



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

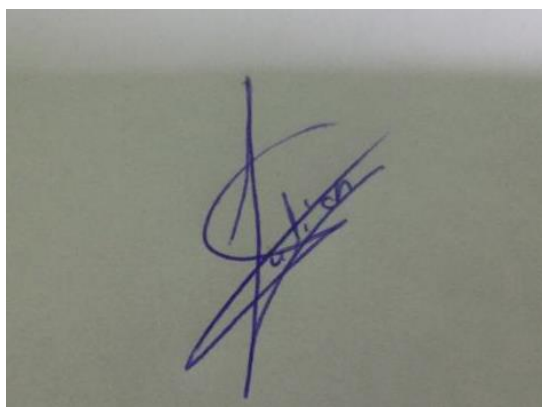
**EVALUACIÓN DE LA
VARIABILIDAD INTRA- E INTER-
INDIVIDUO EN EL CRECIMIENTO
SECUNDARIO DE ÁRBOLES DE
LAS ESPECIES FORESTALES
*ABIES PINSAPO Y PINUS
NIGRA***

Alumno: Julián Gallardo Ramírez

Julio, 2021

Trabajo Fin de Grado

EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTRA- E INTER- INDIVIDUO EN EL CRECIMIENTO SECUNDARIO DE ÁRBOLES DE LAS ESPECIES FORESTALES *ABIES PINSAPO* Y *PINUS NIGRA*



Alumno: Julián Gallardo Ramírez

Jaén, Julio, 2021

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	6
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	7
3.1. Objetos de estudio.....	7
3.2. Diseño de muestreo.....	8
3.3. Preparación de muestras.....	10
3.3.1. Lijado de muestras	10
3.3.2. Marcaje de series.....	10
3.3.3. Escaneado de las muestras.....	10
3.4. Metodología de medida.....	11
3.4.1. Datación y medida de anillos.....	11
3.4.2. Análisis estadístico.....	13
3.5 Análisis de transformación de series.....	13
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
5. CONCLUSIONES.....	34
6. REFERENCIAS.....	35

RESUMEN

Existen diferentes metodologías para evaluar los patrones de crecimiento de los árboles, y cómo dichos patrones se relacionan con variables del entorno. Entre estos métodos destaca el análisis cronológico de los anillos de crecimiento anuales, la dendrocronología. Estos anillos pueden desarrollar, por diversas causas, deformaciones que dificulten la datación, medición del grosor y posteriores cálculos de las tasas de crecimiento. Así, el objetivo principal de este trabajo ha sido analizar distintos métodos de transformación de datos que permitan obviar este efecto negativo de las deformaciones. Nuestros objetos de estudio han sido una serie de discos separados en tres rangos de tamaño procedentes de individuos de las especies *Abies pinsapo* y *Pinus nigra*. En cada uno de los discos se han trazado y analizado ocho series, tratando que al menos una de ellas pasase por una deformación, y se han aplicado varias transformaciones sobre los datos brutos (anchura de anillos). De todas las transformaciones aplicadas, la que mejor resultado ha dado ha sido la media arrastrada de paso diez, debido a que suaviza los máximos y los mínimos, asemejando la serie deformada al promedio. Esto permite su uso regular ya que se reconstruyen las series con las que se puede trabajar sin el efecto de las deformaciones.

Palabras clave: Dendrocronología, Crecimiento secundario, Datación.

ABSTRACT

Trees The patterns of growth of trees can be analyzed by means of different analytical methods, being the most powerful the chronological analysis of the annual rings of growth, known as dendrochronology. These rings can suffer geometric deformations that make the dating procedure, the measurement of width and the subsequent calculations of growth rates.

Our object of study has been a series of discs separated in three size ranges obtained from individuals of the species *Abies pinsapo* and *Pinus nigra*. From each disc, eight series have been traced and analyzed, drawing one of them through a deformation and applying different data transformations on raw data (ring width). The best results have been obtained from the ten-year running mean since it softens the maximums and minimums of the data series, reducing

the differences between the deformed series and the average series. This may allow for the regular use of this methodology, since the transformed series can be analyzed despite the presence of the deformations.

Keywords: Dendrochronology, Secondary growth, Dating, Data transformation.

1. INTRODUCCIÓN

La dendrocronología se podría definir como el estudio de la secuencia cronológica de los anillos de crecimiento anual de los árboles (Stokes & Smiley, 1996). Se encarga de examinar eventos del medio a través del tiempo debido a que los anillos de los árboles son un buen bioindicador ambiental. Esto es así porque el crecimiento secundario está muy atrás en la jerarquía de alocaación (de reparto) de carbonos en los procesos fisiológicos, y, por tanto, es muy sensible a condiciones bióticas y abióticas.

La dendrocronología presenta una gran utilidad en diferentes ámbitos, a través de distintas subdisciplinas, como la dendroarqueología que estudia por ejemplo la datación de postes y vigas de construcciones antiguas, la dendroclimatología en las que las muestras de los árboles pueden proporcionar registros a corto y largo plazo de la variabilidad climática pasada (temperatura, precipitaciones o sequías) durante la vida de los árboles, la dendroecología que estudia procesos ecológicos que han quedado grabados en los anillos como incendios, plagas de insectos o los procesos sucesionales en el establecimiento y muerte de árboles, la dendrogeomorfología que estudia mediante la estructura vertical de los árboles la pendiente del terreno, deslizamientos del terreno o actividades sísmicas, y la dendroquímica que realiza estudios a través de la absorción de diferentes químicos de la disponibilidad de nutrientes y de posibles contaminaciones (Speer, 2010).

Para que la dendrocronología se pueda utilizar en una especie esta debe cumplir con cuatro requisitos. Primero debe tener la capacidad de añadir un anillo por temporada de crecimiento, ya que especies que añaden más de un anillo por temporada de crecimiento no pueden usarse de forma confiable con propósitos de datación; dentro de la temporada de crecimiento hay varios factores que pueden alterar cómo el árbol crece pero debe existir un factor limitante que

determina los patrones de crecimiento. En el caso del Sur de España este factor limitante, salvo excepciones, suele ser la precipitación. El factor limitante debe ser variable de un año a otro, quedando reflejado esta variabilidad inter-anual en los anillos, creando de esta manera, secuencias reconocibles que hagan posible la datación y medida de la anchura de los anillos. Por último, el factor limitante ambiental debe ser efectivo sobre una gran extensión para que se pueda realizar la datación cruzada entre árboles en distintas localidades.

La datación cruzada es una técnica que permite asignar a cada anillo de un árbol su año exacto de formación. Esto se consigue cotejando los patrones de anillos anchos y estrechos entre los núcleos del mismo árbol y entre los árboles de diferentes lugares. (*Crossdating - The Basic Principle of Dendrochronology*, 2000)

La dendrocronología también tiene sus limitaciones para datar árboles demasiado jóvenes, casos en los que no haya datos locales y la variabilidad climática local no coincida con la regional y la falta de formación de anillos debido a las deformaciones climáticas y morfológicas. Para este último se podrían utilizar métodos en los que se podrían paliar esa falta de información.

Si se emplean cortes transversales siempre podemos elegir la serie más adecuada pero existe el inconveniente de que el individuo se elimina, por lo que normalmente se sacan cores, procedimiento que es mucho menos invasivo, pero que no permite saber si hay alguna deformación que nos impida una medición efectiva hasta que no se ha obtenido la muestra.



Figura 1. Ilustración de una extracción de cores con barrena de Pressler. (*Dendrochronology & Culturally Modified Tree Talk & Tour*, 2012).

2. Justificación y Objetivos

A la hora de realizar la datación y analizar el ancho de los anillos pueden surgir dificultades en la medición, derivadas de deformidades que pueden estar producidas por varios agentes distintos, que suponen pérdidas en los anillos o alteraciones en la anchura del anillo. Estas deformaciones no son algo que se aplica al total de la masa forestal, como sería un año seco, sino un daño localizado en un individuo, que nos impide conocer las tendencias generales de crecimiento. Estas pueden ser deformidades locales propias del crecimiento, provocadas por insectos, incendios, la cobertura de ramas secundarias o grietas.

