

Sensibilidad de los Anillos de Crecimiento de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. (Oleaceae) en
los Andes Orientales Neotropicales

Andrés David Rojas Hurtado

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Forestal

Director

Diego Suescún Carvajal

MSc en Bosques y Conservación Ambiental

Codirector

Ronald Alfonso Montañez Valencia

MSc en Conservación y Usos Sostenibles de Sistemas Forestales

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1.Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.Marco Teórico.....	13
2.1. Dendrocronología	13
2.2. <i>Fraxinus uhdei</i>	14
2.3. Cambio climático.....	14
2.4. Captura de carbono	14
2. Metodología	15
3.1. Área de estudio	15
3.2. Toma de datos	16
3.3. Procesamiento de datos.....	17
3.3.1. Procesamiento de muestras	17
3.3.2. Generación de la cronología	17
3.3.3. Conexión entre el clima y los anillos de crecimiento	18
3.3.4. Validación climática	18
3.3.5. Comparación con otros estudios	18
3.Resultados	19
4.1. Descripción de las series de anillos obtenidas	19

4.2. Descripción de la cronología	20
4.3. Validación de datos climáticos	23
4.4. Relación entre el clima y los anillos de crecimiento.....	23
4.5. Comparación con otros estudios	28
4.Discusión.....	29
5.Conclusiones	33
6.Recomendaciones	33
Referencias Bibliográficas	35
Apéndices.....	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Metadatos</i>	19
Tabla 2. <i>Parámetros principales de las series de los anillos de crecimiento</i>	21

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Mapa de ubicación de los árboles muestreados</i>	16
Figura 2. <i>Longitud temporal de las series</i>	20
Figura 3. <i>Sincronización visual a través del diagrama de Spagueti</i>	22
Figura 4. <i>Precipitación CRU vs IDEAM</i>	23
Figura 5. <i>Cronologías estándar y residual</i>	24
Figura 6. <i>Cronología vs clima</i>	25
Figura 7. <i>Relación del índice del ancho de los anillos (IAA) con el clima. A</i>	26
Figura 8. <i>Correlaciones móviles</i>	27
Figura 9. <i>Comparación entre Málaga vs Medellín</i>	29

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Obtención de las muestras.	41
Apéndice B. Fase de laboratorio.	42
Apéndice C. Obtención de la cronología y análisis de datos.	43

Resumen

Título: Sensibilidad de los Anillos de Crecimiento de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. (Oleaceae) en los Andes Orientales Neotropicales.

Autor: Rojas Andrés*

Palabras Clave: Cambio climático, cofechado, dendrocronología, dendroclimatología, Urapán.

Descripción:

Los árboles tienen la capacidad de almacenar información climática de los sitios donde habitan. En las ciudades ofrecen gran cantidad de servicios ecosistémicos como la regulación del microclima, mejoramiento del suelo y albergue de fauna silvestre, entre otros. Con los anillos de crecimiento de los árboles es posible establecer su edad y estudiar de forma retrospectiva las variables ambientales que determinan su crecimiento. A pesar del potencial que ofrece dicha herramienta, existen pocos estudios en entornos urbanos de Colombia. Por tanto, el objetivo de este estudio, es desarrollar la primera cronología de anillos de crecimiento del árbol urbano Urapán (*Fraxinus uhdei*) en Málaga (Santander) y relacionarla con las variables climáticas locales. Se muestrearon 15 árboles sanos (30 núcleos de madera) distribuidos en el campus de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga, utilizando un barrenado de Pressler. Las muestras se fijaron, lijaron y escanearon. Se realizaron mediciones del ancho de los anillos sobre las muestras digitalizadas (imágenes) por medio del software CooRecorder. La cronología fue procesada en el software R y comparada con variables climáticas. La edad de los árboles osciló entre 25 y 32 años, y se evidenció una muy buena sincronización de las series de anillos (cofechado) tanto visual como estadísticamente ($r = 0,62$, $p < 0,05$). Se determinó que la precipitación en los meses más lluviosos (julio a octubre) da inicio al crecimiento del árbol ($r = 0,4$, $p < 0,05$) y la temperatura limita el crecimiento del mismo durante el mes de septiembre ($r = -0,5$, $p < 0,05$). El Urapán resultó ser sensible a cambios en la precipitación y temperatura que se presenta en el municipio, indicando que estas variables limitan su crecimiento, por lo que esta especie puede ser utilizada como bioindicador del cambio climático.

* Trabajo de grado

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Facultad de Ciencias Agrarias. Programa Ingeniería forestal. Director: Diego Suescún Carvajal. Ing. Forestal. MSc. Codirector: Ronald Alfonso Montañez Valencia. Ing. Forestal. MSc.

Abstract

Title: Sensitivity of growth rings of *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. (Oleaceae) in the eastern Neotropical Andes.*

Author(s): Andrés Rojas**

Key Words: Climate change, co-dating, dendrochronology, dendroclimatology, Urapan.

Description:

Trees have the ability to store climate information about the places where they grow. In cities, they provide a wide range of ecosystem services, such as microclimate regulation, soil improvement, and wildlife habitat, among others. Tree growth rings can be used to determine a tree's age and retrospectively study the environmental variables that determine its growth. Despite the potential offered by this tool, there are few studies in urban environments in Colombia. Therefore, the objective of this study is to develop the first chronology of growth rings of the urban tree Urapán (*Fraxinus uhdei*) in Málaga (Santander) and relate it to local climate variables. Fifteen healthy trees (30 wood cores) distributed across the campus of the Industrial University of Santander, Málaga campus, were sampled using a Pressler drill. The samples were fixed, sanded, and scanned. Ring width measurements were taken on the digitized samples (images) using CooRecorder software. The chronology was processed in R software and compared with climatic variables. The age of the trees ranged from 25 to 32 years, and very good synchronization of the ring series (co-dating) was evident both visually and statistically ($r = 0.62$, $p < 0.05$). It was determined that precipitation in the rainiest months (July to October) initiates tree growth ($r = 0.4$, $p < 0.05$) and that temperature limits tree growth during the month of September ($r = -0.5$, $p < 0.05$). The Urapán proved to be sensitive to changes in precipitation and temperature in the municipality, indicating that these variables limit its growth, so this species can be used as a bioindicator of climate change.

* Degree Work

** Institute for Regional Outreach and Distance Education (IPRED). Faculty of Agricultural Sciences. Forestry Engineering Program. Director: Diego Suescún Carvajal. Forestry Engineer. MSc. Co-director: Ronald Alfonso Montañez Valencia. Forestry Engineer. MSc.

Introducción

Cada día aumenta la población mundial, lo que repercute en las problemáticas actuales de la sociedad como la degradación ambiental, el cambio climático y la deforestación, intensificando la insostenibilidad (Hosagrahar et al., 2016). Los esfuerzos actuales de conservación deben estar centrados en resolver estas problemáticas, una de las alternativas es tener en cuenta las decisiones basadas en la evidencia (Newman et al., 2017; Miyahara et al., 2022), que surge como una de las muchas soluciones efectivas para frenar el cambio climático. La dendrocronología es una técnica que se ha venido desarrollando durante más de 100 años en el mundo (Feng et al., 2024), esta permite determinar con precisión la formación de anillos de crecimiento en los árboles (e. g., capas anuales de madera). A través de la generación de estos anillos, los árboles tienen la capacidad de almacenar información sobre las condiciones climáticas del ambiente donde habitan (Schweingruber & Börner, 2018; Dios-Ospina et al., 2024).

En el trópico, estudiar los anillos de crecimiento es algo reciente, siendo más común encontrar estudios sobre dendrocronología en zonas templadas y boreales (Reis-Avila y Oliveira, 2017), debido a que muchos científicos no tenían la certeza de que los árboles tropicales posean anillos de crecimiento (Giraldo y del Valle, 2012). Sin embargo, actualmente son muchos los estudios sobre dendrocronología en el trópico (Alvites et al., 2019; Álvarez et al., 2021; Rodríguez-Morata et al., 2022; Bovi et al., 2024) y hay diversidad de especies que presentan crecimiento rítmico, es decir, anillos anuales (Giraldo et al., 2020), incluso en ambientes tropicales sin condiciones climáticas contrastantes (e.g., sin meses ecológicamente secos). Existen especies de árboles que forman anillos de crecimiento anuales determinados por la disponibilidad de luz y las

variaciones en la nubosidad, aumentado las variables que marcan el crecimiento de los anillos (Giraldo et al., 2023).

Los árboles como bioindicadores de las condiciones ambientales, han permitido registrar las variaciones de la temperatura y aportar evidencias del cambio climático (Mann et al., 1999). Dentro de las ciudades, se producen condiciones climáticas distintas a las de afuera, como la alta contaminación atmosférica, la sequía y un aumento considerable de la temperatura (e.g., isla de calor), lo que incide directamente en el desarrollo y crecimiento de los árboles (Miyahara et al., 2022). Por ello, investigar la evolución de estas condiciones proporciona información valiosa para una planificación urbana más eficiente que promueva el bienestar de las comunidades. También, las grandes y pequeñas ciudades establecidas en las cordilleras andinas, juegan un papel importante en el cambio climático, ya que son grandes emisoras de carbono a la atmósfera, además, las zonas verdes dentro de las mismas brindan servicios ecosistémicos importantes para mejorar la calidad de vida de las habitantes (Zucchetti et al., 2020). Además, se ha observado un notable crecimiento en investigaciones sobre la dendrocronología en ciudades, ya que los árboles sirven como respuesta al calentamiento global, ayudando significativamente a la toma de decisiones con base a la evidencia (Miyahara et al., 2022) y a la toma de decisiones basadas en la naturaleza (SBN; Moreno et al., 2024).

