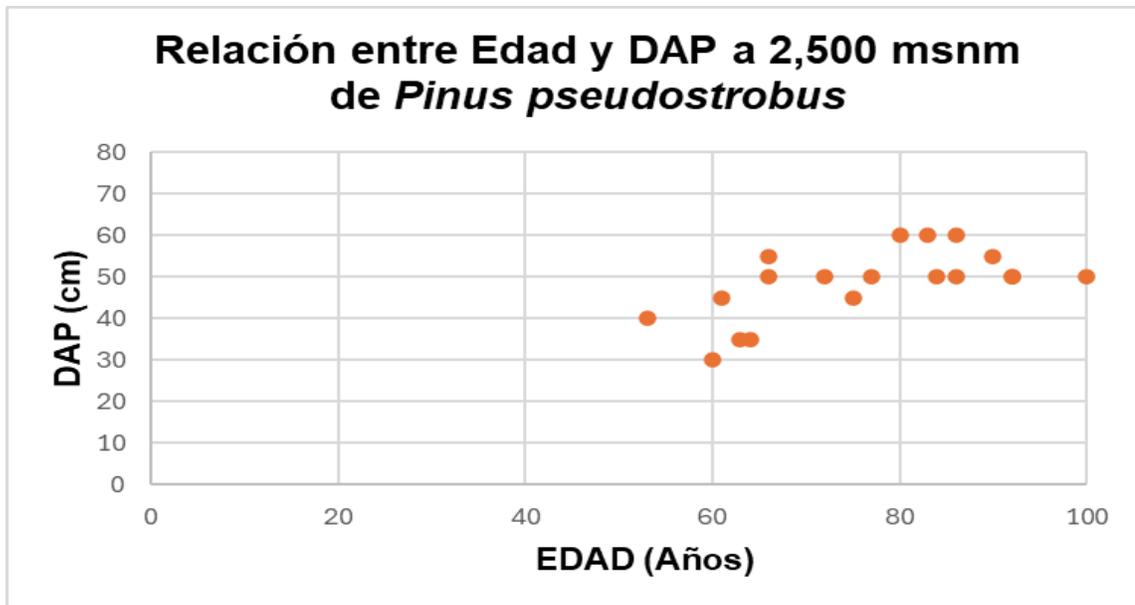


Figura 3. Relación entre la edad y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a 2,500 msnm en la Sierra Madre Oriental, Tamaulipas.

VII.2. Incremento de área basal

A la altitud de 1,500 msnm, se observó un incremento exponencial del área basal durante los primeros 28 años (Figura 4). A partir de 1968, el incremento del área basal (IAB) se mantuvo constante durante 42 años, para luego disminuir gradualmente hasta la fecha de corta en 2023 (Figura 4).

Asimismo, se identificaron cinco picos significativos de crecimiento en los años 1968, 1981, 2007, 2010 y 2015. Estos picos reflejan periodos en los que el índice de incremento del área basal fue notablemente mayor (Figura 4).