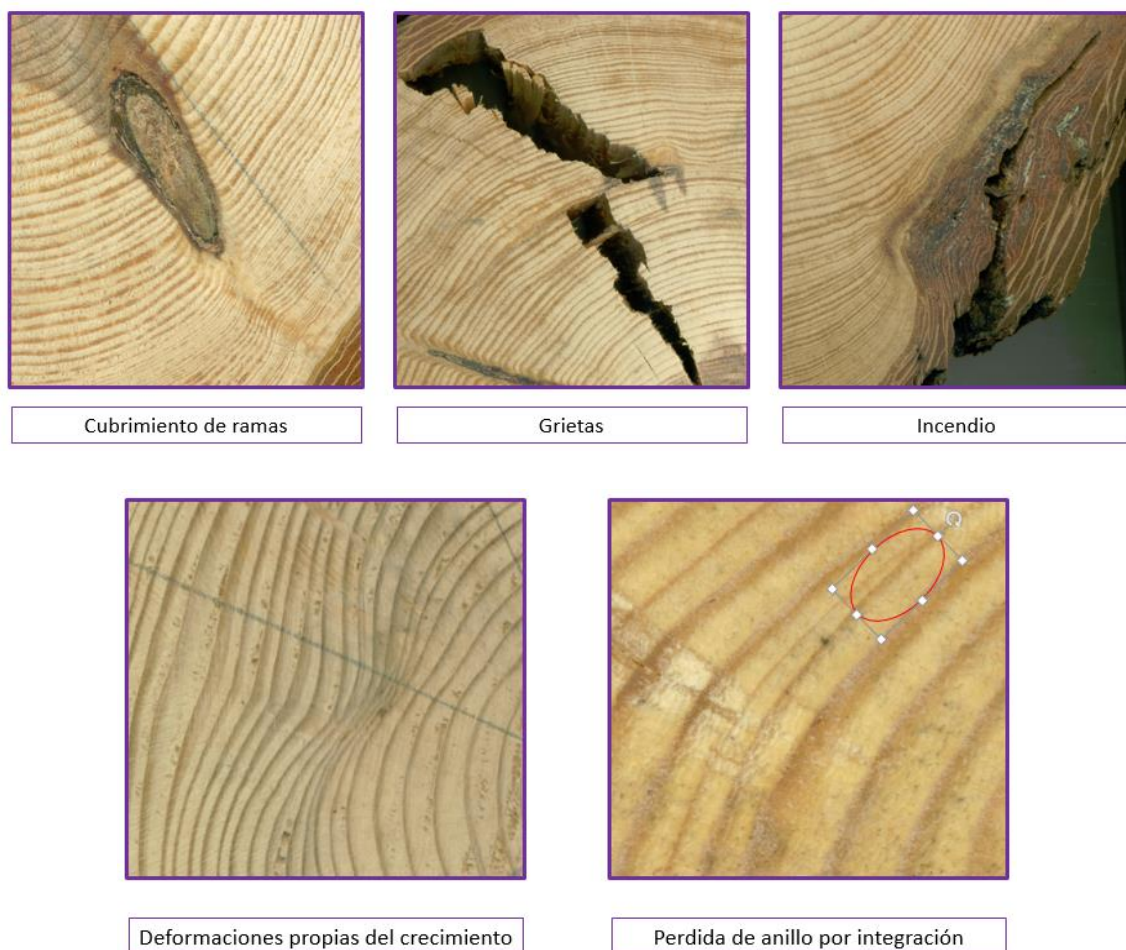


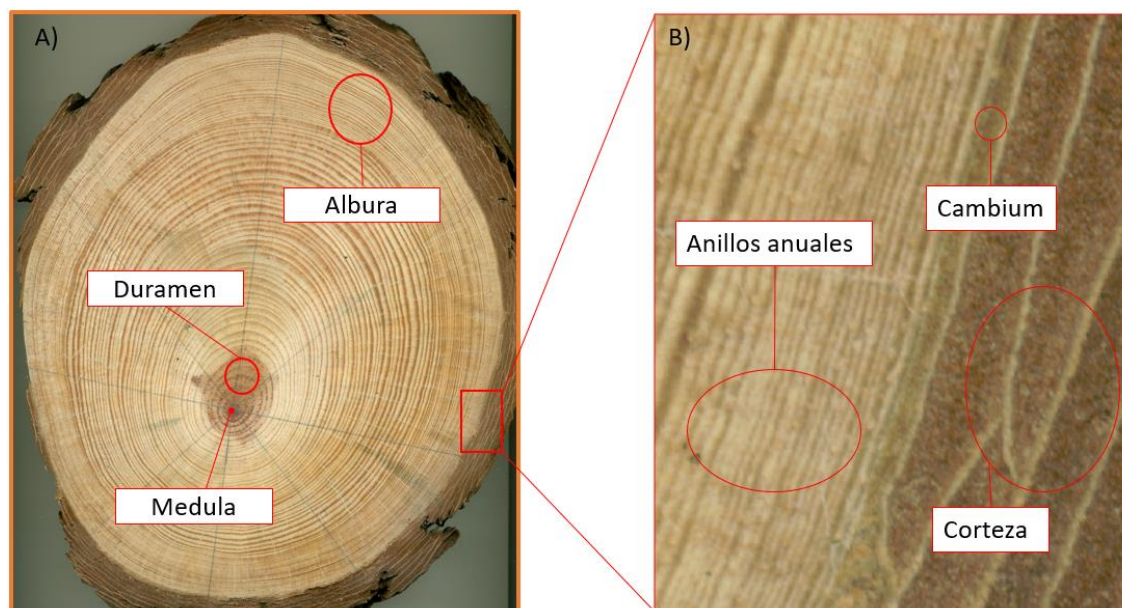
Figura 2. Imágenes de deformaciones que pueden implicar la pérdida o la alteración de los anillos.

Por estas razones, cuando analizamos un core pueden existir pérdidas graves de información. Es necesario, para entender de una manera adecuada el efecto de variables ambientales, como el clima, sobre el crecimiento de los árboles, conseguir minimizar, o incluso eliminar, la alteración que las deformaciones introducen en la medida de crecimiento de los individuos. Así, el objetivo de este trabajo ha sido encontrar una transformación de los datos que minimice el efecto de las deformaciones de las muestras analizadas, de tal forma que puedan medirse de forma adecuada las tasas de crecimiento, independientemente del tipo de muestra, tanto discos como cores, y se encuentren patrones generales de crecimiento, no alterados por deformaciones locales.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Objetos de estudio

Se han considerado como objetos de estudio individuos de las especies *Abies pinsapo* (localizados en el Parque Natural de la Sierra de las Nieves) y *Pinus nigra* (localizados en el Parque Natural de la Sierra de Cazorla) de los cuales disponemos de cortes tangenciales, que son producto de tareas de gestión forestal, realizados en el año 2004 y 2010 respectivamente. La madera del árbol vivo se caracteriza por presentar dos zonas definidas fisiológicamente y en muchos casos a nivel macroscópico, la son albura y el duramen. La albura es la parte activa del xilema, que en el árbol vivo, contiene células vivas y material de reserva (IAWA, 1964). El duramen es leño biológicamente inactivo, con funciones de sostén, que ocupa la porción del tronco entre la médula y la albura, generalmente es de estructura más compacta y de coloración más oscura que la albura (IAWA, 1964). (Figura 3). En las dos especies analizadas el duramen es prácticamente inexistente, aunque con una presencia ligeramente mayor en los individuos de *P.nigra*.



Figuras 3. A. Corte tangencial completo de un individuo de *Pinus nigra*. B. Ampliación que muestra los anillos anuales, el cambium que es la capa intermedia entre los anillos más nuevos y la corteza.

Hay una serie de diferencias entre trabajar con cortes y trabajar con cores. La mayor diferencia se encuentra en que trabajando con cores se dispone de una sección del tronco más limitada con la que trabajar, eso implica que puede haber alguna imperfección que invalide la medición, mientras que con los cortes siempre puedes elegir el segmento con menos imperfecciones.

3.2. Diseño de muestreo

De todos los discos disponibles en el laboratorio del grupo de investigación RNM296, “Ecología Forestal y Dinámica del Paisaje”, de la Universidad de Jaén, se seleccionó un disco de gran tamaño, otro de tamaño intermedio y, finalmente, uno de menor tamaño, de las dos especies objeto de estudio, considerando los siguientes rangos de tamaño en el caso de los cortes de *P. nigra* se consideraron pequeños los discos menores de 25 cm de diámetro, medianos los discos mayores de 25 cm pero menores de 35 cm de diámetro, y grandes los discos con un diámetro superior a 35 cm. Mientras que para los cortes de *A. pinsapo*, se consideraron discos pequeños aquellos con un diámetro menor de 20

cm, medianos los discos mayores de 20 cm pero menores de 30 cm de diámetro, y grandes los discos con un diámetro mayor de 30 cm. En todos los casos se seleccionaron discos que mostraran una deformación local en alguna zona, claramente distinguible del mismo periodo, sin deformaciones, en otras zonas del mismo individuo. Así, se pueden obtener series deformadas y no deformadas del mismo individuo, con las que realizar las transformaciones que anulen o suavicen las transformaciones y puedan ser comparadas con zonas no alteradas del mismo individuo.

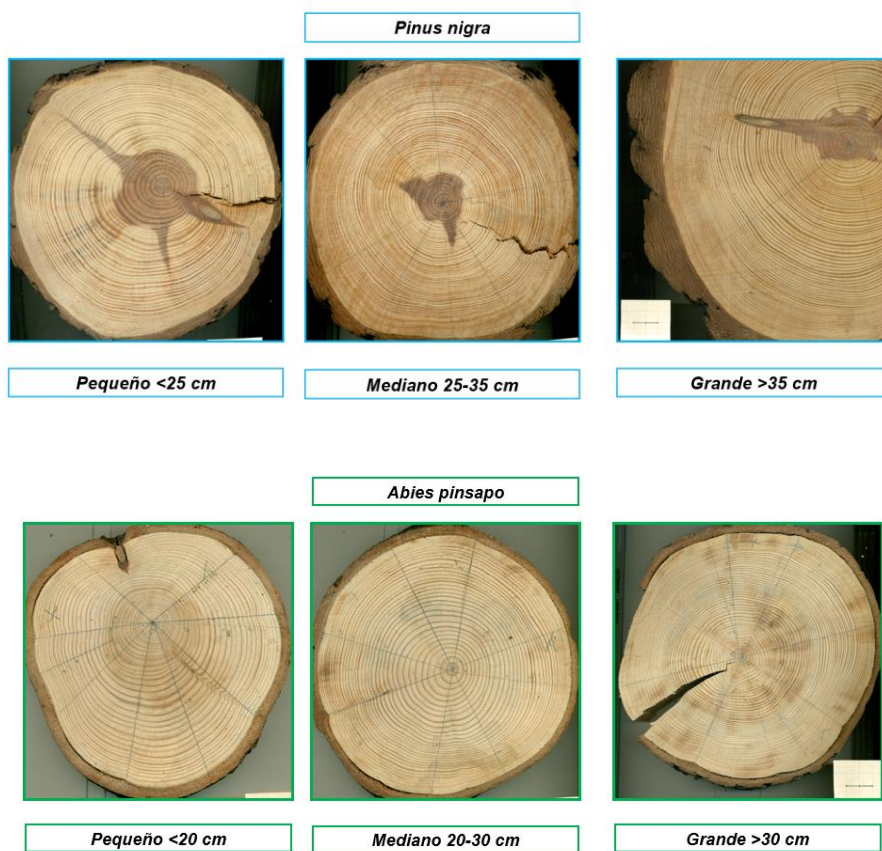


Figura 4. Rango de tamaño en los cortes transversales de *P.nigra* y *A.pinsapo* sacadas del escaneado de las muestras.

3.3. Preparación de muestras

3.3.1. Lijado de las muestras

Para facilitar la observación de los anillos de crecimiento, siguiendo un procedimiento estandarizado en dendrocronología, antes de la medida de los anillos se procedió a lijar los discos con una lijadora eléctrica con distintos papeles de lija de grados diferentes, entre 60 y 120 μm . Esto permitió también suavizar ciertas hendiduras e irregularidades realizadas por la sierra en el momento de la corta de los árboles.



Figura 5. Corte de *Pinus nigra* antes de someterse al lijado.

3.3.2. Marcaje de las series

Se realizó una observación de los cortes y en cada uno de los discos se trazó un radio que pasara por una deformación y siete radios más que no pasara por zonas deformadas, intentando mantener un ángulo de 45° entre dos radios consecutivos. En estos radios es donde a continuación se realizó la datación y medida de anchura de los anillos.

3.3.3. Escaneado de las muestras

Una vez lijados los cortes y efectuado el marcado de las series que se iban a datar se procedió con el escaneado de los mismos, mediante un escáner de alta resolución. Las imágenes se obtuvieron con una

resolución de 1200 ppp y se guardaron en formato TIF con la intención de que no se perdiera ningún anillo por falta de nitidez.



Figura 6. Imagen escaneada del corte a 1200 ppp y posterior aumento de 100x sin perder nitidez.