En este sentido, la dendrocronología puede ofrecer información retrospectiva valiosa sobre la variabilidad ambiental en las ciudades, permitiendo reconstruir cambios en el clima, la contaminación atmosférica y otros factores ambientales a lo largo del tiempo (Miyahara et al., 2022). A través de la datación cronológica de los anillos de los árboles y su relación con diferentes variables climáticas, se puede dar respuesta a problemáticas como el cambio climático, ya que desde el pasado se entienden mejor muchos fenómenos naturales que quedan registrados en los

árboles por medio de sus anillos (Giraldo, 2011; Andreu-Hayles et al., 2023). Además de permitir reconstruir la historia climática, los anillos de crecimiento informan sobre tasas de crecimiento y captura de biomasa en sistemas forestales, lo cual ayuda a la toma de decisiones sobre la ordenación de los bosques, sin alterar su capacidad de proveer servicios ecosistémicos (Giraldo, 2011). Es importante profundizar aún más los estudios sobre la dendrocronología en el trópico y en Colombia, principalmente en los municipios y ciudades, ya que se presentan vacíos de información sin datos sobre el crecimiento de muchas especies, y con pocos estudios en comparación con los países del norte (Andreu-Hayles et al., 2023), lo que resalta la importancia de estos estudios para atacar problemas globales como el cambio climático (Diosa-Ospina et al., 2024), que amenaza con el deterioro de ecosistemas enteros, como el bosque andino y los páramos (Restrepo et al., 2025).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar la primera cronología de anillos de crecimiento del árbol urbano Urapán (*Fraxinus uhdei*) en Málaga, Santander, Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

Analizar los anillos de crecimiento de 15 individuos de Urapán mediante técnicas dendrocronológicas para establecer patrones de crecimiento y variabilidad anual.

Examinar la relación entre variables climáticas como precipitación y temperatura con el crecimiento basado en la cronología de los anillos desarrollados.

Comparar los patrones de crecimiento de Urapán en Málaga con aquellos registrados en otras ciudades donde se han desarrollado cronologías para la especie, evaluando si las respuestas de crecimiento son consistentes o divergentes en distintos entornos urbanos.

1. Marco Teórico

2.1. Dendrocronología

La dendrocronología es la disciplina encargada de analizar los anillos de crecimiento de los árboles, su formación y su relación con las condiciones climáticas que han prevalecido en un determinado lugar, en donde se encuentre algún árbol y que tenga la capacidad de generar anillos de crecimiento (Giraldo, 2011). Los anillos de crecimiento son franjas lineales de células, generadas por el cámbium vascular en ciertos árboles a lo largo de un determinado período de tiempo por alguna condición que altera su crecimiento y desarrollo (Diosa-Ospina et al., 2024). Estos anillos tienen la capacidad de registrar los cambios en la precipitación, temperatura, la estructura química del aire, captura de carbono, erupciones volcánicas, avalanchas torrenciales, brillo solar y fenómenos naturales como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO; Díaz et al., 2022). Esta medición se hace por medio de una técnica conocida como el Crossdating también llamado como datación cruzada o cofechado, es una técnica mediante la cual se comparan los patrones de formación de anillos de crecimiento de árboles, los cuales se desarrollaron en la misma época, en un mismo lugar y bajo condiciones climáticas similares (Giraldo, 2011).

Se ha evidenciado que la precipitación y la temperatura son las principales variables climáticas que influyen directamente en el crecimiento de los árboles (Parada et al., 2021; Aragão et al., 2022; Fontana et al., 2024; Diosa-Ospina et al., 2024), además de la humedad (López et al., 2022), el brillo solar (Giraldo, 2011), y fenómenos naturales como el ENSO (Crispín et al., 2022), pueden incidir significativamente en el crecimiento de los árboles.

2.2. *Fraxinus uhdei*

El *F. uhdei* en Colombia es conocido como Urapán, es una especie de árbol de rápido crecimiento en diámetro $2,12 \pm 0,0409$ cm/año, según lo reportado por Vázquez et al. (2024), alcanzando alturas de hasta 30 m y DAP de 80 a 100 cm. Es originario de México, posee hojas pinnaticompuestas opuestas de 20 a 30 cm de longitud, generalmente con siete folíolos y con un margen crenulado. Tiende a adaptarse a zonas áridas con poca precipitación, aunque suele encontrarse naturalmente en bosques riparios, bosque mixto y bosques húmedos de México hasta Guatemala (Villanueva et al., 2015).

En Colombia, aunque esta especie es introducida, este árbol se encuentra distribuido en múltiples ciudades, por ejemplo, en el municipio de Málaga Santander es la especie más abundante (Ayala-Torres, 2021). El Urapán presenta un rápido crecimiento y otorga servicios ecosistémicos como la captura de carbono y sombrero, lo que la convierte en una especie comúnmente utilizada en proyectos de silvicultura urbana (Diosa-Ospina et al., 2024) e incluso, en la implementación de plantaciones comerciales (Pérez y Blanco, 2013; Vázquez et al., 2024).

2.3. Cambio climático

El cambio climático es definido como cualquier alteración a las condiciones climáticas, está vinculada de manera directa o indirecta, a la actividad humana. Transforma la composición de la atmósfera de la tierra y altera las fluctuaciones naturales del clima, como el aumento de la temperatura (UNGRD, 2017).

2.4. Captura de carbono

Las plantas tienen la capacidad de almacenar el carbono dispuesto en la atmósfera, a través de procesos como la fotosíntesis e incorporarlo en su estructura, en forma de biomasa por un largo periodo de tiempo. Los bosques tropicales, capturan más carbono que cualquier otro ecosistema

en el mundo (Benjamín, 2001), siendo estos un pilar fundamental para frenar el cambio climático, por el gran almacenamiento de gases de efecto invernadero (GEI), sin embargo, la deforestación puede frenar estos avances, ya que, a través de este proceso se liberan grandes cantidades de carbono. Por esto, es importante generar acciones de conservación en los bosques, puesto que son importantes sumideros de carbono.

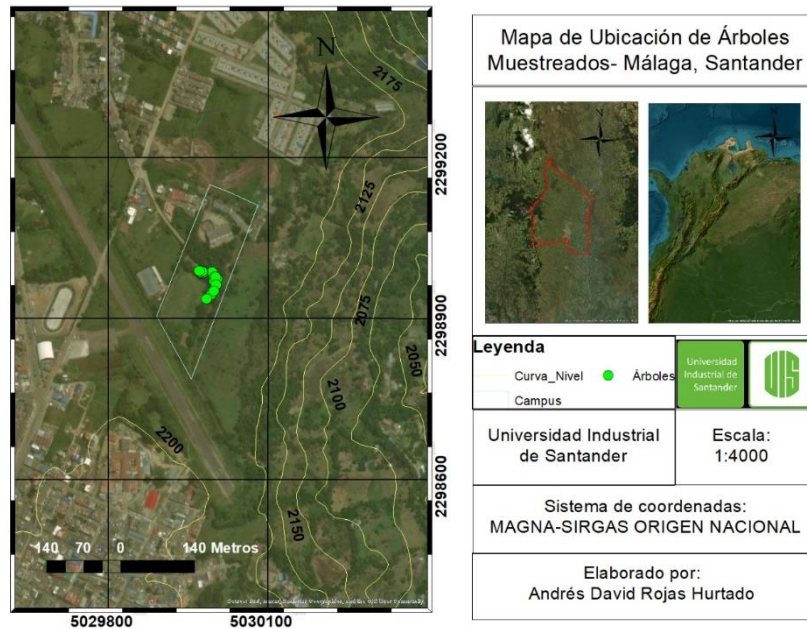
2. Metodología

3.1. Área de estudio

Este estudio se realizó en el municipio de Málaga, Santander, específicamente en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander (UIS), con coordenadas geográficas de 6° 42' 23,98" N y 72° 43' 42,54" O; en donde se conglomeran gran cantidad de individuos del Urapán (Ayala-Torres, 2021). El municipio presenta una temperatura promedio de 15,1°C, humedad relativa del 77%, una precipitación media anual de 1400 mm/año y una altitud de 2235 m s. n. m. (Corzo-Arevalo, 2019).

Figura 1.

Mapa de ubicación de los árboles muestreados.

**3.2. Toma de datos**

Se seleccionaron 15 árboles de Urapán que se encuentren creciendo en condiciones ambientales similares (clima, suelo, relieve) y relativa cercanía entre ellos. Como parte de información adicional, se tomaron algunos metadatos como el DAP, altura, diámetro de barrenado, diámetro de copa y coordenadas de los individuos. Utilizando el barrenado de Pressler (diámetro de 5,15 mm), se obtuvieron dos núcleos por individuo para obtener un total de 30 núcleos de madera. Las muestras se tomaron a una altura de 1,3 m sobre el suelo. Se aplicó la misma metodología de Diosa-Ospina et al. (2024). Para la relación entre el crecimiento de los árboles y el clima, se utilizó información de la base de datos de la *Climate Research Unit* (CRU; Harris, 2020), datos climáticos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

3.3. Procesamiento de datos

3.3.1. Procesamiento de muestras

Las muestras obtenidas fueron fijadas permanentemente en molduras de madera para su preservación y procesamiento. Las muestras fueron secadas durante una semana a temperatura ambiente. Posteriormente, se les aplicaron lijas abrasivas con un tamaño de grano que va desde los 100 hasta los 400, con el fin de resaltar los anillos de crecimiento y que sea más fácil su visualización. Las muestras fueron escaneadas en el Laboratorio de Bosques y Cambio Climático de la Universidad Nacional de Colombia, con escáner Epson 10000XL con resolución de 1800 dpi/ppp, la obtención de imágenes ayudó al procesamiento de los anillos. Se hizo un reconocimiento preliminar de los anillos, mediante la técnica de *Skeleton Plot* (Speer, 2010), la cual consiste en utilizar una lupa y las muestras físicas para reconocer los anillos a simple vista. Posteriormente, se realizó la medición del ancho de los anillos sobre las muestras digitalizadas por medio del software CooRecorder con una precisión de 0,014 mm (Cybis Elektronik & Data AB) y CDendro, este con el fin de mejorar el análisis de las cronologías.

3.3.2. Generación de la cronología

A través del programa CooRecorder se midió el ancho de los anillos, los resultados arrojados por el programa fueron analizados en el software R 4.3.1 (R Core Team, 2023) y utilizando el paquete dplR (Bunn 2008, 2010). Por medio del paquete dplR, se confirmó con exactitud la datación cruzada en relación con el ancho de los anillos, y se creó una cronología característica a la muestra. Además, se midió la varianza entre el subconjunto de muestras, con un valor $> 0,85$, la cual indicará la capacidad de la cronología en la reconstrucción del clima (Buras, 2017), conocida como la intensidad de la señal de la submuestra (SSS). Se calculó la cantidad de variación en relación a la señal registrada en la cronología, conocido como la relación señal ruido

(SNR). Finalmente, se midió la sensibilidad media de la cronología con valores entre 0 y 1, este parámetro indica que señales cercanas a cero, sugieren poca sensibilidad a condiciones climáticas; mientras valores altos señalan una mayor sensibilidad a condiciones ambientales marcadas. Sin embargo, valores superiores tienden a indicar anillos extraviados o cronologías diferentes (Speer, 2010).