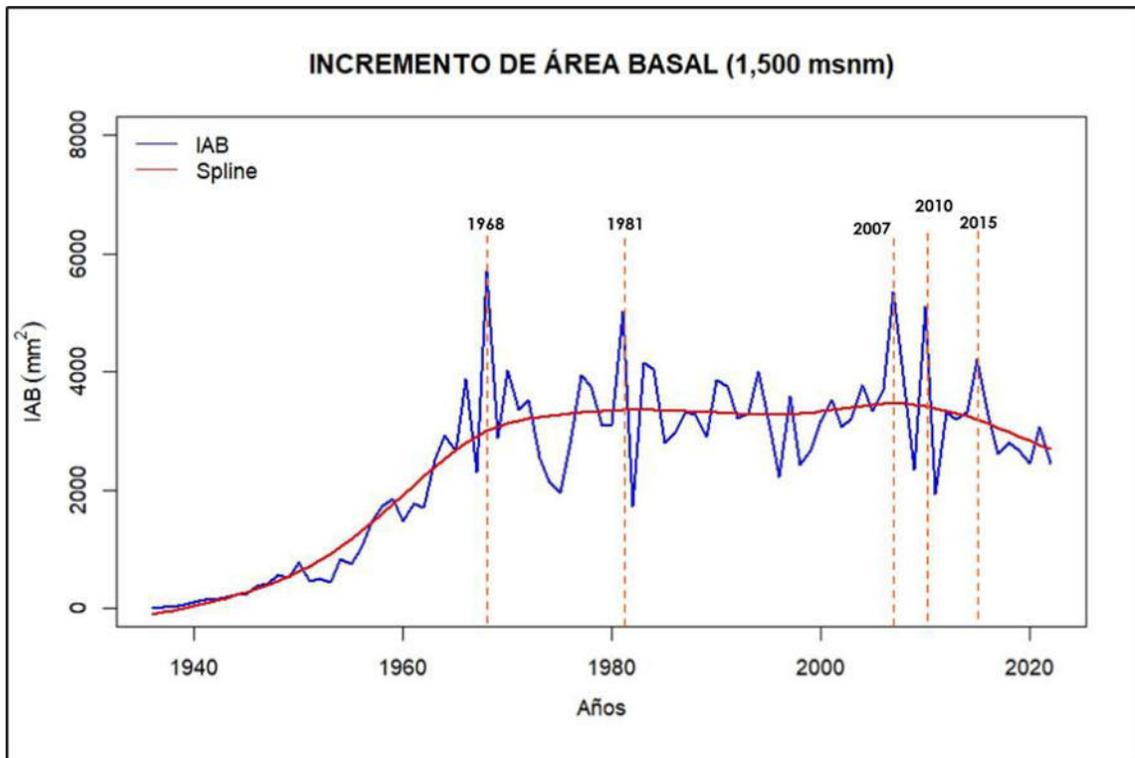


Figura 4. Incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* a 1,500 msnm durante un periodo de 86 años (Ej. Los San Pedros, Tamaulipas).

A la altitud de 2,500 msnm, se observó un patrón de crecimiento exponencial durante los primeros años de estudio. A partir de 1993, los datos registraron cuatro picos de crecimiento notables en los años 1993, 2010, 2015 y 2017 (Figura 5). En particular, los años 2015 y 2017 destacaron por mostrar tasas de crecimiento extraordinarias (Figura 5).

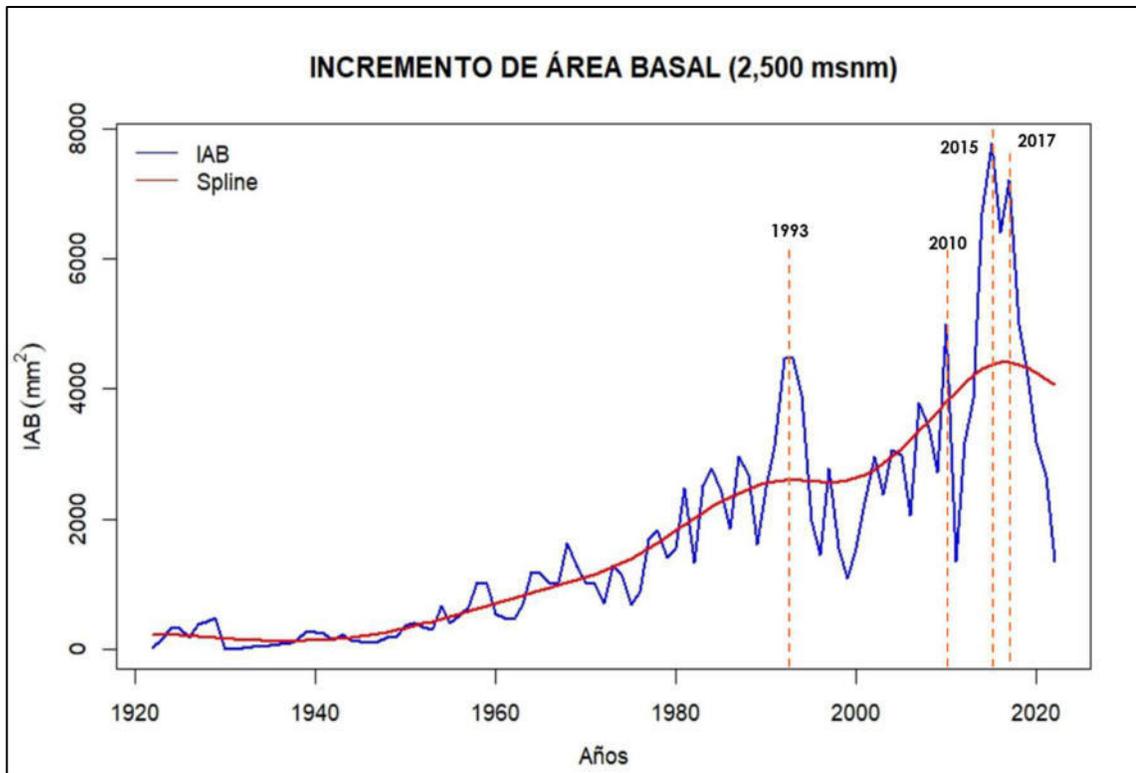


Figura 5. Incremento de área basal de *Pinus pseudostrobus* a 2,500 msnm durante un periodo de 100 años (Ej. Rancho Nuevo).

La Figura 6 ilustra el patrón de incremento de área basal en dos sitios ubicados a 1,500 y 2,500 msnm. Hasta el año 2010, ambas series presentaron un crecimiento similar, aunque el sitio a 1,500 msnm mostró incrementos mayores en comparación con el de 2,500 msnm. Sin embargo, esta tendencia se invierte durante la última década, cuando el IAB en el sitio a 2,500 msnm supera al registrado en el de 1,500 msnm, manteniéndose, no obstante, un patrón de crecimiento comparable en ambos sitios (Figura 6).