3.4. Metodología de medida

3.4.1. Datación y medida de anillos

La datación y medida se ha realizado empleando el programa ImageJ de software libre, el cual nos ha permitido contabilizar al mismo tiempo cuántos anillos tiene cada serie y el grosor de cada anillo.

Para realizar la medida, con una imagen de referencia de tamaño conocido (papel milimetrado), se configuró la escala de medición en el programa de análisis de imagen (píxeles a mm). A continuación, se procedió a la datación de los anillos, conociendo la fecha del último anillo generado (2004 para *Abies pinsapo* y 2010 para *Pinus nigra*), y asignando fechas consecutivas a cada uno de los anillos encontrados. Finalmente, en el programa de análisis de imagen se midió la longitud (en mm) de cada uno de los anillos datados, en direcciones perpendiculares a la médula, en cada uno de los radios previamente definidos, obteniéndose series de datos de anchura de anillos (mm) vs fecha (año).

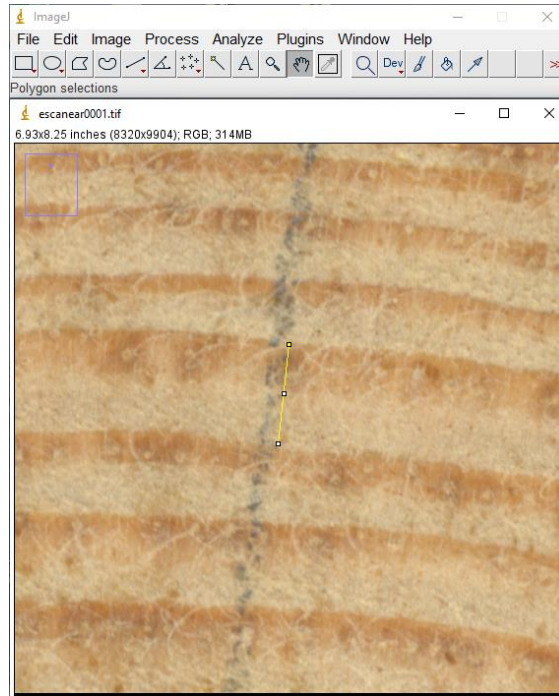


Figura 7. Uso de la herramienta línea para realizar la medida de anchura de los anillos en el programa de análisis de imagen ImageJ. Obsérvense como la línea trazada alcanza desde el inicio de la madera temprana, o de primavera (de color amarillo claro) de un año, hasta el final de la madera tardía, o de otoño (color marron oscuro) del mismo año, endirección perpendicular al borde del anillo.

Por último, a partir de la medida de anchura de los anillos se calculó el incremento de área basal (IAB) se considera que es una variable que constituye un indicador más fiable para estudiar la tendencia de crecimiento de los árboles, puesto que elimina el efecto de reducción que se produce de forma natural en los árboles al aumentar de tamaño y envejecer, produciendo anillos cada vez más estrechos para mantener el mismo volumen de biomasa anual (Biondi & Qaenda, 2008).

En este trabajo se ha calculado IAB como:

$$IAB_{t+1} = AB_{t+1} - AB_t = [\pi(LC_t + AA_{t+1})^2] - [\pi(LC_t)^2]$$

donde IAB_{t+1} es el incremento de área basal entre el año t y el año $t+1$, AB_{t+1} es el área basal del árbol en el año $t+1$, AB_t es el área basal del árbol en el año t , LC_t es la longitud del radio medido hasta el año t (o del core de madera, en su caso), y AA_{t+1} es la anchura del anillo en el año $t+1$.

3.4.2. Análisis estadístico

Inicialmente se consideraron 30 cortes, 15 de cada especie y separadas en 3 rangos de tamaño. En cada disco se analizaron 8 radios, incluyendo en uno de los radios siempre una zona deformada, mientras que los demás radios no presentaban dichas deformaciones. Teniendo en cuenta el elevado número de muestras a analizar, y observando que los resultados eran consistentes, al final se decidió por elegir solo un disco por tamaño y especie.



Figura 8. La línea sobre la que se va a medir nuestra serie pasando por una deformación.

En el análisis se han realizado varias fases, la primera se trata de una serie de transformaciones sobre un corte de cada rango de tamaño sobre cada especie con el fin de determinar qué transformación puede darnos mejor resultado. Una vez se ha determinado cuál transformación ha dado mejor resultado se aplica dicha transformación al resto de cortes.

3.5. Análisis de transformación de series

Sobre los datos brutos de anchura de anillos (mm) se han aplicado una serie de transformaciones con el fin de determinar si podían eliminar el efecto de las deformaciones. La primera transformación fue **porcentual**, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$X_{\%} = \left(\frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \right) * 100$$

donde se calcula la contribución relativa de la medida de cada anillo al tamaño total del disco.

La segunda transformación aplicada fue la **normalización Z**, la cual cambia la escala de los datos, normalizado por el promedio de la serie y expresando los valores en unidades de desviación estándar, mediante la siguiente ecuación:

$$Z_i = Z_i = \frac{X_i - \underline{X}}{\sigma}$$

donde Z_i es el valor normalizado de cada anillo, X_i es el valor de la anchura (mm) de cada uno de los anillos del radio considerado, $\underline{X}$ es el valor de la anchura promedio de todos los anillos de radio y σ la desviación estándar de la medida de anchura de los anillos.

Este índice da valores positivos si la anchura de un anillo está por encima de la media, o valores negativos si es inferior a la media, asignando, por tanto, a la media el valor 0.

La siguiente transformación, **media arrastrada de paso 5**, se calculó como el valor promedio de la anchura de 5 anillos consecutivos, y se va calculando de forma arrastrada, desplazando la ventana de 5 anillos año a año, desde el anillo exterior hasta la médula, utilizando esta ecuación:

$$\underline{X}_5 = \frac{(X_i + X_{i+1} + X_{i+2} + X_{i+3} + X_{i+4})}{5}$$

donde $\underline{X}_5$ es el valor de la media de la anchura de 5 anillos consecutivos, X_i el valor de anchura del anillo (mm) del año i , X_{i+1} , el valor de anchura del anillo (mm) del año $i+1$, etc.

La **media arrastrada de paso 10** es una transformación análoga a la anterior, incorporando en este caso, en el promedio el valor de anchura de anillos de 10 años consecutivos.

$$\underline{X}_{10} = \frac{(X_i + X_{i+1} + \dots + X_{i+10})}{10}$$

donde $\underline{X}_{10}$ es el valor de la media de la anchura de 10 anillos consecutivos, X_i el valor de anchura del anillo (mm) del año i , X_{i+1} , el valor de anchura del anillo (mm) del año $i+1$, etc.

En el caso de **Normalización a la unidad**, a cada valor se le resta el menor valor de la serie, y el valor resultante se normaliza por el rango de variación de la serie (valor máximo – valor mínimo).

$$X_1 = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$$

donde X_1 es el valor normalizado para cada anillo, X_i es el valor de anchura (mm) de cada anillo, $X_{\min}$ y $X_{\max}$ son el valor mínimo y máximo de anchura de anillo (mm) medido en el radio, respectivamente.

De modo análogo a la Normalización Z, esta transformación restringe el rango de variación a valores comprendidos entre 0 y 1.

En la transformación **Residual (X-Media global)** se expresa el valor del error (residuales) como la diferencia entre el valor de anchura de cada anillo y el promedio de todos los anillos de un radio.

$$X_{resdif} = X_i - \underline{X}$$

donde X_{resdif} es el valor de la diferencia entre la anchura de cada anillo (mm) y la anchura promedio (mm) de la serie, X_i es la anchura (mm) del anillo del año i , y $\underline{X}$ es la anchura promedio (mm) de todos los anillos de radio considerados.

Finalmente, la última transformación **Residual(X/Media global)**, que normaliza la anchura de cada anillo con respecto a la anchura promedio del radio.

$$X_{rescoc} = \frac{X_i}{\underline{X}}$$

donde X_{rescoc} es el valor del cociente entre la anchura de cada anillo (mm) y la anchura promedio (mm) de la serie, X_i es la anchura (mm) del anillo del año i , y $\underline{X}$ es la anchura promedio (mm) de todos los anillos de radio considerados.

Una vez aplicadas las transformaciones a los datos, se procedió a realizar un **análisis de correlación y regresión** con el objetivo de evaluar en qué medida las distintas transformaciones suavizan y “enmascaran” las deformaciones. En primer lugar, se ha realizado un análisis de correlación entre la serie que presenta la deformación y tanto el resto de series del mismo disco como la serie promedio calculada a partir de este resto de series no deformadas. Este procedimiento se ha repetido para los datos sin transformar y después de realizar cada una de las transformaciones, de forma que se espera que el coeficiente de correlación aumente como consecuencia de las distintas transformaciones.

De igual modo, se ha realizado un análisis de regresión entre las series deformada y el resto de series o su promedio, antes y después de la transformación, para evaluar, mediante el coeficiente de determinación, cuál es la transformación más adecuada, y obtener una función causal que permita recalcular las series deformadas a partir de dichas regresiones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 9 se muestra el IAB Calculando a partir de datos de anchura de anillos de una serie deformada de ambas especies (Figura 9a, *P.nigra*; Figura 9b, *A.pinsapo*), como puede observarse, las deformaciones interfieren en el cálculo de la tendencia de crecimiento, este efecto es muy patente en el caso del *P.nigra* mediano, ya que las deformaciones hacen que parezca haber tenido una menor tendencia de crecimiento que el disco pequeño *P.nigra* durante el periodo entre 1966 y 1976. Este mismo efecto puede observarse en los discos de *A.pinsapo* grande y mediano entre 1994 y 1996, coincidiendo con la intensa sequía de 1995.