3.3.3. Conexión entre el clima y los anillos de crecimiento

Para estudiar la relación de la influencia del crecimiento del Urapán con la precipitación y temperatura, se utilizó el paquete Treeclim del software R (Zang & Biondi, 2015) el cual evaluó la correlación entre el índice de los anillos y el clima, relacionando la variable climática negativa o positivamente con el desarrollo y crecimiento de los árboles.

3.3.4. Validación climática

Debido a la falta de información climática en el municipio de Málaga, se optó por utilizar bases de datos satelitales (CRU), solo existen datos de estaciones climáticas sobre la precipitación en el IDEAM. Se realizó una correlación entre los datos de precipitación del IDEAM y CRU. Para la temperatura no fue posible hacer comparaciones, ya que no existen datos sobre esta variable.

3.3.5. Comparación con otros estudios

Con la finalidad de determinar si varía el crecimiento radial del Urapán entre diferentes condiciones bioclimáticas, por medio de un análisis de variancia (ANOVA) se comparó la cronología de nuestros resultados con el estudio realizado por Diossa-Ospina et al. (2024) en la ciudad de Medellín.

3. Resultados

4.1. Descripción de las series de anillos obtenidas

Se obtuvieron un total de 31 núcleos, la edad de los árboles muestreados vario entre 24 y 32 años, lo que resalta una cronología de 32 años, se presentaron DAP entre 22,4 y 44,2 cm, el diámetro de barrenado oscilo entre 45,3 y 22,5 cm, además, se presentaron árboles en donde no fue posible realizar la barrenada a una altura de 1,3 m, debido a malformaciones por su crecimiento, lo que llevo a perforar el árbol a 1,2 o 1,4 m (Tabla 1).

Tabla 1.

Metadatos.

N° Árbol	Fecha de Barrenado	Latitud	Longitud	Diámetro	Diámetro de copa	Diámetro de barrenado a	Diámetro de barrenado b	Altura de Barrenado	Edad del árbol
1	15/05/2025	6,705793	-72,728487	44,2	6,5	45,3	44,7	1,3	30
2	15/05/2025	6,705698	-72,728487	30,0	6,0	30,1	31,1	1,4	24
3	15/05/2025	6,705678	-72,728402	29,3	5,0	30,2	30,5	1,3	33
4	15/05/2025	6,705705	-72,728402	27,8	6,0	28,6	28,8	1,3	28
5	15/05/2025	6,705755 8	-72,728413	33,7	6,2	34,6	34,3	1,3	32
6	16/05/2025	6,705475	-72,728457	33,0	7,0	33,0	33,6	1,3	31
7	16/05/2025	6,705418	-72,728493	22,5	7,0	23,5	24,2	1,3	27
8	16/05/2025	6,705343	-72,728579	22,4	5,5	22,5	23,4	1,3	31
9	16/05/2025	6,705707	-72,728442	22,7	9,0	25,3	24,4	1,4	24
10	19/05/2025	6,705733	-72,728448	31,0	10,0	30,7	32,6	1,3	24
11	19/05/2025	6,705801	-72,728643	37,2	6,5	37,1	37,3	1,3	27
12	19/05/2025	6,705777	-72,728647	35,3	9,0	35,9	35,9	1,3	25
13	19/05/2025	6,705785	-72,728677	33,7	8,0	33,8	34,4	1,3	25
14	19/05/2025	6,705807	-72,728653	29,4	8,0	29,4	29,0	1,2	28
15	19/05/2025	6,705812	-72,728700	27,1	9,0	26,6	27,3	1,3	32

Nota. La tabla indica los datos complementarios tomados en la fase de campo.

4.2. Descripción de la cronología

La mayor edad de los árboles fue de 32 años, se presentó una extensión temporal que va desde el año 1993, hasta el 2024 (Figura 2), ya que, se descartó el año 2025 por vacíos en la información climática que respalde la comparación de los anillos con el clima.

Figura 2.

Longitud temporal de las series.



Nota. En el gráfico se muestra la extensión temporal de todos los árboles muestreados.

La intercorrelación media de las series cruzada fue de 0,62 ($p < 0,05$), la intercorrelación media de las series estandarizadas se mantuvo con un valor de 0,62 ($p < 0,05$). Todos los árboles muestreados, fueron perforados hasta la médula. La sensibilidad media de los anillos fue de 0,54, la intensidad de la señal de la submuestra (SSS) fue de 0,94 ($p > 0,85$). La relación señal ruido (SNR) arrojó un valor de 3,13. El promedio de ancho de los anillos fue de 4,45 mm y un total de 811 anillos entre todas las muestras (Tabla 2).

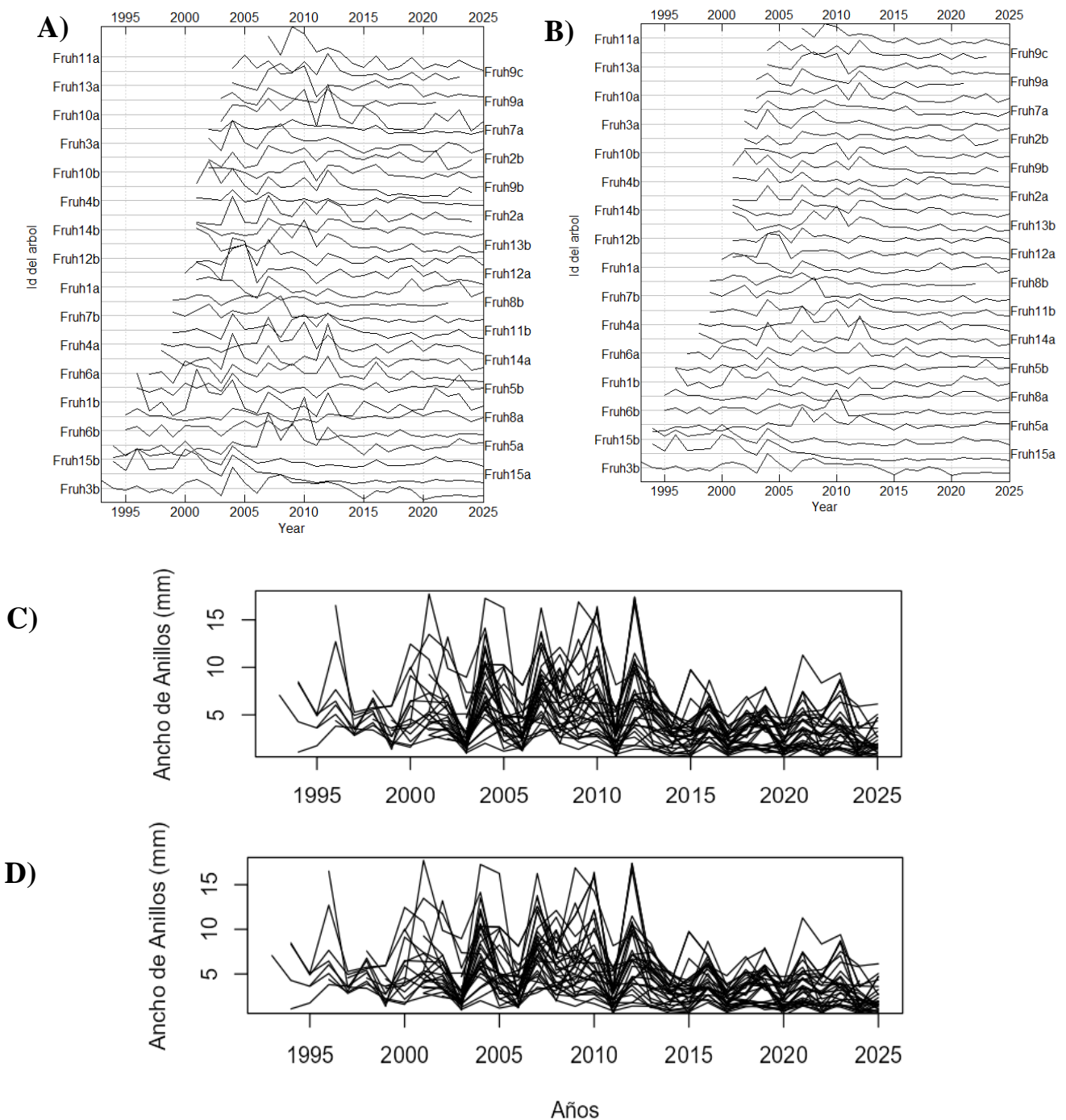
Tabla 2.

Parámetros principales de las series de los anillos de crecimiento.

Parámetro	Valor
Número de árboles muestreados	15
Número de series	31
Número de Anillos	811
Longitud de la cronología (años)	1993-2025
Promedio ancho de los anillos (mm)	4,45
Sensibilidad media	0,54
Intercorrelación serial media de las series crudas	0,62
Intercorrelación serial media de las series estandarizadas	0,62
SNR	3,13
EPS	0,76
SSS	0,94

Nota. En la Tabla 2 se muestran los principales estadísticos de la cronología como la SNR: Relación señal ruido; EPS: Señal expresada de la población; SSS: Intensidad de la señal de submuestra.

Las cronologías presentaron una buena sincronización visual, se observa como las muestras Fruh3b, 15a, 15b y 5a, son las que presenta la mayor longitud de serie (32 años; Figura 3A y 3B), además, se aprecia una tendencia en el ancho de los anillos en las series estandarizadas y crudas (Figura 3C y 3D).