En el año 2015, los incrementos en el crecimiento en ambas altitudes se igualaron. Sin embargo, a partir de ese año, se evidenció un notable aumento en el crecimiento a 2,500 msnm, lo que refleja un cambio significativo en la dinámica de desarrollo entre ambas altitudes.

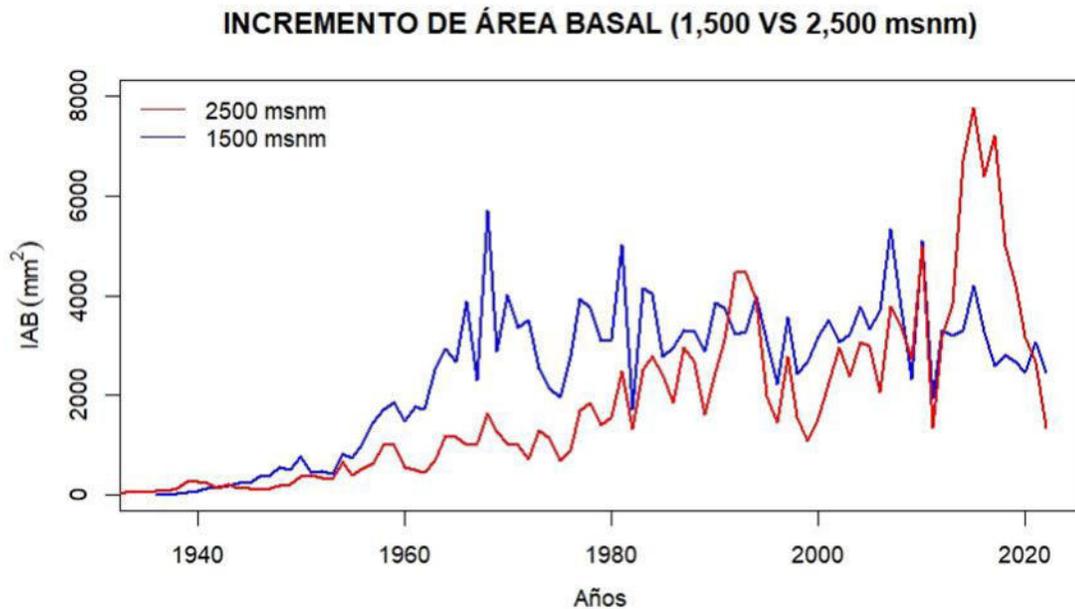


Figura 6. Comparación del incremento del área basal (IAB) de *Pinus pseudostrobus* a una altitud de 1,500 y 2,500 msnm en Güémez, Tamaulipas, durante un periodo de 80 años.

VII.3. Índice de ancho de anillo (IAA)

Los cambios en el Índice de Ancho de Anillo (IAA) presentaron variaciones entre los diferentes árboles analizados. En las series correspondientes a la altitud de 1,500 msnm, se obtuvo un IAA con una correlación de 0.671, valor que supera el mínimo confiable establecido en 0.3281.

En la Figura 7 se destacan los años 1982, 2009 y 2011 como periodos de bajo crecimiento. Por el contrario, los años 1968, 1981, 2007, 2010 y 2015 muestran un incremento mayor en el crecimiento.