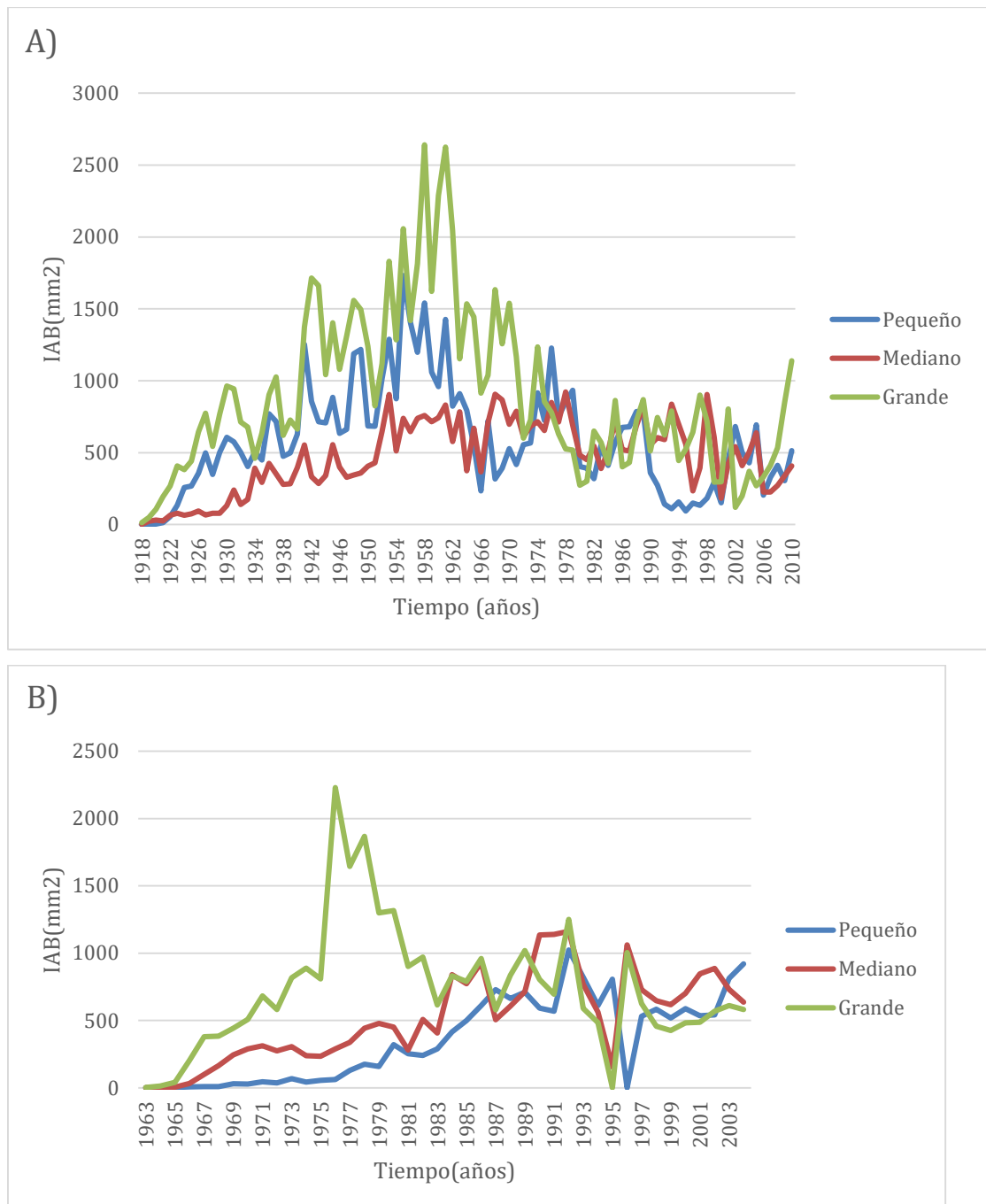
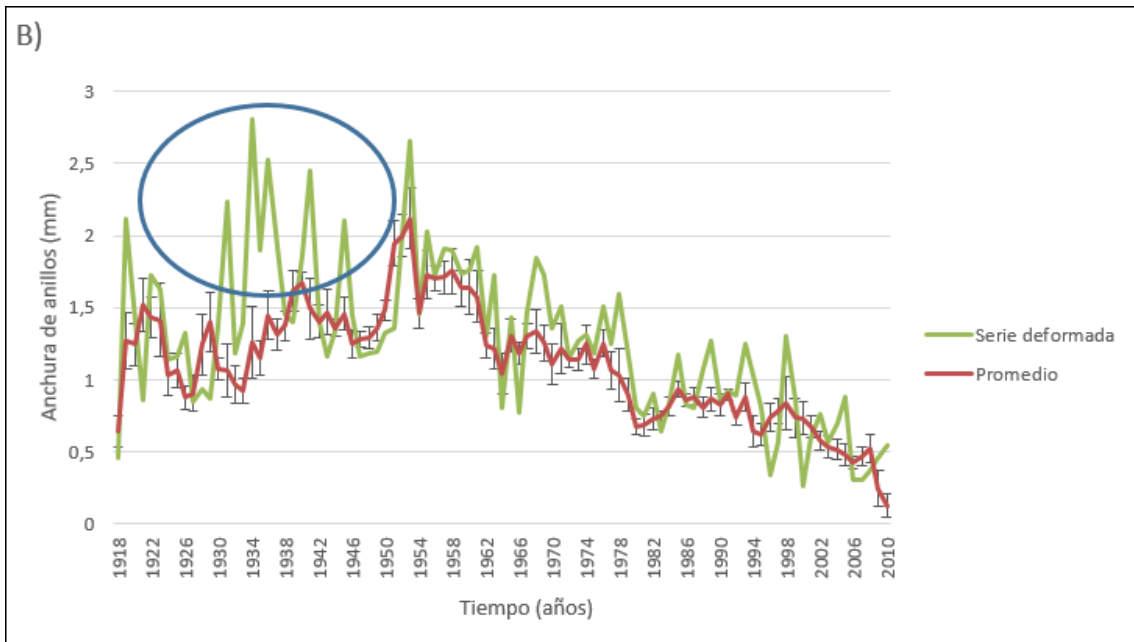
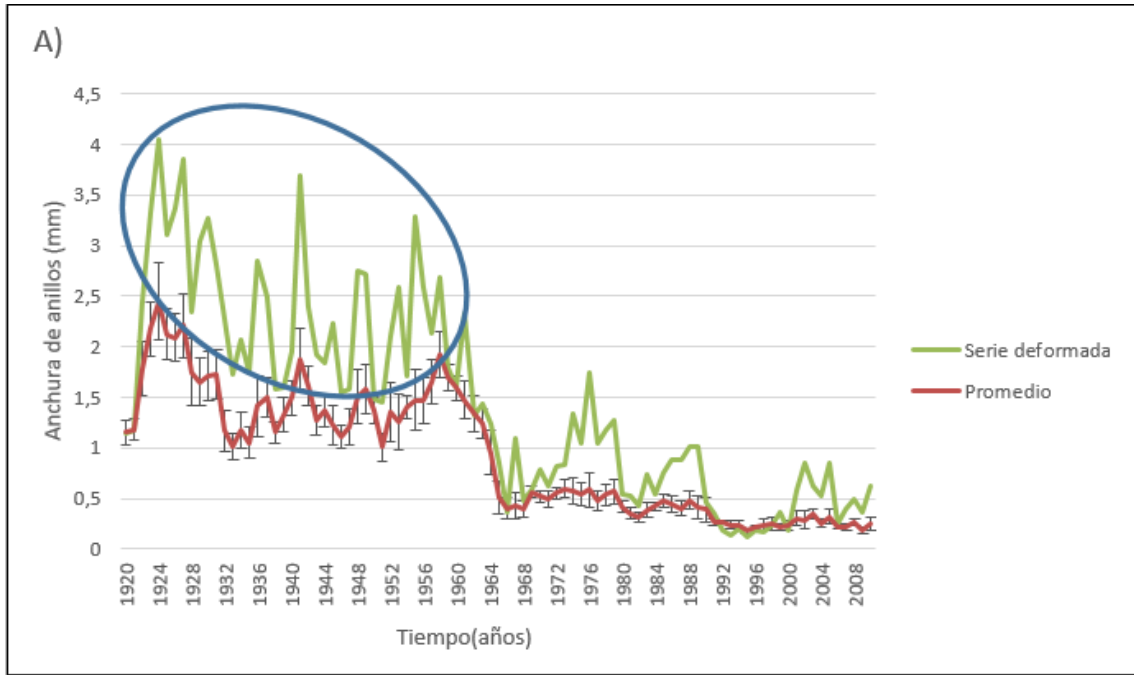


Figura 9. Evolución del IAB en series deformadas de distintos tamaños de A) *P. nigra* y B) *A. pinsapo*.

Después se compararon las series deformadas respecto al promedio de todas las series, localizando las zonas en las que las series deformadas se encuentran fuera del promedio.



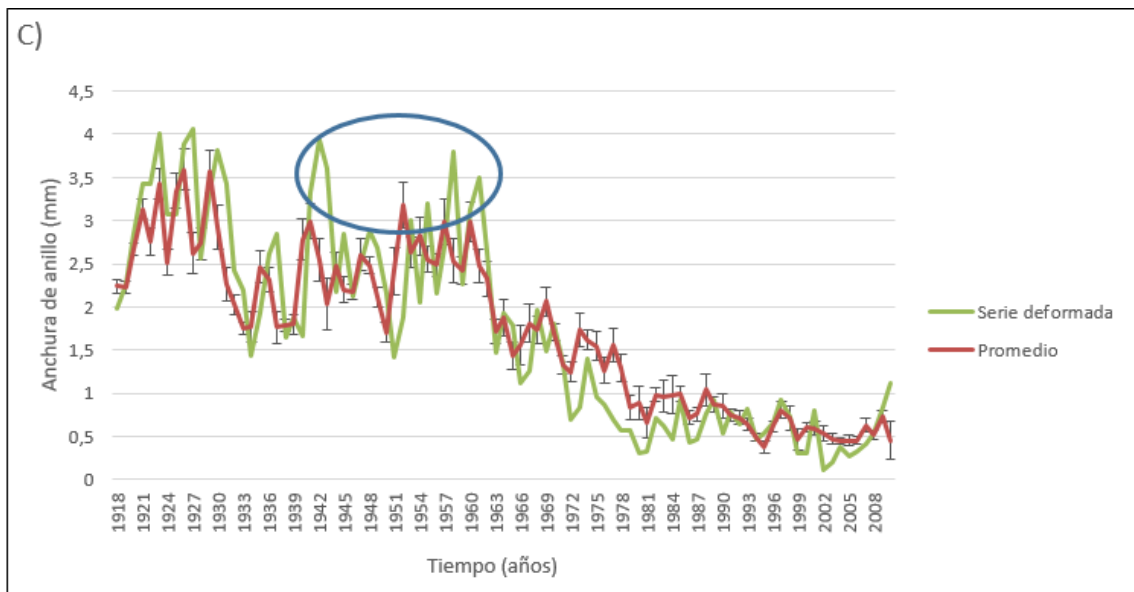
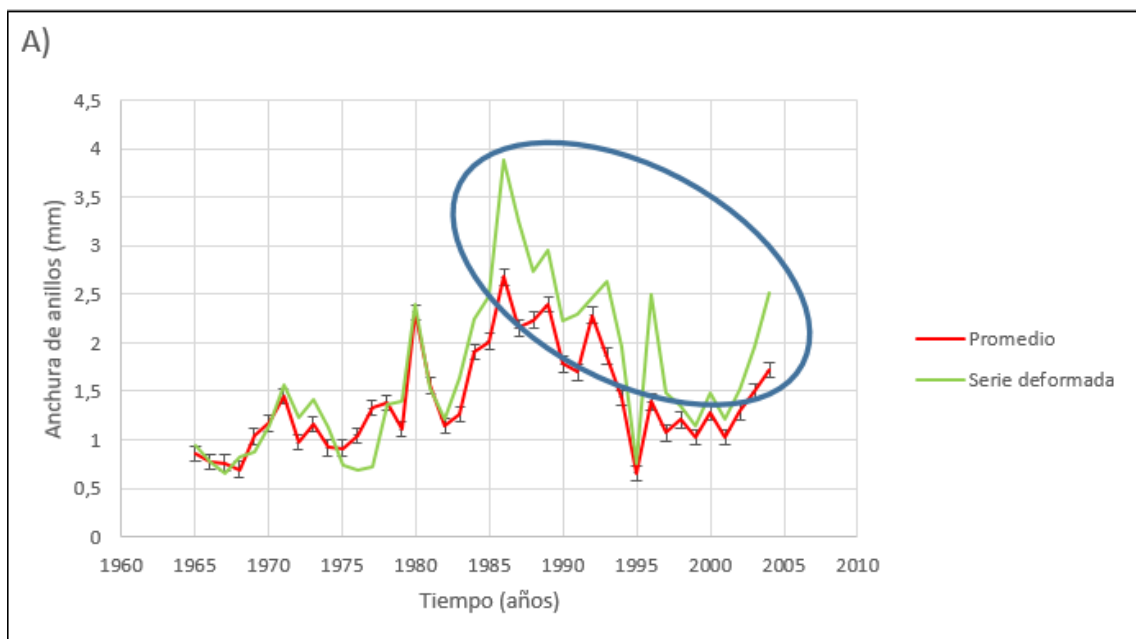