Figura 3.*Sincronización visual a través del diagrama de Spagueti.*

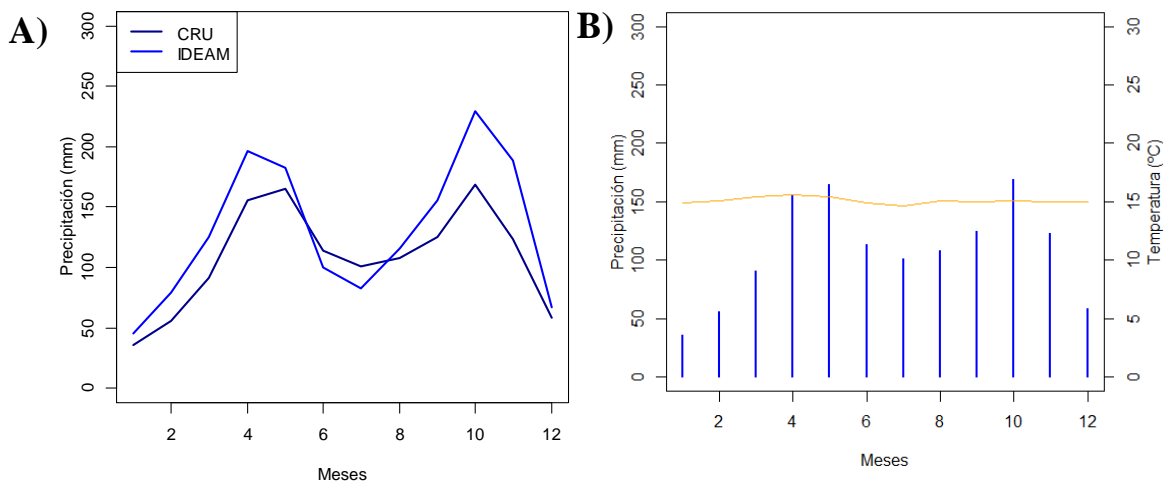
Nota. A) Series normales. B) Series estandarizadas. Sincronización visual a través del diagrama de Spagueti en un panel C) Series crudas. D) Series estandarizadas.

4.3. Validación de datos climáticos

La correlación realizada entre los datos mensuales de la precipitación del IDEAM y la CRU, fue significativamente alta ($r = 0,91$, $p < 0,05$). Existe un comportamiento similar entre las variables (Figura 4A), lo que indica que los datos de la CRU pueden ser utilizados en este estudio. Además, en Málaga, se presentan dos picos de precipitación en los meses de abril a mayo y septiembre a noviembre, con una temperatura media de $15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 4B).

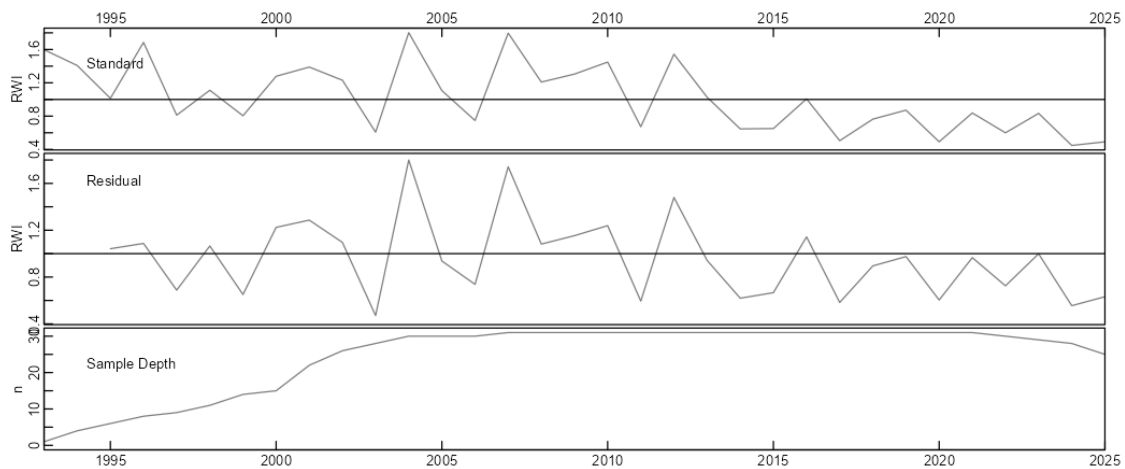
Figura 4.

A) Precipitación CRU vs IDEAM. B) Comportamiento del clima en Málaga (CRU).



4.4. Relación entre el clima y los anillos de crecimiento

Las cronologías estándar y residual, determinó que los árboles presentaron picos de crecimiento entre los años 2003 y 2013, además, a partir de ese año (2013), los árboles no superan la media del índice de anillos (1,02). La serie desde el año 2005 comienza a implementar todos los árboles para la construcción de la cronología y se presenta una leve disminución en los últimos años (Figura 5).

Figura 5.*Cronologías estándar y residual.*

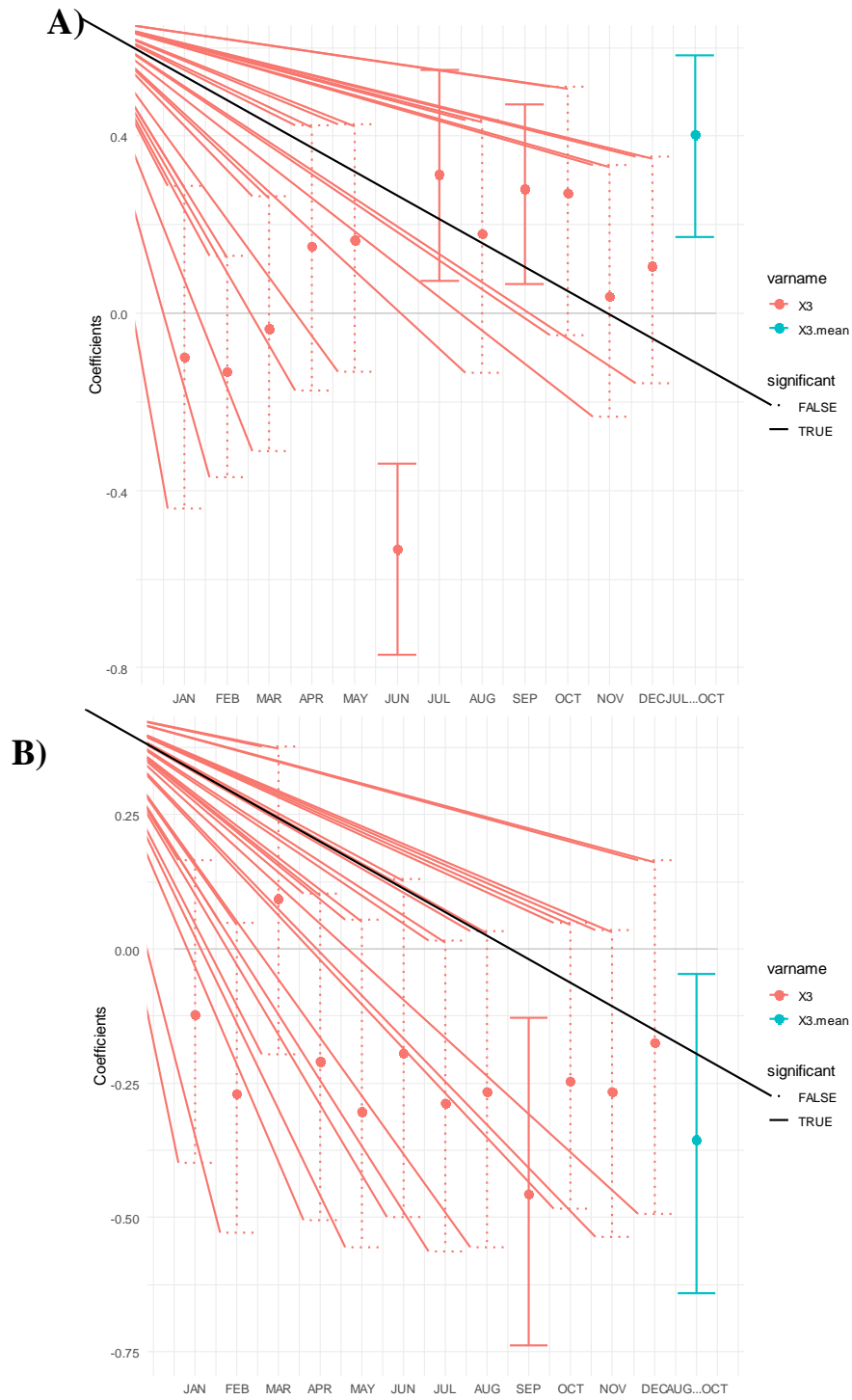
Nota. En la figura 5 se muestra el comportamiento del índice de ancho de anillos a través de los años. RWI: Índice de ancho de los anillos n: Número de árboles que contribuyen a la cronología.

El análisis realizado evidencio que la precipitación correlaciona positivamente, en un periodo de julio a octubre ($r = 0,4$, $p < 0,05$), en donde se evidencia que el árbol crece en estos meses. Entre abril-mayo y noviembre-diciembre se presenta una señal positiva poco significativa de crecimiento, sin embargo, en el mes de junio, el Urapán responde negativamente ($r = -0,5$, $p < 0,05$), además se presenta una señal negativa débil en los meses de enero-marzo (Figura 6A, 7A).

En cuanto a la temperatura, el Urapán responde negativamente durante todo el año, con señales poco significativas, en el mes de septiembre es claro que detiene su crecimiento por incidencia de la temperatura ($r = -0,5$, $p < 0,05$), en marzo se presenta una señal poco significativa de crecimiento (Figura 6B, 7B).

Figura 6.

Cronología vs clima. A) Comparación con la precipitación. B) Comparación con la temperatura.