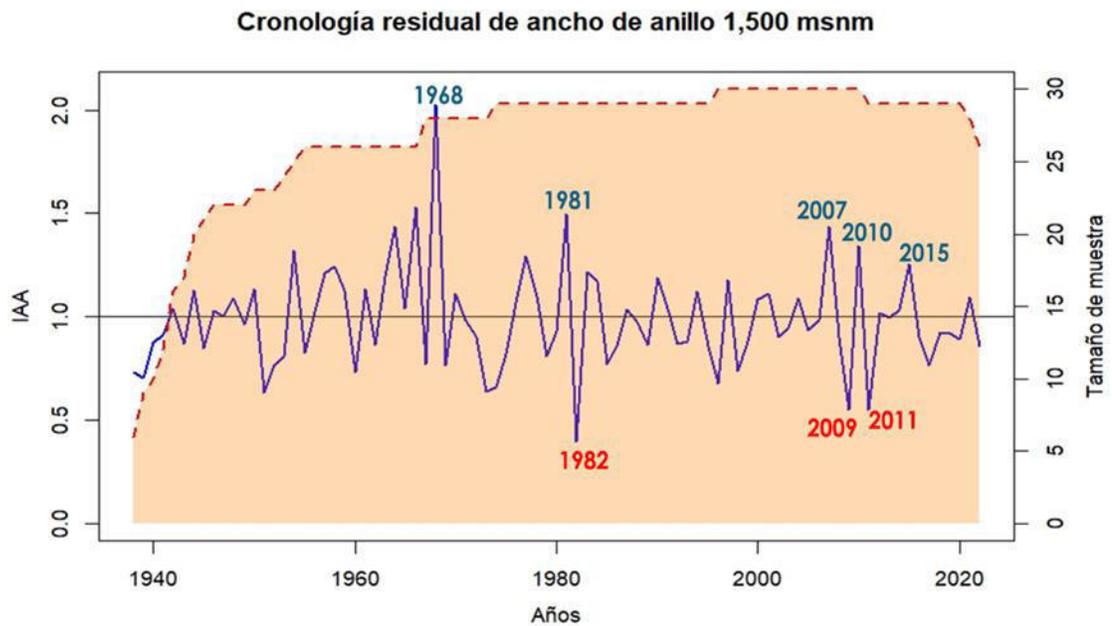


Figura 7. Cronología de índice de ancho de anillo (IAA) de *Pinus pseudostrobus* a una altitud de 1,500 msnm (Ejido Los San Pedros) durante un periodo de 80 años. La línea azul representa los valores medios del IAA, la línea negra es la media del IAA y la línea punteada es el tamaño de muestra.

Se obtuvo un IAA con una correlación de 0.698 superior al valor mínimo de confiabilidad establecido en 0.3281, para las series correspondientes a la altitud de 2,500 msnm. En la Figura 8 se identifican tres años con un crecimiento notablemente bajo, correspondientes a 1955, 1982 y 2011. Por otro lado, los años con mayor crecimiento fueron 1968, 1992, 2010 y 2014.

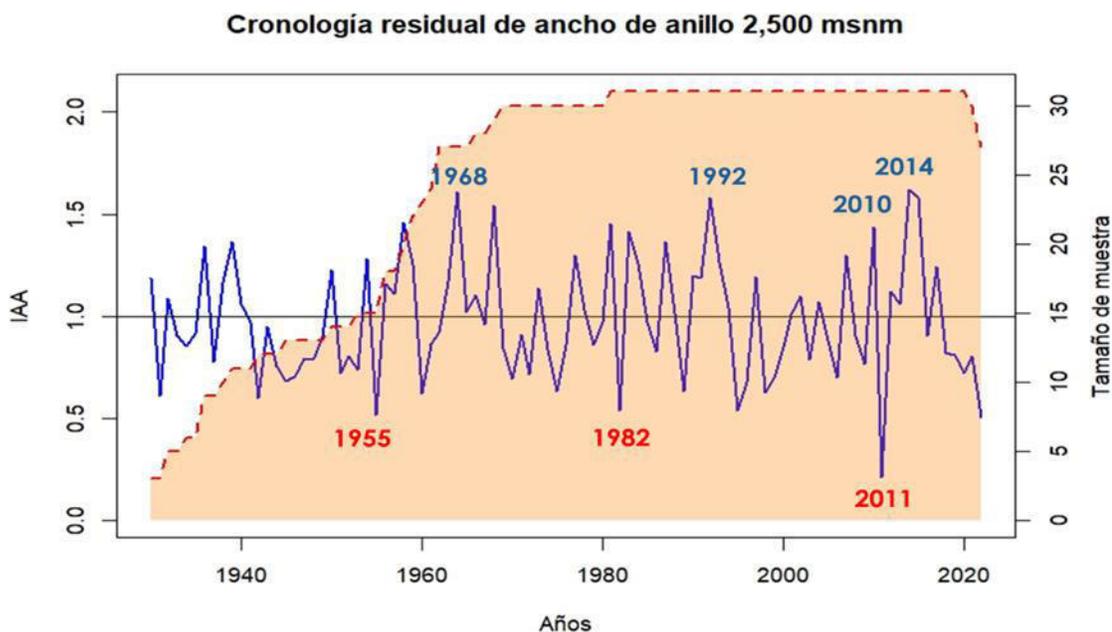


Figura 8. Cronología de índice de ancho de anillo (IAA) de *Pinus pseudostrobus* a una altitud de 2,500 msnm (Ejido Rancho Nuevo) durante un periodo de 80 años. La línea azul representa los valores medios de IAA, la línea negra es la media de IAA y la línea puntea es el tamaño de muestra.

VII.4. Correlación clima-incremento

Se consideró un período comprendido entre 1980 y 2022, a una altitud de 1,500 msnm, analizando las correlaciones significativas entre la temperatura, la precipitación y el índice de ancho de anillo (IAA). Se encontró que la precipitación de los meses de enero a julio del año en cuestión presentó una correlación positiva y significativa con el IAA. En cuanto a la temperatura, se observó una correlación negativa y significativa con el IAA en diciembre del año previo al crecimiento, así como en los meses de enero, mayo, junio, julio y agosto. Por otro lado, la temperatura de octubre del año de crecimiento mostró una correlación positiva y significativa con el IAA (Figura 9).