Figura 10. Evolución temporal comparada de la anchura de anillos (mm) en la serie deformada y el promedio del resto de series medidas en un mismo disco de *P.nigra* de tamaño A) pequeño, B) mediano y C) grande.



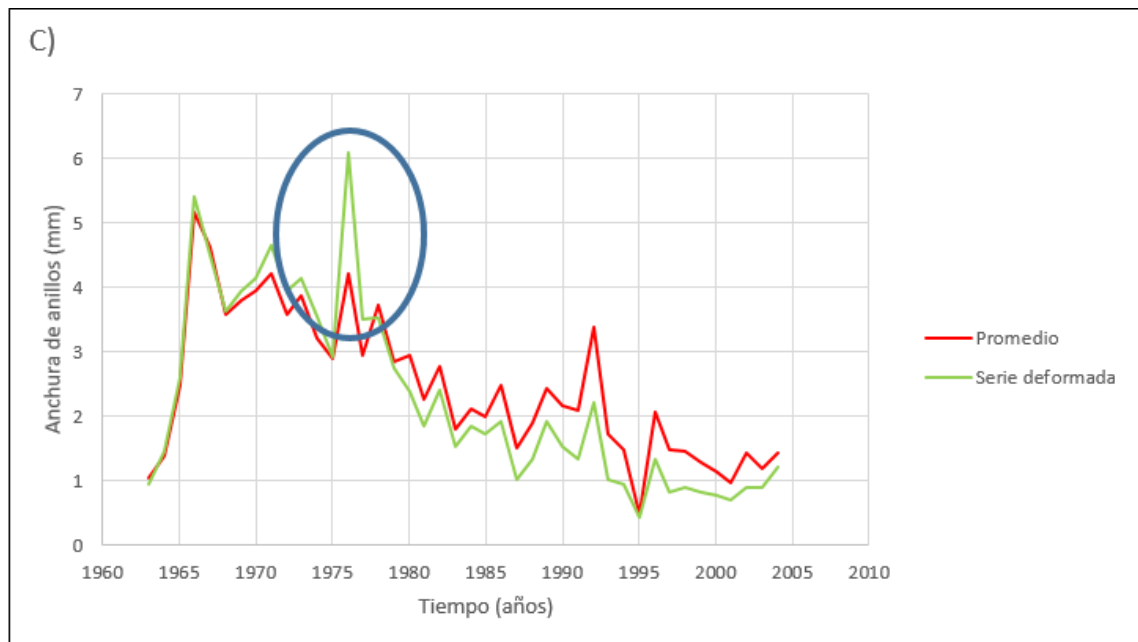
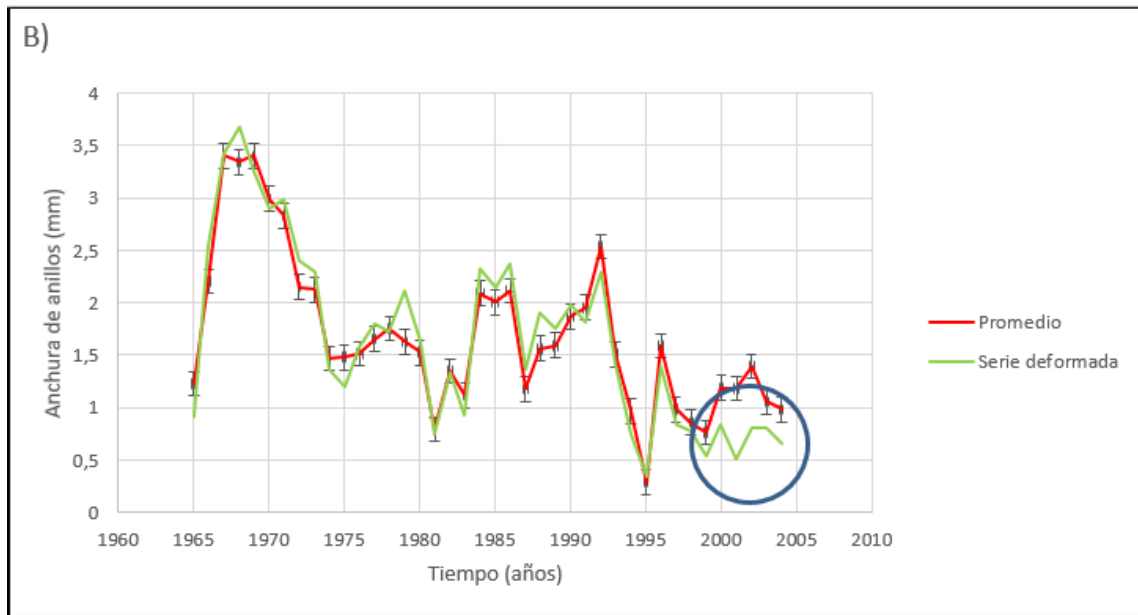


Figura 11. Variación a lo largo del tiempo de la anchura de anillos (mm) en la serie deformada y el promedio del resto de series medidas en un mismo disco de *A.pinsapo* de tamaño A) pequeño, B) mediano y C) grande.

Como se puede observar, las zonas en las que hay deformaciones varían su intensidad según el individuo, pero es cierto que en los *Abies pinsapo* tienen menos deformaciones que los *Pinus nigra*. Además se han comparado visualmente las deformaciones que se muestran en las anteriores figuras con la forma de los anillos en los anillos y estas corresponden a las deformaciones físicas en el corte.

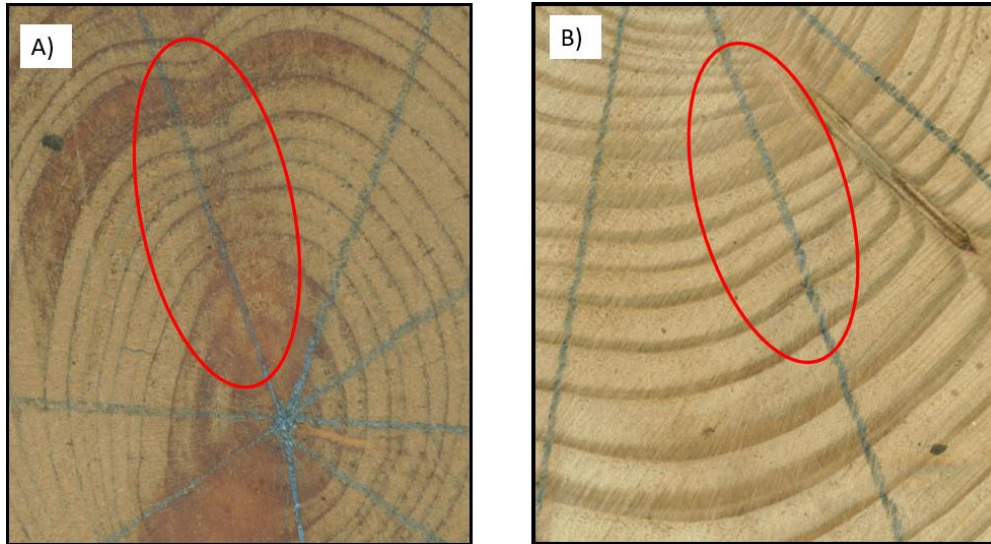


Figura 12. Representación de una serie deformada de un disco mediano de *P.nigra* y pequeño de *A.pinsapo*.

El criterio para decidir cuál de las transformaciones es la que mejor elimina el efecto de la deformación, ha sido un mayor valor del coeficiente de correlación de dicha serie deformada y transformada con la serie promedio del disco, así como un mayor valor del coeficiente de determinación de la regresión de la serie deformada y transformada con i, el resto de series del disco y ii, con el promedio de dichas series no deformadas, separando estas comprobaciones en especies y en tamaño (Tablas 1 a 6).

Tabla 1. Valores de correlación y de determinación, y pendiente del ajuste lineal, de las diferentes transformaciones en un disco pequeño de *P.nigra*. Las transformaciones están ordenadas en función del valor del coeficiente de correlación o de determinación, de mayor a menor valor de dicho coeficiente. Se incluye, asimismo, la serie sin transformar “Anchura anillos (mm)”.