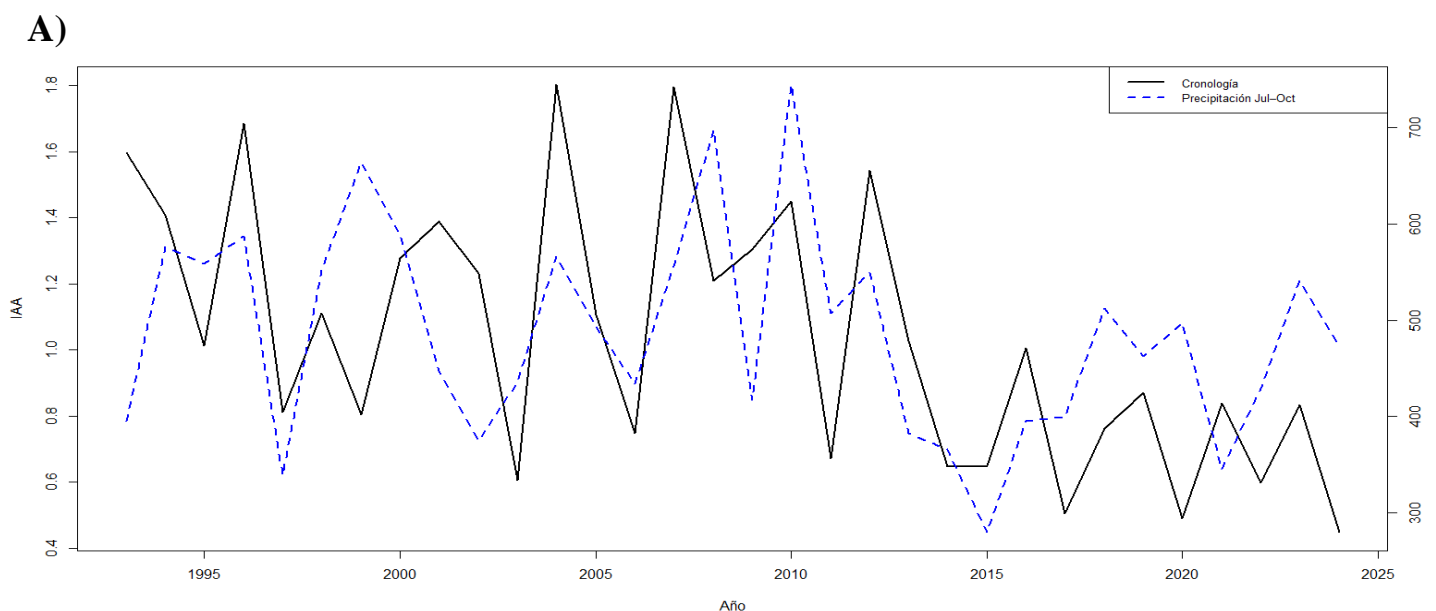
Nota. A) Comparación Con la precipitación. B) Comparación con la temperatura. En el gráfico muestra a través del color rojo la correlación entre las variables climáticas y la cronología durante los meses de un año, y en color azul, la correlación promedio de los meses seleccionados.

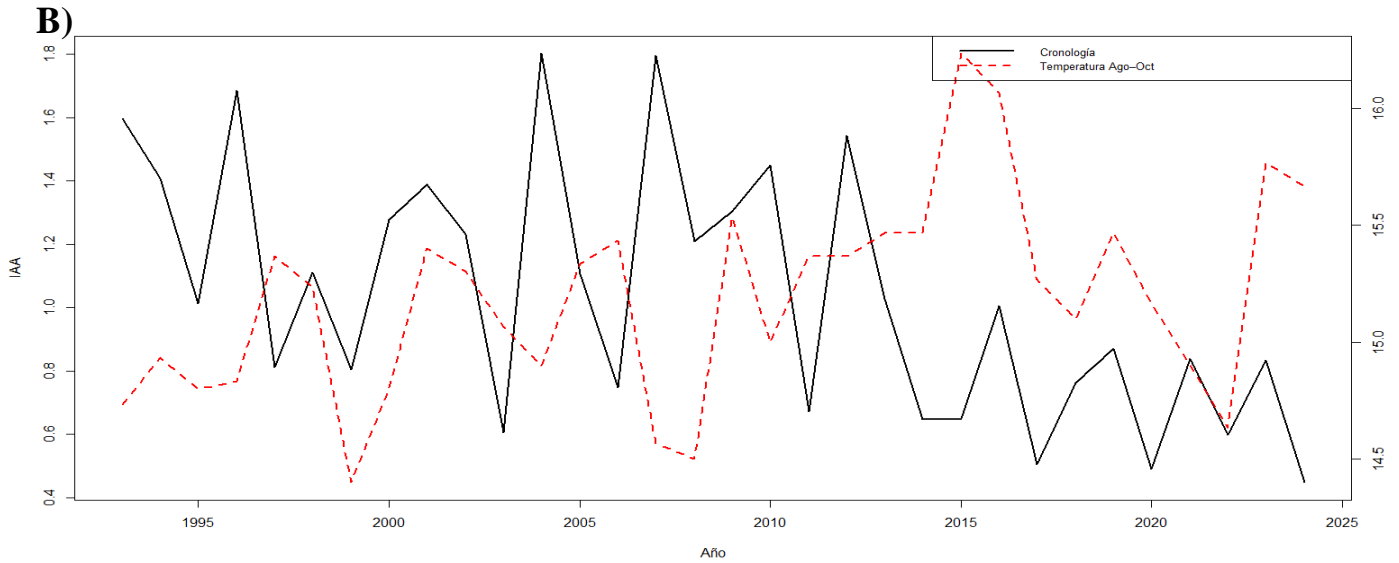
Por otro lado, en las correlaciones móviles, las cuales indican como los árboles reaccionan a la precipitación en distintos rangos de años, la precipitación correlacionaba positivamente y se mantiene constante entre diferentes rangos de años, en los meses de julio-octubre y en su promedio; además, presenta una relación negativa consistente entre las diferentes ventanas de correlación en el mes de junio (Figura 7A, 8A).

Finalmente, la temperatura media de septiembre correlacionó negativamente, manteniéndose constante entre los diferentes rangos de años, también se presenta una correlación parcial negativa en el mes de noviembre y similar entre el promedio de correlación de los meses de septiembre a octubre (Figura 7A, 8B).

Figura 7.

Relación del índice del ancho de los anillos (IAA) con el clima.

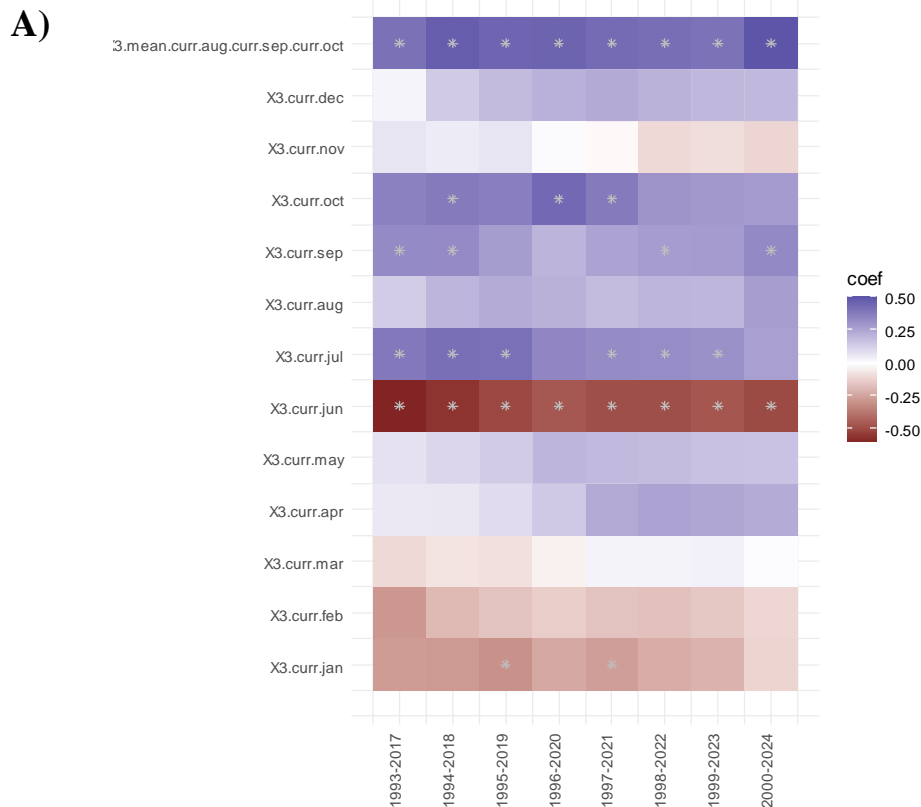




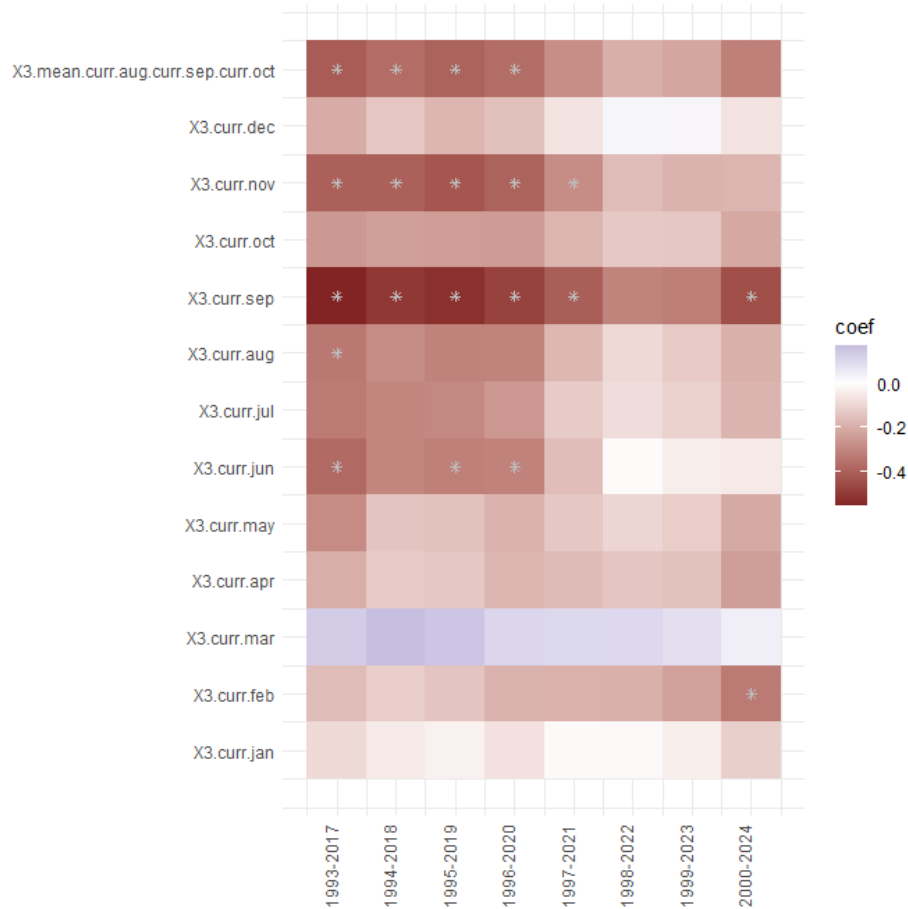
Nota. A) Relación de la cronología con la precipitación en los meses de julio a octubre. B) Relación de la cronología con la temperatura en los meses de agosto a octubre.