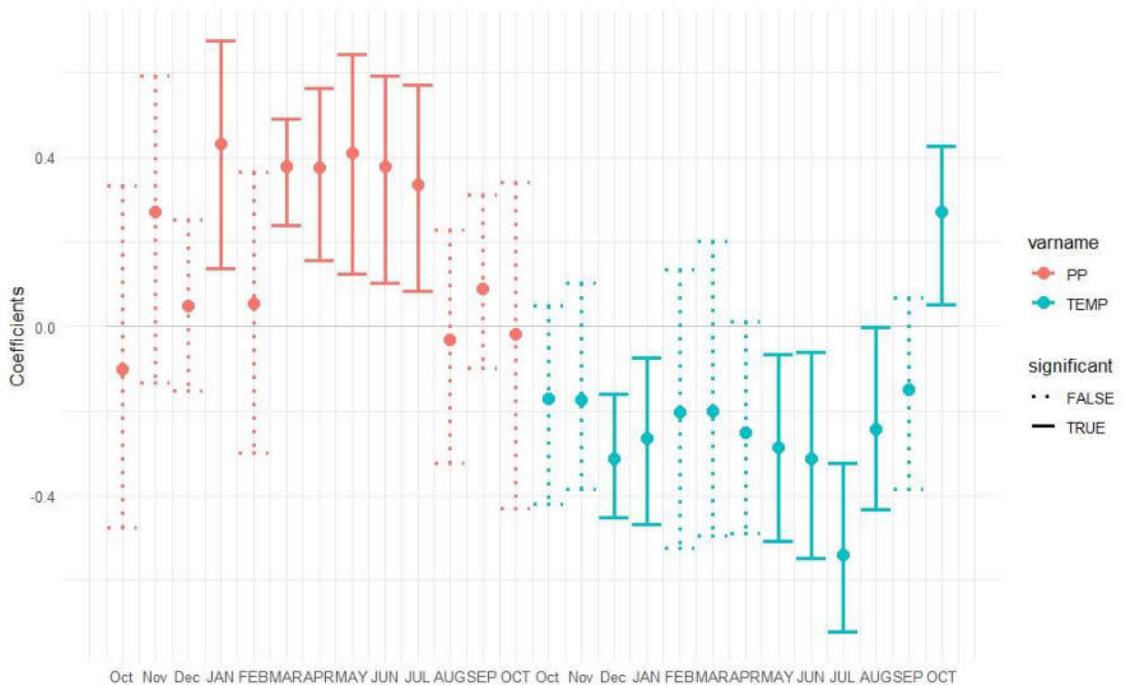


Figura 9. Análisis de la correlación entre el clima y el incremento basal durante el periodo de 1980 a 2022, a una altitud de 1,500 msnm. Los meses en minúscula corresponden al año previo de crecimiento, mientras que los meses en mayúscula indican el año actual de crecimiento.

En comparación a una latitud de 2,500 msnm, se consideró el periodo de 1980 a 2022, analizando las correlaciones significativas entre la temperatura, la precipitación y el Índice de Ancho de Anillo (IAA). Se observó que la precipitación del mes de diciembre del año anterior al crecimiento, así como la de enero, junio y julio del año de crecimiento, presentaron una correlación positiva y significativa con el IAA. En cuanto a la temperatura, se identificó una correlación negativa y significativa con el IAA para los meses de diciembre del año previo al crecimiento, así como enero, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre del año de crecimiento. Sin embargo, en octubre la temperatura del año de crecimiento mostró una correlación positiva y significativa con el IAA (Figura 10).