***Pinus nigra*, pequeño**

Transformaciones	Coeficiente de correlación de la serie 1 vs promedio	Regresión de la serie 1 vs el resto	R ²	Pendiente	Regresión de la serie 1 vs promedio	R ²	Pendiente
Media arrastrada de paso 10	0,964606	Media arrastrada de paso 10	0,6996	0,5907	Media arrastrada de paso 10	0,9305	0,8013
Media arrastrada de paso 5	0,953137	Media arrastrada de paso 5	0,677	0,5724	Media arrastrada de paso 5	0,9085	0,7833
Normalización a la unidad	0,906398	Normalización Z	0,5998	0,7745	x/media global	0,8225	1,0741
Normalización Z	0,905361	x/media global	0,5978	0,8163	Normalización a la unidad	0,8216	1,0773
Porcentaje	0,894157	Porcentaje	0,5978	0,8163	Normalización Z	0,8197	1,0212
Residuales (x-media global)	0,894157	Normalización a la unidad	0,5897	0,8093	Residuales (x-media global)	0,7995	0,7775
Anchura anillos (mm)	0,894157	Residuales (x-media global)	0,5723	0,5543	Anchura anillos (mm)	0,7995	0,7775
x/media global	0,776406	Anchura anillos (mm)	0,4437	0,0462	Porcentaje	0,7995	0,8409

Tabla 2. Valores de correlación y de determinación, y pendiente del ajuste lineal, de las diferentes transformaciones en un disco mediano de *P.nigra*. Las transformaciones están ordenadas en función del valor del coeficiente de correlación o de determinación, de mayor a menor valor de dicho coeficiente. Se incluye, asimismo, la serie sin transformar “Anchura anillos (mm)”.

***Pinus nigra*, mediano**

Transformaciones	Coeficiente de correlación de la serie 1 vs promedio	Regresión de la serie 1 vs el resto	R ²	Pendiente	Regresión de la serie 1 vs promedio	R ²	Pendiente
Media arrastrada de paso 10	0,91639	Media arrastrada de paso 10	0,5699	0,7494	Media arrastrada de paso 10	0,8398	1,0624
Media arrastrada de paso 5	0,882615	Media arrastrada de paso 5	0,5139	0,7327	Media arrastrada de paso 5	0,779	1,0545
Residuales (x-media global)	0,752613	Residuales (x-media global)	0,2889	0,5972	Residuales (x-media global)	0,5664	1,0331
Anchura anillos (mm)	0,752613	Normalización Z	0,2868	0,5356	Anchura anillos (mm)	0,5664	1,0331
Porcentaje	0,752613	x/media global	0,2864	0,5098	Porcentaje	0,5664	1,0685
Normalización a la unidad	0,745578	Porcentaje	0,2864	0,5098	Normalización a la unidad	0,5559	1,0123
Normalización Z	0,737733	Normalización a la unidad	0,2801	0,5778	Normalización Z	0,5443	0,9169
x/media global	0,735212	Anchura anillos (mm)	0,2718	0,5619	x/media global	0,5405	0,8766

Tabla 3. Valores de correlación y de determinación, y pendiente del ajuste lineal, de las diferentes transformaciones en un disco grande de *P. nigra*. Las transformaciones están ordenadas en función del valor del coeficiente de correlación o de determinación, de mayor a menor valor de dicho coeficiente. Se incluye, asimismo, la serie sin transformar “Anchura anillos (mm)”.

***Pinus nigra*, grande**

Transformaciones	Coeficiente de correlación de la serie 1 vs promedio	Regresión de la serie 1 vs el resto	R ²	Pendiente	Regresión de la serie 1 vs promedio	R ²	Pendiente
Media arrastrada de paso 10	0,978102	Media arrastrada de paso 10	0,8716	1,1519	Media arrastrada de paso 10	0,9567	1,2155
Media arrastrada de paso 5	0,968757	Media arrastrada de paso 5	0,8226	1,1043	Media arrastrada de paso 5	0,9385	1,2082
Normalización a la unidad	0,884637	Residuales (x-media global)	0,5939	0,9124	Normalización a la unidad	0,7826	1,1782
x/media global	0,884132	Normalización Z	0,5928	0,77	x/media global	0,7817	1,1162
Residuales (x-media global)	0,883812	x/media global	0,5913	0,8994	Residuales (x-media global)	0,7811	1,1245
Anchura anillos (mm)	0,883812	Porcentaje	0,5913	0,8994	Anchura anillos (mm)	0,7811	0,6946
Porcentaje	0,883812	Normalización a la unidad	0,5734	0,9304	Porcentaje	0,7811	1,0862
Normalización Z	0,876902	Anchura anillos (mm)	0,5724	0,895	Normalización Z	0,769	0,9627

Tabla 4. Valores de correlación y de determinación, y pendiente del ajuste lineal, de las diferentes transformaciones en un disco pequeño de *A.pinsapo*. Las transformaciones están ordenadas en función del valor del coeficiente de correlación o de determinación, de mayor a menor valor de dicho coeficiente. Se incluye, asimismo, la serie sin transformar “Anchura anillos (mm)”.

***Abies pinsapo*, pequeño**

Transformaciones	Coeficiente de correlación de la serie 1 vs promedio	Regresión de la serie 1 vs el resto	R ²	Pendiente	Regresión de la serie 1 vs promedio	R ²	Pendiente
Media arrastrada de paso 10	0,976911	Media arrastrada de paso 10	0,5906	1,0081	Media arrastrada de paso 10	0,9544	1,4968
Media arrastrada de paso 5	0,964414	Media arrastrada de paso 5	0,5509	0,9573	Media arrastrada de paso 5	0,9301	1,4798
Residuales (x-media global)	0,921357	x/media global	0,5211	0,8058	Residuales (x-media global)	0,8489	1,4107
Anchura anillos (mm)	0,921357	Porcentaje	0,5211	0,8058	Anchura anillos (mm)	0,8489	1,4107
Porcentaje	0,921357	Normalización Z	0,516	0,7183	Porcentaje	0,8489	1,0866
Normalización a la unidad	0,915999	Residuales (x-media global)	0,5154	0,946	Normalización a la unidad	0,8391	1,1395
x/media global	0,909757	Normalización a la unidad	0,5087	0,7281	x/media global	0,8277	1,1982
Normalización Z	0,903226	Anchura anillos (mm)	0,4268	0,8383	Normalización Z	0,8158	1,082

Tabla 5. Valores de correlación y de determinación, y pendiente del ajuste lineal, de las diferentes transformaciones en un disco mediano de *A.pinsapo*. Las transformaciones están ordenadas en función del valor del coeficiente de correlación o de determinación, de mayor a menor valor de dicho coeficiente. Se incluye, asimismo, la serie sin transformar “Anchura anillos (mm)”.

Abies pinsapo, mediano

Transformaciones	Coeficiente de correlación de la serie 1 vs promedio	Regresión de la serie 1 vs el resto	R ²	Pendiente	Regresión de la serie 1 vs promedio	R ²	Pendiente
Media arrastrada de paso 10	0,975059	Media arrastrada de paso 10	0,7735	0,8634	Media arrastrada de paso 10	0,9507	1,0461
Media arrastrada de paso 5	0,960775	Normalización Z	0,7574	0,8703	Media arrastrada de paso 5	0,9231	0,9772
x/media global	0,94499	Residuales (x-media global)	0,7546	0,7969	x/media global	0,893	0,9531
Normalización a la unidad	0,942571	x/media global	0,7463	0,8043	Normalización a la unidad	0,8884	0,992
Normalización Z	0,942495	Porcentaje	0,7463	0,8043	Normalización Z	0,8883	1,002
Residuales (x-media global)	0,941764	Media arrastrada de paso 5	0,7427	0,7928	Residuales (x-media global)	0,8869	0,9301
Anchura anillos (mm)	0,941764	Normalización a la unidad	0,7194	0,8169	Anchura anillos (mm)	0,8869	0,9301
Porcentaje	0,941764	Anchura anillos (mm)	0,71	0,7499	Porcentaje	0,8869	1,1855

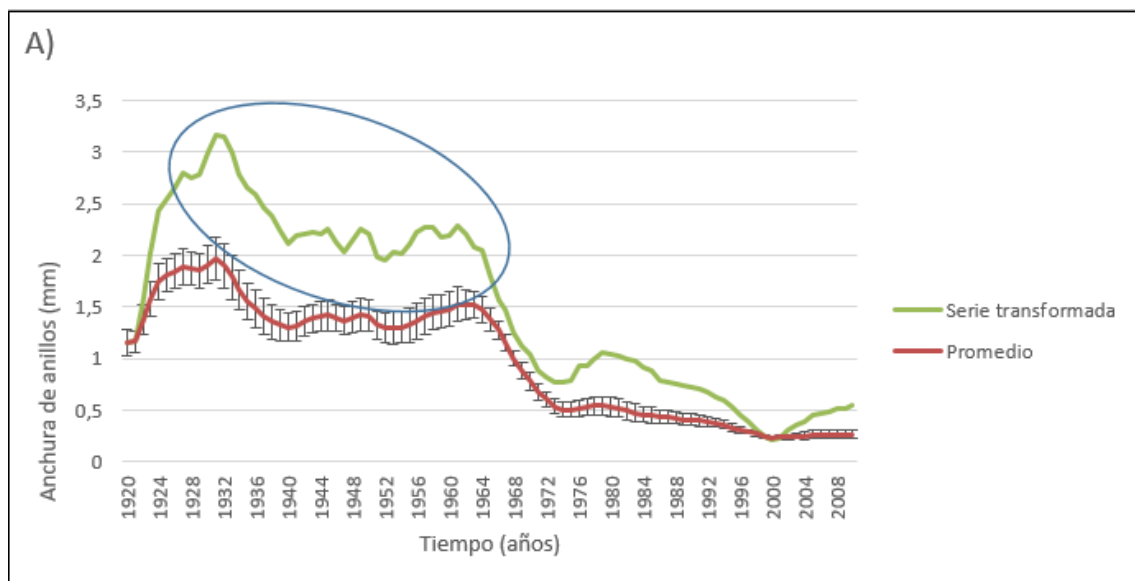
Tabla 6. Valores de correlación y de determinación, y pendiente del ajuste lineal, de las diferentes transformaciones en un disco grande de *A.pinsapo*. Las transformaciones están ordenadas en función del valor del coeficiente de correlación o de determinación, de mayor a menor valor de dicho coeficiente. Se incluye, asimismo, la serie sin transformar “Anchura anillos (mm)”.