Figura 8.

Correlaciones móviles. A) Precipitación. B) Temperatura.



B)



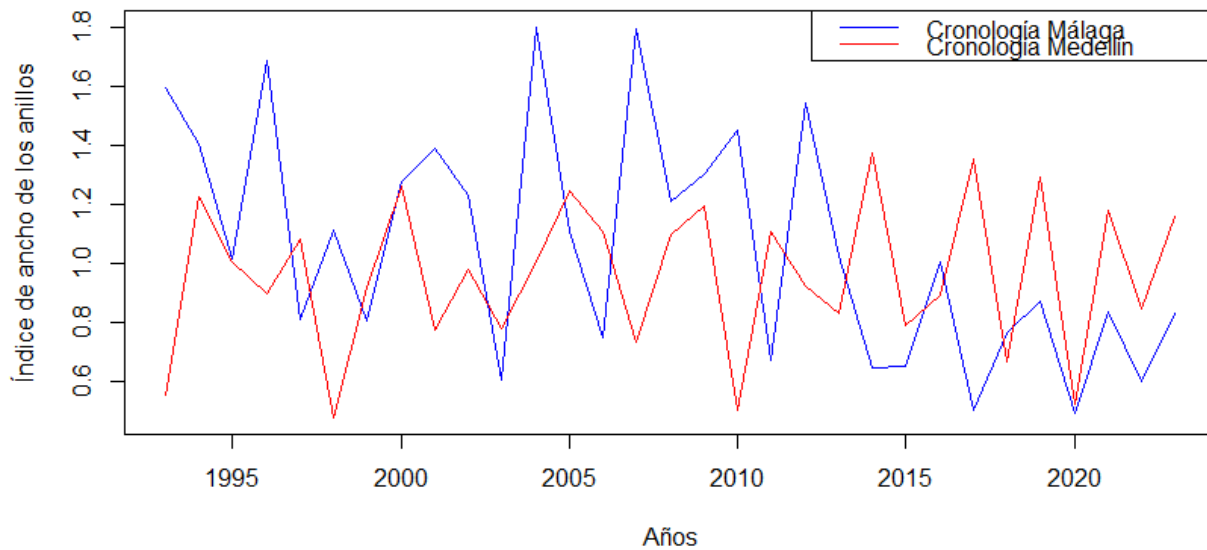
Nota. Los gráficos muestran las correlaciones entre diferentes rangos de años y para determinados periodos de meses.

4.5. Comparación con otros estudios

Los resultados arrojados por el análisis de varianza (ANOVA), indicaron que para el periodo analizado (1993-2023), no existen diferencias estadísticas significativas entre las dos cronologías ($P \text{ value} = 0,25, \alpha > 0,05$), además, al comparar las dos cronologías, se visualiza como el índice de los anillos se sincronizan a partir del año 2016 y algunos de los años anteriores (Figura 9).

Figura 9.

Comparación entre Málaga vs Medellín.



Nota. El gráfico muestra la relación visual entre la cronología resultante de Málaga y Medellín.

4. Discusión

Los resultados sugieren que la especie *F. udehi* funciona como bioindicador de la actividad climática en Málaga, cabe resaltar que este estudio sobre la dendrocronología es el primero que se realiza en este municipio. Aunque el Urapán ha sido poco analizado, en Medellín, Dios-Ospina et al., (2024), también realizaron la primera cronología, utilizando anillos de crecimiento de la especie. En Guanajuato, México (país donde es nativo el Urapán) realizaron la reconstrucción paleoclimática, curvas de precipitación, períodos de inundaciones y sequías, utilizando anillos de crecimiento de la especie (Miranda-Avilés et al., 2009). Este árbol posee un alto valor en cuanto

a la reacción de actividades humanas, recientemente, la especie se ha implementado para la reconstrucción de emisiones CO₂ fósil, por medio de sus anillos de crecimiento en Medellín (Vásquez et al., 2022), o años atrás en San Luis Potosí, una de las ciudades más industrializadas de México (Beramendi-Orosco et al., 2013), resaltando el potencial que tienen el Urapán como bioindicador.

La intercorrelación media de las series cruzadas, la cual determina la relación lineal media de dos o más variables entre sí, fue alta ($r = 0,62$ $p < 0,05$), superior a lo registrado por otros autores (Miranda-Avilés et al., 2009; Villanueva et al., 2015; Vásquez et al., 2022; Dios-Ospina et al., 2024) superando el nivel de significancia ($r = 0,33$, $p < 0,05$), indicando una buena sincronización de anillos entre árboles (Speer, 2010; Villanueva et al., 2015). La sensibilidad media de los anillos fue de 0,54 ($p < 0,05$), superior a lo encontrado por otros autores (Miranda-Avilés et al., 2009; Villanueva et al., 2015; Vásquez et al., 2022; Dios-Ospina et al., 2024), lo que indica una alta sensibilidad y variabilidad de las series a las condiciones climáticas (Speer, 2010; Dios-Ospina et al., 2024). La intensidad de la señal de la submuestra (SSS) fue de 0,94 ($> 0,85$), lo que determina una buena aptitud de la cronología para la reconstrucción del clima (Dios-Ospina et al., 2024). La señal expresada de la población (EPS), fue de 0,76, inferior a lo encontrado por otros autores (Vásquez et al., 2022; Dios-Ospina et al., 2024), indicando que la señal cronológica puede estar dominada por un solo individuo y que hay muy pocos árboles que superen una edad avanzada, ya que no supera el valor de partida ($> 0,85$; Speer, 2010). La relación señal ruido (SNR), fue de 3,13, inferior a lo registrado por otros autores en la misma especie (Vásquez et al., 2022; Dios-Ospina et al., 2024), lo que indica que existen otros factores ambientales que están incidiendo en el crecimiento de los árboles, no precisamente el clima, como recalca Speer (2010). Al tratarse de árboles sembrados en zonas públicas, las interacciones humanas inciden en este crecimiento, tal

vez, el riego asistido en épocas de sequía pudo intervenir en el comportamiento del árbol, en periodos en donde normalmente este no crece (Villanueva et al., 2015), u otras actividades, como podas de formación, fertilizaciones, disminución de la competencia, entre otros.

Las cronologías estándar y residual, determinaron que los árboles presentaron picos de crecimiento entre los años 2003 y 2013, a partir de ese año (2013), los árboles no superan la media del índice de ancho de anillos (1,02), esto sugiere que los árboles en edades tempranas tienden a presentar un crecimiento más acelerado, con el fin de ganar tamaño radial, aumentar la cantidad de poros para la obtención de más nutrientes, en cambio, para edades más avanzadas, comienzan a crecer más lento, ganando estabilidad y aumentando la densidad de su madera, del centro hasta la corteza (Montes et al., 2007; Rungwattana, & Hietz, 2018; Márquez-Carrero et al., 2022). Villanueva et al., (2015) asocia esta disminución en el crecimiento radial con la competencia, el déficit hídrico y la falta de nutrientes.

Los resultados indican que la precipitación se correlacionó positivamente con la cronología en los meses de julio ($r = 0,32$, $p < 0,05$), en donde se presentó una precipitación promedio de 82,84 mm y septiembre ($r = 0,29$, $p < 0,05$), en este mes se presentó una precipitación de 155,14 mm, se evidencia que el árbol tiene su crecimiento radial en los meses de julio a octubre ($r = 0,4$, $p < 0,05$). Similar a lo encontrado por Miranda-Avilés et al., (2009) en la ribera del río Guanajuato, México, en la cual se presenta una temperatura que esta entre los 22° y 14°C y una precipitación media de 800 mm/año, se evidencio la mayor correlación con la precipitación para los meses de agosto y septiembre, además se afirma que el ancho de los anillos depende de las condiciones en estos meses y que el inicio del crecimiento se da en la primavera. Entre abril-mayo y noviembre-diciembre se presenta una señal positiva poco significativa de crecimiento del árbol, similar a lo registrado por Diosa-Ospina et al., (2024), en donde la precipitación se presenta de noviembre a

marzo indica el crecimiento de los árboles de Urapán. Sin embargo, en el mes de junio, la especie responde negativamente a la precipitación ($r = -0,5$, $p < 0,05$), contrario a lo reportado por otros estudios (Villanueva et al., 2015; Diossa-Ospina et al., 2024), lo que indica que el exceso de agua, puede ser un limitante en el crecimiento del árbol, similar a lo reportado por Giraldo et al., (2020), en los bosques pluviales del Chocó, Colombia.

En cuanto a la temperatura, los resultados indicaron correlaciones negativas para los mismos meses en que la precipitación incide en el crecimiento del Urapán, similar a lo encontrado por Diossa-Ospina et al., (2024), esto se debe a que las variables climáticas en el trópico, como la temperatura, no tiene tanta variabilidad, como en ambientes subtropicales o templados, esto sugiere, que si se presenta una temperatura alta en un periodo de tiempo constante, podría ser una limitante en el crecimiento de los árboles por el exceso de la misma (Gareca et al., 2010; Rodríguez-Morata et al., 2022; Diossa-Ospina et al., 2024).

Los resultados arrojados en esta investigación fortalecen la hipótesis de que el Urapán, sirve como bioindicador de las condiciones ambientales y el cambio climático de las ciudades, ya que como fue demostrado en varios estudios, este es hipersensible mediante sus anillos de crecimiento a los cambios ambientales (Miranda-Avilés et al., 2009; Beramendi-Orosco et al., 2013; Vásquez et al., 2022; Diossa-Ospina et al., 2024). Monitorear los árboles urbanos, generan respuestas, de cómo estos reaccionan al cambio climático, lo que lleva a tomar decisiones basadas en la evidencia, estos resultados pueden mejorar las estrategias y mecanismos de adaptación al cambio climático en las ciudades y frenar las consecuencias de las actividades humanas en el planeta (Miyahara et al., 2022).