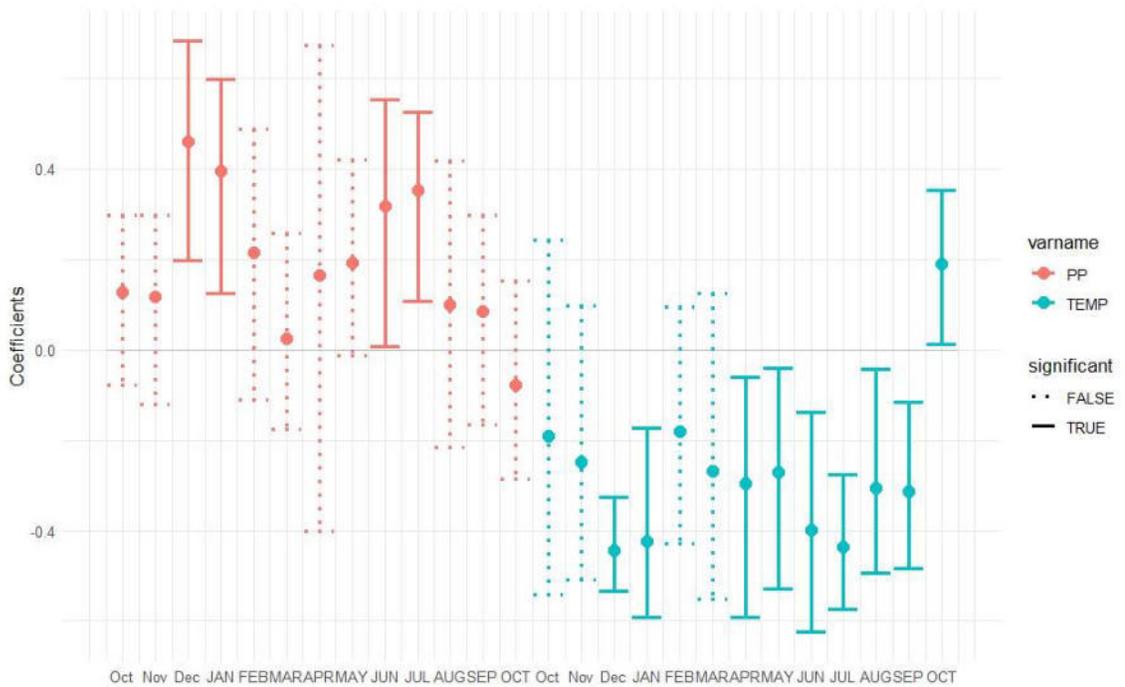


Figura 10. Análisis de la correlación entre el clima y el incremento basal durante el periodo de 1980 a 2022, a una altitud de 1,500 msnm. Los meses en minúscula corresponden al año previo de crecimiento, mientras que los meses en mayúscula indican el año actual de crecimiento.

VIII. DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio muestran diferencias significativas en el patrón de crecimiento del Incremento del Área Basal (IAB) entre las altitudes de 1,500 y 2,500 msnm. A 1,500 msnm, se observó un incremento exponencial durante los primeros 28 años, seguido de un crecimiento constante hasta 2010, momento en el cual comienza un descenso progresivo. En contraste, en el sitio a 2,500 msnm, el crecimiento también fue exponencial al inicio del periodo de observación, pero destacó por un notable incremento a partir de 2015, superando el crecimiento registrado a 1,500 msnm. Este cambio en la dinámica sugiere que las condiciones ambientales en altitudes más elevadas podrían favorecer un mayor crecimiento en los últimos años. El clima constituye un factor determinante en la distribución global de biomas y especies, actuando como un indicador sensible para evaluar los efectos del cambio climático sobre los organismos vivos. En particular, los límites altitudinales son altamente susceptibles a estas transformaciones. Se plantea que cualquier alteración en el rango de distribución de las especies está estrechamente asociada con las variaciones actuales en las condiciones climáticas (Salas Sánchez et al., 2011). Además, la mayor sensibilidad del crecimiento en 2,500 msnm podría estar relacionada con variaciones climáticas de gran escala. Gutiérrez-García & Ricker (2019) destacaron la influencia de fenómenos como El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico en la sincronía del crecimiento arbóreo en el norte de México. Esto sugiere que eventos climáticos globales podrían desempeñar un papel importante en la dinámica de crecimiento observada en este estudio.

Los patrones observados coinciden parcialmente con los resultados reportados por (Núñez-García et al., (2021), quienes encontraron que el IAB fue relativamente estable entre 1995 y 2015 en la mayoría de los sitios, con excepción de aquellos ubicados a mayores altitudes, que mostraron una mayor sensibilidad a la variabilidad climática. Además, los picos de crecimiento identificados entre 2015 y 2017 a 2,500 msnm son consistentes con los hallazgos

de Núñez-García et al. (2021) quienes también identificaron periodos de crecimiento elevado en altitudes superiores.

Al comparar estos resultados con los de González -Tagle et al. (2024), quienes también reportaron correlaciones significativas entre el IAA y variables climáticas, se observa un patrón consistente en la influencia de la temperatura y la precipitación sobre el crecimiento radial. Sin embargo, nuestros resultados revelan una correlación negativa más pronunciada con la temperatura en meses específicos del año de crecimiento, particularmente a mayores altitudes. Este hallazgo sugiere que, en altitudes elevadas, la temperatura podría tener un impacto más crítico en el crecimiento radial durante ciertos periodos del año, lo que podría estar relacionado con una mayor sensibilidad a la variabilidad climática en estos sitios.

El análisis de la correlación entre las variables climáticas y el Índice de Anillo Anual (IAA) revela tendencias diferenciadas según la altitud. A 1,500 msnm, se encontró una correlación positiva y significativa entre la precipitación de los meses de enero a julio y el IAA, lo que sugiere que la humedad durante este período es un factor clave para el crecimiento radial en esta altitud. Este comportamiento es consistente con los resultados de (Castruita-Esparza et al., 2016), quienes también identificaron la precipitación entre enero y julio como un factor determinante en el crecimiento de los árboles. Por otro lado, se observó una correlación negativa significativa con la temperatura de diciembre del año anterior y los meses de enero, mayo, junio, julio y agosto del año de crecimiento. Este patrón sugiere que las altas temperaturas durante estos meses pueden limitar el crecimiento de los árboles en altitudes más bajas, un fenómeno que podría estar relacionado con la sensibilidad de los árboles a las fluctuaciones térmicas.