Abies pinsapo, grande

Transformaciones	Coefficiente de correlación de la serie 1 vs promedio	Regresión de la serie 1 vs el resto	R ²	Pendiente	Regresión de la serie 1 vs promedio	R ²	Pendiente
Media arrastrada de paso 10	0,979232	Media arrastrada de paso 10	0,8464	1,2406	Media arrastrada de paso 10	0,9619	1,3323
Media arrastrada de paso 5	0,974867	Media arrastrada de paso 5	0,8035	1,1516	Media arrastrada de paso 5	0,9504	1,2921
x/media global	0,956121	Normalización Z	0,7485	0,8652	x/media global	0,9142	1,3145
Porcentaje	0,953138	Residuales (x-media global)	0,7326	1,0323	Residuales (x-media global)	0,9085	1,2179
Residuales (x-media global)	0,953138	x/media global	0,7322	1,1231	Anchura anillos (mm)	0,9085	1,2179
Anchura anillos (mm)	0,953138	Porcentaje	0,7322	1,1231	Porcentaje	0,9085	1,4155
Normalización Z	0,944004	Anchura anillos (mm)	0,7254	1,0221	Normalización Z	0,8911	1,0104
Normalización a la unidad	0,942572	Normalización a la unidad	0,699	0,8936	Normalización a la unidad	0,8884	1,0976

La mayor parte de las transformaciones incrementó el valor de dichos coeficientes respecto a los valores de las series sin transformar, lo que sugiere que las transformaciones cumplen el papel de reducir el ruido introducido en la estimación del crecimiento como consecuencia de la deformación de los anillos. Además, en todos los casos (ambas especies y los tres tamaños de disco) se observó que la transformación “media arrastrada de paso 10” produjo un valor mayor, tanto del coeficiente de correlación como el coeficiente de determinación de la serie deformada con el resto de series y con el promedio de dicho conjunto de datos.

La transformación no ha eliminado la sobrestimación o subestimación de los datos por completo, pero sí ha suavizado los picos y ha reducido, claramente, la diferencia entre la serie transformada y el promedio. Un buen ejemplo es en esta primera figura, el periodo 1972-2000, donde se observa que la serie transformada y el promedio siguen la misma evolución.



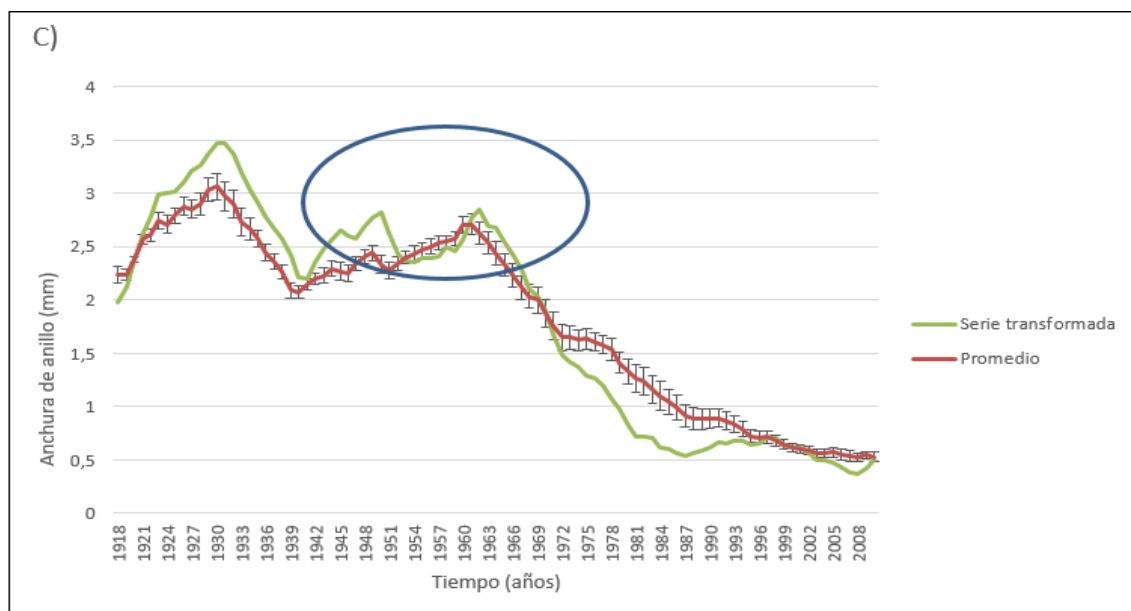
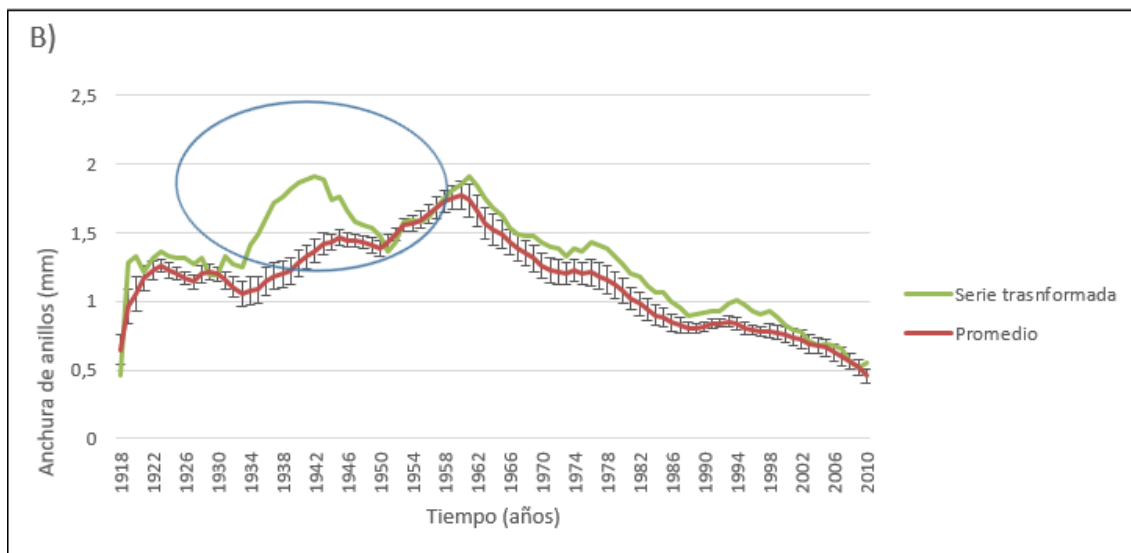
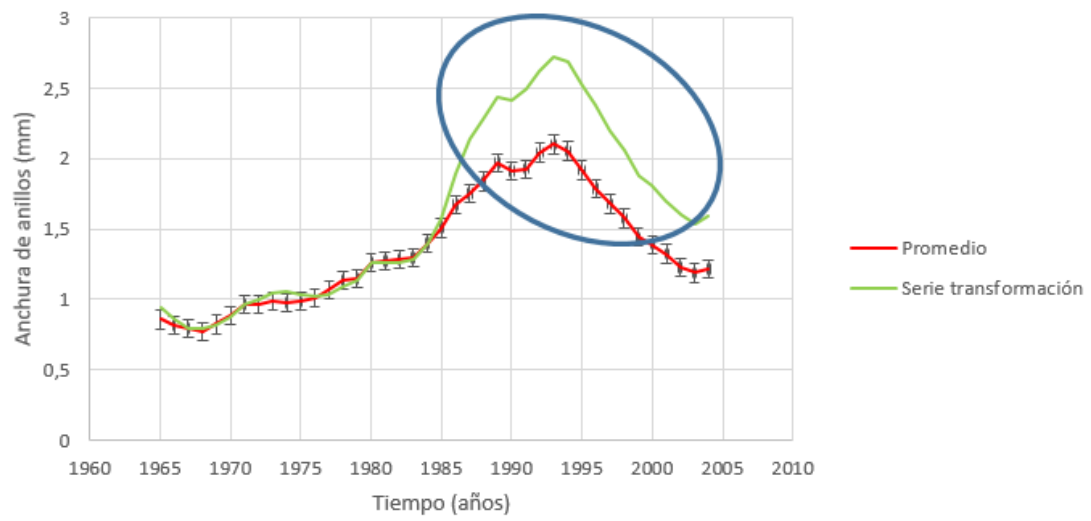
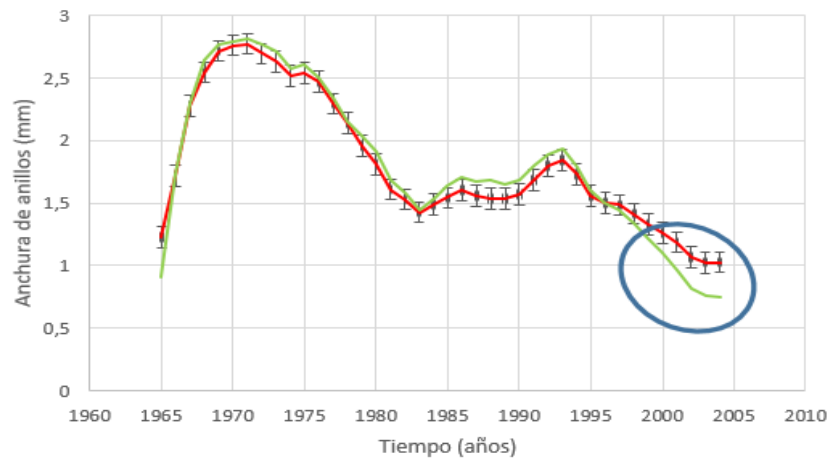


Figura 13. Evolución a lo largo del tiempo de la serie transformada y el promedio de series de un disco de *P. nigra* A) pequeño, B) mediano y C) grande.

A)



B)



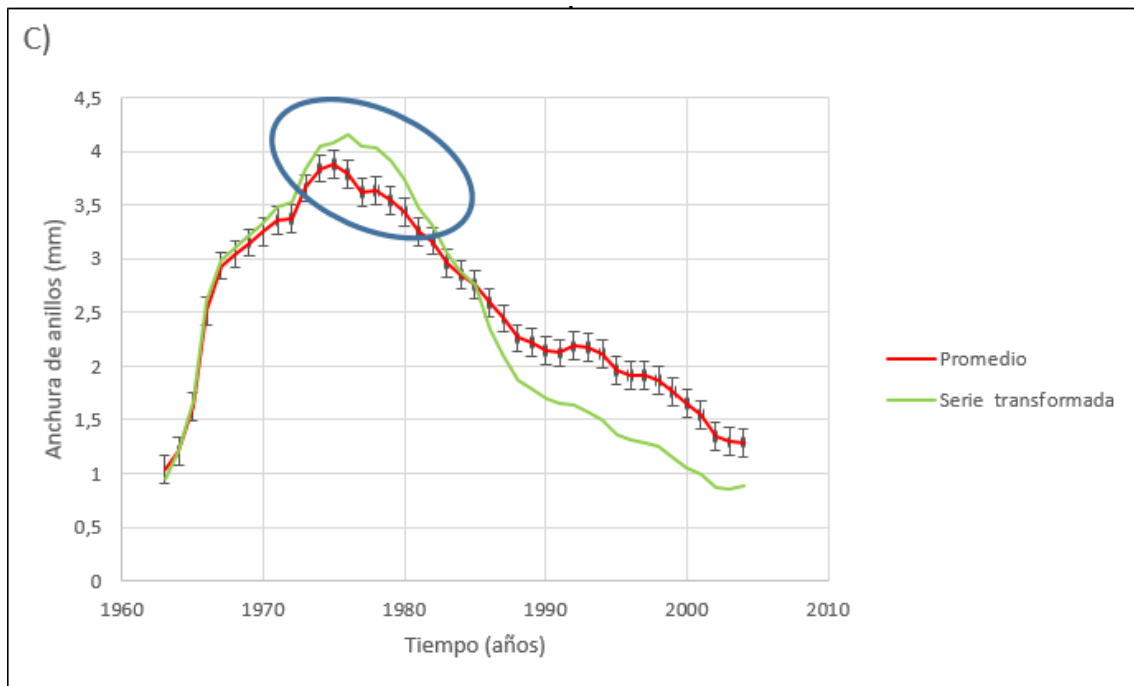


Figura 14. Evolución a lo largo del tiempo de la serie transformada y el promedio de series de un disco de *A. pinsapo* A) pequeño, B) mediano y C) grande.