5. Conclusiones

Se logró desarrollar la primera cronología con una longitud de serie de 32 años (1993-2025), de los anillos de crecimiento del árbol urbano Urapán en Málaga, dando inicio a los primeros estudios sobre la relación árbol-clima y abriendo las puertas para muchas investigaciones futuras. Se determinó que los árboles de Urapán crecen en los meses de julio a octubre, periodo de meses marcados por las lluvias. El Urapán resulta ser sensible a la precipitación y temperatura que se presenta en el municipio, lo que indica que estas variables son las que limitan el crecimiento de especie.

Los vacíos de la información climática como la temperatura, pueden ser completados a través de modelos con base a los anillos de crecimiento del Urapán, como se evidencia en otros estudios, fortaleciendo los datos presentes y generando información para otros estudios en relación a las variables climáticas. Al examinar esta investigación con el de otras ciudades del país, se evidenció que los árboles de Urapán, no crecen en los mismos períodos, esto indica la variabilidad de la especie y que es sumamente cambiante a las condiciones ambientales en las que se desarrolle.

6. Recomendaciones

Se recomienda probar otros métodos para la obtención de las muestras para analizar, como la extracción de secciones transversales o discos, con el objetivo de mejorar la relación de los anillos de crecimiento entre el mismo árbol, sin embargo, este método genera la muerte del individuo y un mayor impacto ambiental.

Buscar y referenciar otros métodos para la obtención de la información climática, como la interpolación de bases climáticas cercanas, con el fin de disminuir el error de los resultados.

Complementar este estudio con la implementación de dendrómetros que incluyan la medición del crecimiento de los árboles durante todo el año.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez, C., Le Quesne, C., Rojas-Badilla, M., Rozas, V., & González-Reyes, Á. (2021). Dendrochronological potential of *Prumnopitys andina* (Podocarpaceae) at the southern limit of its range in the Chilean Andes. *New Zealand Journal of Botany*, 59(4), 423-439.
- Alvites, C., Battipaglia, G., Santopuoli, G., Hampel, H., Vázquez, R. F., Matteucci, G., & Tognetti, R. (2019). Dendrochronological analysis and growth patterns of *Polylepis reticulata* (Rosaceae) in the Ecuadorian Andes. *IAWA journal*, 40(2), 331-S5.
- Andreu-Hayles, L., Tejedor, E., D'arrigo, R., Locosselli, G. M., Rodríguez-Catón, M., Daux, V., ... & Rodríguez-Morata, C. (2023). Dendrochronological advances in the tropical and subtropical Americas: Research priorities and future directions. *Dendrochronologia*, 81, 126124.
- Aragão, J. R. V., Zuidema, P. A., & Groenendijk, P. (2022). Climate-growth relations of congeneric tree species vary across a tropical vegetation gradient in Brazil. *Dendrochronologia*, 71, 125913.
- Ayala-Torres, S.A., 2021. Plan de manejo del arbolado presente en el campus de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga. (Tesis de pregrado).
- Benjamín, J. A. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático.
- Beramendi-Orosco, L. E., Hernandez-Morales, S., Gonzalez-Hernandez, G., Constante-Garcia, V., & Villanueva-Diaz, J. (2013). Dendrochronological potential of *Fraxinus uhdei* and its use as bioindicator of fossil CO₂ emissions deduced from radiocarbon concentrations in tree rings. *Radiocarbon*, 55(2), 833-840.

- Bovi, R. C., Ortega_Rodriguez, D. R., Hornink, B., Olmedo, G. M., Assis-Pereira, G., Tomazello-Filho, M., ... & Ferreira, T. O. (2024). Tree rings of *Terminalia catappa* Linn. and climate variability in a tropical South American estuary. *Agricultural and Forest Meteorology*, 358, 110214.
- 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>
- Bunn, A.G., 2010, Statistical and visual crossdating in R using the dplR library: *Dendrochronologia* 28(4), 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.12.001>
- Buras, A. (2017). A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia*, 44, 130-132.
- Corzo-Arevalo, D. (2019). Diagnóstico Preliminar para la Organización del Plan de Desarrollo Turístico del Destino Santander, Colombia. *gestión turística*, (31), 7-47.
- Crispín-DelaCruz, D. B., Morales, M. S., Andreu-Hayles, L., Christie, D. A., Guerra, A., & Requena-Rojas, E. J. (2022). High ENSO sensitivity in tree rings from a northern population of *Polylepis tarapacana* in the Peruvian Andes. *Dendrochronologia*, 71, 125902.
- Díaz, J. V., Stahle, D. W., Therrell, M. D., & Cleaveland, M. K. (2022). La dendrocronología en México y sus aplicaciones paleoclimáticas y ecológicas. *Nota Importante de los editores*, 27.
- Diosa-Ospina, J.P., Giraldo, J.A., Franco-Gaviria, F., Vásquez, M., Orrego, S.A., 2024, Sensibilidad de los anillos de crecimiento de *Fraxinus uhdei* a la temperatura y precipitación en el área urbana de Medellín, Colombia: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 76 (3), A060524. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n3a060524>

- Feng, X., Zhu, H., Liang, E., Griesinger, J., Zhu, X., & Bräuning, A. (2024). Development of dendrochronology and its track in China since 1990 reflected by bibliometric analysis. *Dendrochronologia* (Verona), 85, 126202-. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126202>
- Fontana, C., López, L., Santos, G. M., Villalba, R., Hornink, B., Assis-Pereira, G., ... & Tomazello-Filho, M. (2024). A new chronology of *Cedrela fissilis* (Meliaceae) for Southern Brazil: Combining classical dendrochronology and radiocarbon dating. *Dendrochronologia*, 85, 126214.
- Gareca, E. E., Fernández, M., & Stanton, S. (2010). Dendrochronological investigation of the high Andean tree species *Polylepis besseri* and implications for management and conservation. *Biodiversity and Conservation*, 19(7), 1839-1851.
- Giraldo, J. A. (2011). Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales. *Colombia forestal*, 14(1), 97-111.
- Giraldo, J. A., del Valle, J. I., González-Caro, S., David, D. A., Taylor, T., Tobón, C., & Sierra, C. A. (2023). Tree growth periodicity in the ever-wet tropical forest of the Americas. *Journal of Ecology*, 111(4), 889-902.
- Giraldo, J. A., del Valle, J. I., Sierra, C. A., & Melo, O. (2020). Dendrochronological potential of trees from America's rainiest region. In *Latin American Dendroecology: Combining Tree-Ring Sciences and Ecology in a Megadiverse Territory* (pp. 79-119). Cham: Springer International Publishing.
- Giraldo, J. A., & del Valle, J. I. (2012). Modelación del crecimiento de *Albizia niopoides* (Mimosaceae) por métodos dendrocronológicos. *Revista de Biología Tropical*, 60(3), 1117-1136.

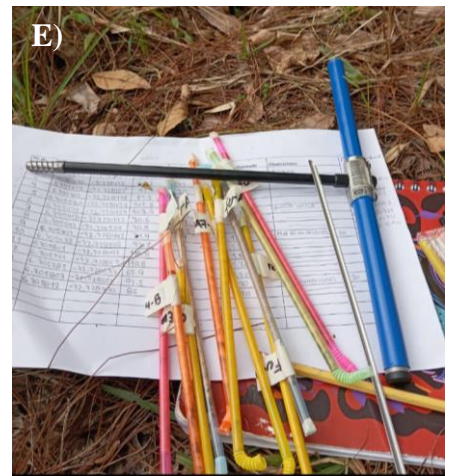
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., Lister, D., (2020), Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset: *Scientific Data*, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hosagrahar, J., Soule, J., Girard, L. F., & Potts, A. (2016). Cultural heritage, the UN sustainable development goals, and the new urban agenda. *BDC. Bollettino Del Centro Calza Bini*, 16(1), 37-54.
- López, L., Villalba, R., & Stahle, D. (2022). High-fidelity representation of climate variations by *Amburana cearensis* tree-ring chronologies across a tropical forest transition in South America. *Dendrochronologia*, 72, 125932.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (1999). Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical research letters*, 26(6), 759-762.
- Márquez-Carrero, G., Valero, S. W., León-Hernández, W. J., Gutiérrez-Gotero, I. J., & Maldonado-Rangel, J. C. (2022). Variabilidad de densidad en sentido radial y dentro de un anillo de crecimiento en *Pinus caribaea* var. hondurensis de 25 años de edad. *Revista Tecnología en Marcha*, 35(2), 115-124.
- Miranda-Avilés, R. M., Alquiza, M. J. P., & Reyes, J. J. M. (2009). Potencial del uso del Fresno (*Fraxinus udhei*) en estudios dendrocronológicos. *Conciencia Tecnológica*, (38), 24-29.
- Miyahara, A. A. L., Paixão, C. P., dos Santos, D. R., Pagin-Cláudio, F., da Silva, G. J., Bertoleti, I. A. F., ... & Locosselli, G. M. (2022). Urban dendrochronology toolkit for evidence-based decision-making on climate risk, cultural heritage, environmental pollution, and tree management—A systematic review. *Environmental Science & Policy*, 137, 152-163.