Igualmente, a mayor altitud de 2,500 msnm, los resultados muestran una correlación positiva significativa con la precipitación de diciembre del año anterior y de los meses de enero, junio y julio del año de crecimiento. No obstante, la influencia negativa de la temperatura fue más pronunciada en esa altitud,

afectando negativamente el IAA durante varios meses del año de crecimiento, específicamente entre abril y septiembre. Esto sugiere una mayor sensibilidad de los árboles en esta altitud a las condiciones térmicas extremas en altitudes elevadas.

Este patrón de correlación climática entre las variables y el IAA es consistente con los hallazgos de (González Tagle et al., (2024), quienes observaron que la precipitación en meses clave del año de crecimiento tiene un impacto positivo en el IAA, mientras que la altas temperatura, especialmente las máximas, afectan negativamente el crecimiento. De manera similar, el análisis de *Pinus oocarpa* en Chiapas demostró que la precipitación invernal y primavera (enero-mayo) es determinante en el crecimiento radial (López-Hernández et al., 2018), lo que confirma que la disponibilidad de agua en los primeros meses del año es un factor crítico en distintos ecosistemas forestales. Los resultados aquí presentados refuerzan la idea de que el crecimiento radial de los árboles es sensible tanto a la cantidad de precipitación como a las variaciones térmicas, con un impacto diferencial según la altitud.

IX. CONCLUSIÓN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar el incremento del área basal de *Pinus pseudostrobus* en dos altitudes del municipio de Güémez, Tamaulipas, mediante técnicas dendrocronológicas. A partir de los resultados obtenidos, se confirmó la hipótesis de que la altitud influye significativamente en el crecimiento de la especie, reflejándose en el diámetro a la altura del pecho (DAP), el índice de ancho de anillo (IAA) y la dinámica del incremento del área basal (IAB).

El análisis de las mediciones dendrométricas mostró que los árboles a 1,500 msnm presentan en general un mayor DAP y una mayor altura total en comparación con los árboles situados a 2,500 msnm. Este patrón sugiere que las condiciones ambientales a menor altitud favorecieron un mejor desarrollo del diamétrico y en altura de los árboles.

En el incremento de área basal (IAB), se identificó un crecimiento inicial exponencial en ambos sitios, con diferencias en los últimos años de crecimiento. A 1,500 msnm, el crecimiento se observaron picos de crecimiento en 1968, 1981, 2007, 2010 y 2015, mientras que a 2,500 msnm se observaron picos de crecimiento en 1993, 2010, 2015 y 2017. Los resultados sugieren que los árboles experimentaron en ambas altitudes un patrón de crecimiento similar hasta el año 2010, posteriormente se registró un mayor incremento en el sitio de mayor altitud, posiblemente en respuesta a variaciones climáticas.

El análisis del Índice de Ancho de Anillo (IAA) permitió identificar los periodos de mayor y menor crecimiento en ambas altitudes. A 1,500 msnm, los años con mayor crecimiento fueron 1968, 1981, 2007, 2010 y 2015, mientras que los años con menor crecimiento fueron 1982, 2009 y 2011. A 2,500 msnm, los mayores incrementos ocurrieron en 1968, 1992, 2010 y 2014, mientras que los años con menor crecimiento fueron 1955, 1982 y 2011. Estos patrones reflejan la influencia de factores climáticos que influenciaron el desarrollo de la especie.

El análisis de correlación entre clima e incremento del área basal evidenció que la precipitación tiene una influencia positiva en el crecimiento de *Pinus*

pseudostrobus, mientras que la temperatura tiene un efecto negativo en la mayor parte del periodo analizado, con excepción de octubre, donde se identificó una correlación positiva en ambas altitudes.

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar prácticas de manejo forestal adaptadas a las condiciones locales, especialmente frente a los efectos del cambio climático. El estudio aporta información clave para la gestión sostenible de los recursos forestales en zonas de altitud media y alta de la región.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Bernal-Salazar, S., & Terrazas-Salgado, T. (2000). Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques*, 6, 73–86.
- Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Mérian, P., Qeadan, F., Zang, C., Buras, A., Cecile, A., Mudelsee, M., Schulz, M., & Klesse, S. (2023). *Dendrochronology Program Library in R*. <https://github.com/AndyBunn/dplR>
- Calvente, A. M. (2007). *El concepto moderno de sustentabilidad*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51722288/Concepto_Moderno_de_Sustentabilidad-libre.pdf?1486676635=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEl_concepto_moderno_de_sustentabilidad.pdf&Expires=1739217457&Signature=Gy-4HZ98mRAzVazBTXHV~u5355G3bh-lbUUTv7nCAXou9tBYR4xeW6p-uq1RDM18Avk6ZAut0MNR-Ep2SG1kTTkdM3c6WWUW5tgLSW8KGFcYDv5iUDmBNMarxq8RI83lwTHGYr6zh40waG52RHdEZxylvekL3Vv1uGxh5V5asPyBmXPz1QyJh~VLpexTv2EITjFv~hcNucwKNPzMekoqbbYbiQWpG4aG7vkerOt-7V-eTsvucLL63Kst314tfa~Q~mOXDn2ZCqW4BYb~XFHFk2EnOmd6OvqKY6jcuL9iochEZrpzajrkaBDd8cdH3PpMOtvTGJ~Bxv4d6aVA0scJA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Castruita-Esparza, L. U., Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Ramírez-Guzmán, M. E., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2016). Series de incremento del área basal en árboles dominantes de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco muestran periodicidad de acuerdo con patrones climáticos globales. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(3), 379–397. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.10.048>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., David-Valdez Cepeda, R., Méndez-González, J., & Constante-García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México Reconstructed droughts in the last 600 years for northeastern México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 235–249.
- Escobar-Alonso, S. (2021). *Pinus pseudostrobus Lindley (Pinaceae)*. <https://www.researchgate.net/publication/354009676>
- 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>