- Montes, C. S., Hernández, R. E., & Beaulieu, J. (2007). Radial variation in wood density and correlations with growth of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. *Wood and Fiber Science*, 377-387.
- Moreno, R., Nery, A., Zamora, R., Lora, Á., & Galán, C. (2024). Contribution of urban trees to carbon sequestration and reduction of air pollutants in Lima, Peru. *Ecosystem Services*, 67, 101618.
- Newman, J., Cherney, A., & Head, B. W. (2017). Policy capacity and evidence-based policy in the public service. *Public Management Review*, 19(2), 157-174.
- Parada, C. M., Polanco, C. A., & Tomazello, M. (2021). Dendrochronological study of *Brosimum utile* (kunth) oken from Timbiquí, Cauca, Colombia. *Floresta*, 51(4), 918-927.
- Pérez Evangelista, E. R., & Blanco Contreras, E. (2013). Influencia del manejo en el incremento radial de plantaciones de fresno (*Fraxinus uhdei*) en dos Bosques urbanos en la Comarca Lagunera.
- R Core Team, 2023, R: A Language and Environment for Statistical Computing, reference index: Viena, R Foundation for Statistical Computing.
- Reis-Avila, G., & Oliveira, J. M. (2017). Lauraceae: A promising family for the advance of neotropical dendrochronology. *Dendrochronologia*, 44, 103-116.
- Restrepo, Z., González-Caro, S., Hartley, I. P., Villegas, J. C., Meir, P., Sanchez, A., ... & Mercado, L. M. (2025). Heterogeneous thermal tolerance of dominant Andean montane tree species. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 117.
- Rodríguez-Morata, C., Pacheco-Solana, A., Ticse-Otarola, G., Espinoza, T. B., Crispín-DelaCruz, D. B., Santos, G. M., ... & Andreu-Hayles, L. (2022). Revealing *Polylepis microphylla* as

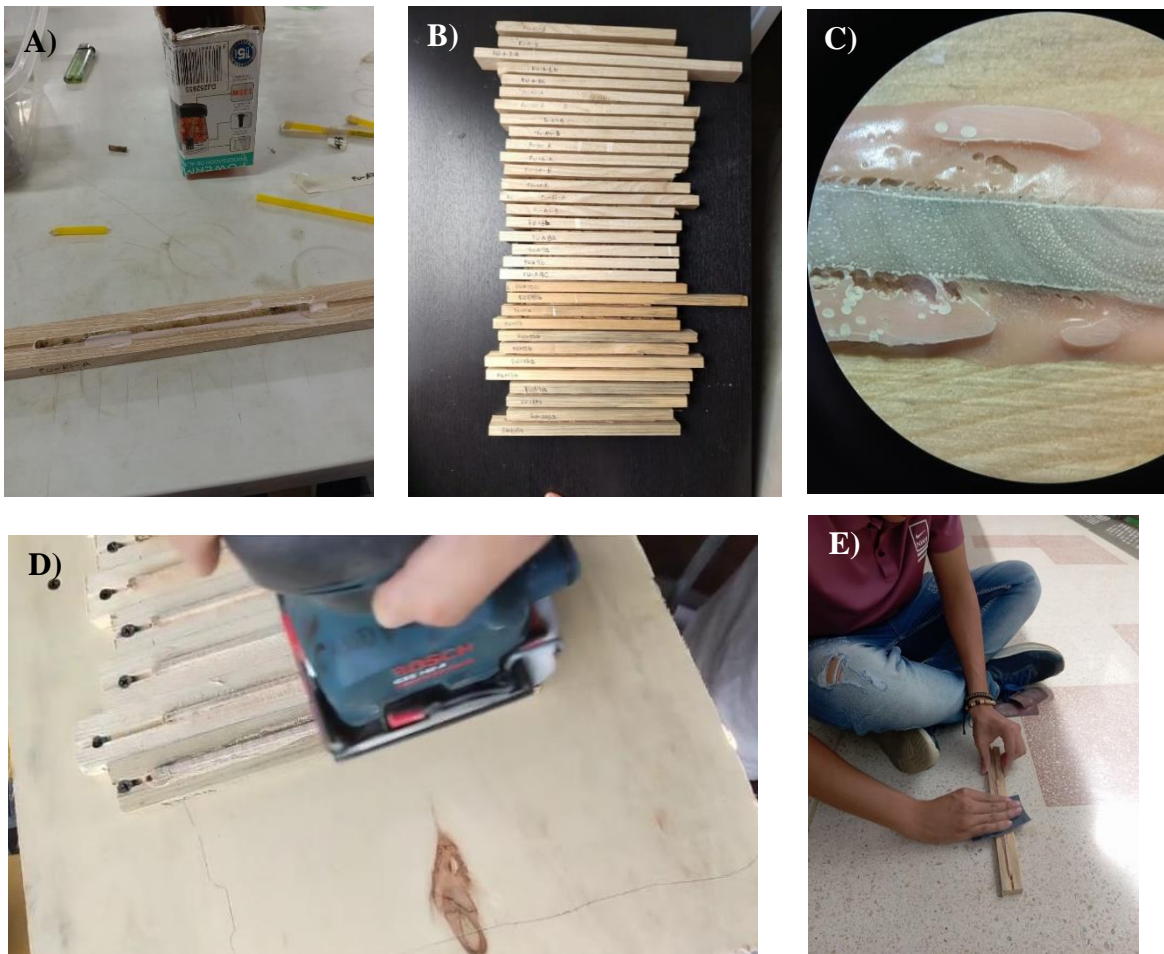
- a suitable tree species for dendrochronology and quantitative wood anatomy in the Andean montane forests. *Dendrochronologia*, 76, 125995.
- Rungwattana, K., & Hietz, P. (2018). Radial variation of wood functional traits reflect size-related adaptations of tree mechanics and hydraulics. *Functional Ecology*, 32(2), 260-272.
- Schweingruber, F.H., Börner, A., 2018, *The plant stem, a microscopic Aspect*: Cham, Springer
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-73524-5>
- Speer, J.H., 2010, *Fundamentals of tree ring research: USA*, University of Arizona Press, 368 p.
- UNGRD, U. (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes.
- Vásquez, M., Lara, W., del Valle, J. I., & Sierra, C. A. (2022). Reconstructing past fossil-fuel CO2 concentrations using tree rings and radiocarbon in the urban area of Medellín, Colombia. *Environmental Research Letters*, 17(5), 055008.
- Vázquez, D. A. (2024). Evaluación del impacto de la suspensión de actividades de mantenimiento en una reforestación de zona templada en el Estado de México (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO).
- Villanueva Díaz, J., Pérez Evangelista, E. R., Beramendi Orozco, L., & Cerano Paredes, J. (2015). Crecimiento radial anual del fresno (*Fraxinus udhei* (Wenz.) Lingelsh.) en dos parques de la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 40-57.
- 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>
- Zucchetti, A., Gonzales, P., Alcántara, T., Hartmann, N., Cánepa, M., & Gutierrez, C. (2020). Infraestructura verde y soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático: prácticas inspiradoras en ciudades de Perú, Chile y Argentina.

Apéndices

Apéndice A. Obtención de las muestras.

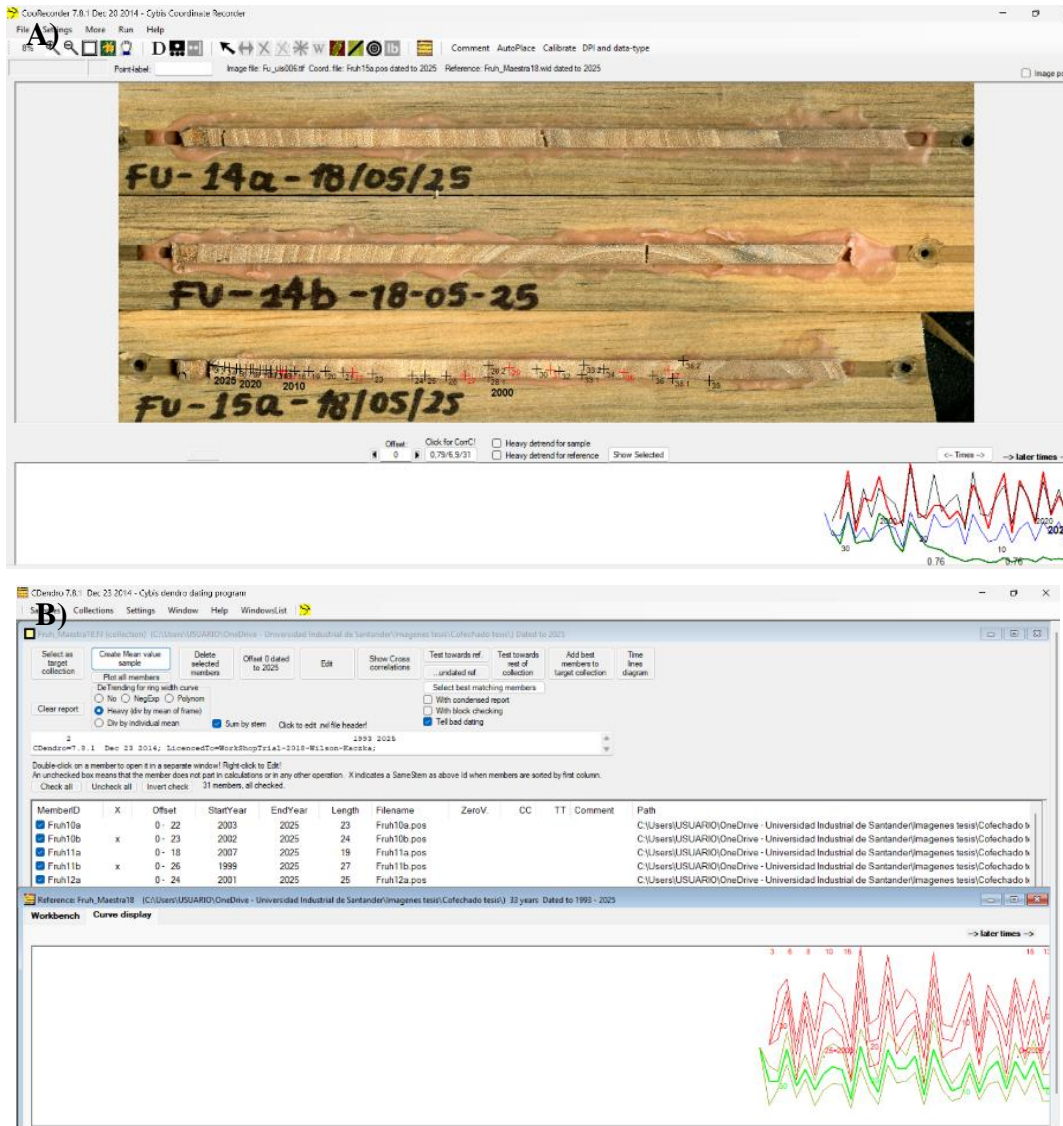


Nota. A, C y D: Muestran el proceso de barrenado. B: Núcleo de madera barrenado. E: Núcleos colectados.

Apéndice B. Fase de laboratorio.

Nota. A: Ilustra la fijación de las muestras en las placas de madera. B: Todas las muestras fijadas. C: Observación de los anillos de crecimiento en el estereoscopio. D y E: Lijado de las muestras, para resaltar los anillos de crecimiento.

Apéndice C. Obtención de la cronología y análisis de datos.



Nota. A: Marcaje de los anillos en el software Coorecorder. B: Generación de la cronología Maestra en software CDendro.