- González-Cásares, M., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). Differences in climate–growth relationship indicate diverse drought tolerances among five pine species coexisting in Northwestern Mexico. *Trees - Structure and Function*, 31(2), 531–544. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1488-0>
- González-Tagle, M. A., Cerano-Paredes, J., Himmelsbach, W., Alanís-Rodríguez, E., & Colazo-Ayala, Á. A. (2022). Historial de incendios basado en técnicas dendrocronológicas para un bosque de coníferas en la región sureste de Jalisco, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 29(1). <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.018>
- Gutiérrez-García, G., & Ricker, M. (2019). Climatic influence on radial growth in four conifer species in the Sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, Mexico). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(1). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2004). *Guías para la interpretación de cartografía: edafología*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 17 de abril del 2023: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825231781/702825231781_1_1.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2019). Carta de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VI Ciudad Victoria F14-2. 18 de abril del 2023: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2021). *Diccionario de datos de climas*. 18 de abril del 2023: www.inegi.org.mx
- Jiménez, J., & Kramer, H. (1992). *Dinámica del crecimiento de especies arbóreas en un rodal mixto-incoetáneo mediante la metodología de análisis troncal*.
- Lendínez, C., Iturre, M. C., Araujo, P. A., & Gonzales-García, C. (2013). Crecimiento del área basal en parcelas permanentes de inventario forestal continuo. *Revista de Ciencias Forestales*, 21, 115–120.
- López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E. H., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Esquivel-Arriaga, G. (2018). Growth response of *Pinus oocarpa* to climatic variables in Chiapas, Mexico. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1580–1596. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32663>
- Manzanilla-Quñones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., & Villanueva-Díaz, J. (2020). Sensibilidad climática en anchuras de anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii*: una especie alpina mexicana con

- potencial dendroclimático. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, 1–15. <https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2020.91.3117>
- Núñez-García, A., Gómez-Guerrero, A., Terrazas-Salgado, T. M., Vargas-Hernández, J. J., & Villanueva-Díaz, J. (2021). Analysis of basal area increment of *Pinus hartwegii* Lindl. At different elevations and aspects on Jocotitlán Mountain, State of Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 27(1), 73–88. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2019.10.074>
- Reyes-Hernández, F. (2015). *Programa de Manejo Forestal Avanzado para el Aprovechamiento de Recursos Forestales Maderables en el Ejido Los San Pedros Municipio de Güemez, Tam.*
- Rojas-García, F., Gómez-Guerrero, A., García, G. G., Pérez, G. Á., Hernández, V. J. R., & de Jong, B. H. J. (2020). The use of dendroecology in forest management: A review. In *Madera y Bosques* (Vol. 26, Issue 3, pp. 1–19). Instituto de Ecología, A.C. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632116>
- Salas-Sánchez, J., Molina-Guerra, V. M., Pérez-Dominguez, R., Silva-Arredondo, F. M., Ortiz-Hernández, E. S., & Jurado, E. (2011). Cambio climático: ¿precursor de migración de especies vegetales en la montaña más alta del norte de México? *Ciencia UANL*, XIV, 137–143. <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=40218433006>
- Salinas, Rodríguez, & María Magdalena. (2018). La Sierra Madre Oriental como reservorio de diversidad vegetal. *Revista Ciencia UANL*, 21(88). <https://doi.org/10.29105/cienciauanl88.21-4>
- SEMARNAT. (2018). *Anuario Estadístico de la producción forestal 2018*. www.gob.mx/semarnat
- Sistema Nacional de Información Forestal. (2024). *Indicadores Económicos Forestales; de PIB Forestal*.
- Vásquez-Guadalupe, G. L. (2023). *Evaluación de crecimiento y rendimiento mediante dendrotonología en Bolaina Blanca (Guazuma crinita Mart) en San Ignacio 2019*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Therrel, M. D., Cleaveland, M. K., & Sánchez-Cohen, I. (2004). *Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México*. SAGARPA.
- Hernandez-Díaz, C. J., Díaz-Carrillo, Ó. A., Villanueva-Díaz, J., & Wehenkel, C. (2022). *Análisis del incremento corriente anual y del incremento medio anual en siete poblaciones de Picea. (Picea, Pinaceae) de México*, 132. <https://www.researchgate.net/publication/362967146>
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>