Como puede observarse en la figura n, el efecto de suavización de la transformación “media arrastrada de paso 10”, se observa tanto la serie deformada muestra valores superiores al promedio, como cuando muestra valores por debajo de la tendencia media del disco.

También después de comprobar que efectivamente se genera una mejora significativa en la mayoría de los casos, hemos querido comprobar cómo afecta la aplicación de esta transformación al IAB de los promedios de las series sin modificar y los promedios con las series modificadas.

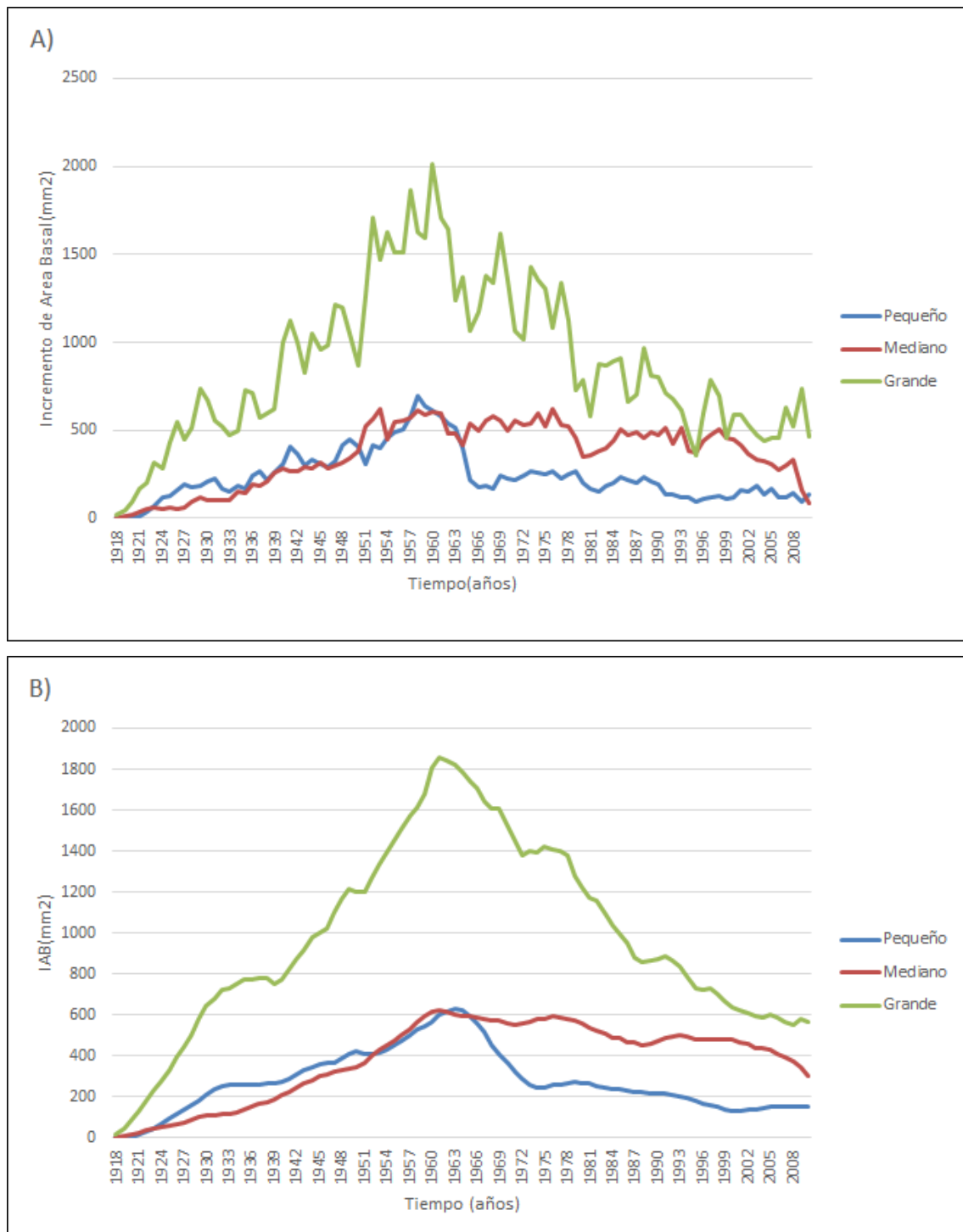


Figura 15. Representación del IAB a partir de los promedios de series A) deformadas y B) modificadas de *P.nigra*.

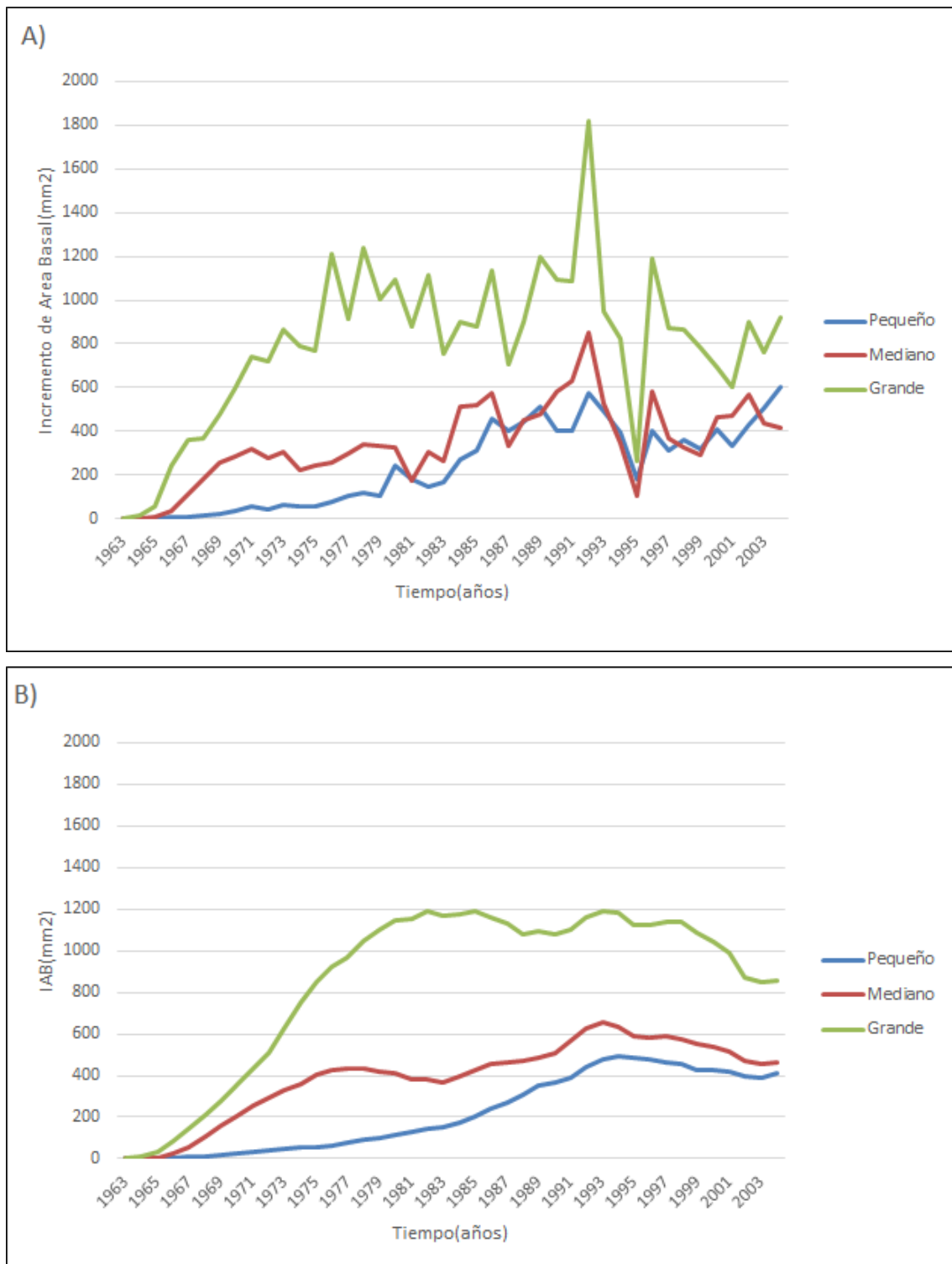


Figura 16. Representación del IAB a partir de los promedios de series A) deformadas y B) Modificadas de *A.pinsapo*.

Como se puede apreciar se consigue un suavizado general y con el que se eliminan las deformaciones que podrían alterar el cálculo de la tendencia de crecimiento.

5. CONCLUSIONES

Como ya se ha dicho en este trabajo, en los árboles pueden aparecer deformaciones por diversas causas que impidan relacionar el crecimiento de los mismos con variables del entorno, el clima o la propia competencia entre otras. Estas deformaciones se encuentran a la hora de realizar la medida y datación de los anillos además de en el IAB, es decir, en los cores no se sabe si hay una deformación o es una reducción o aumento de la anchura de anillos como consecuencia de factores del entorno.

Para corregir esta problemática se han realizado una serie de transformaciones que, en general, producen una suavización del conjunto de datos de una serie, ya sea en el entorno de cada dato (media arrastrada), o con respecto a una medida de tendencia central de la serie (normalizaciones). Por tanto, las normalizaciones Z y a la unidad sirven para normalizar todos los datos dentro de una serie (anillos muy pequeños y otros más grandes) respecto a la medida global, independiente del tamaño de la muestra. Porcentaje y cocientes sirven para evaluar la contribución relativa de cada medida a la medida global. Finalmente, las medias arrastradas sirven para suavizar los datos.

En la mayoría de los casos (tamaños de árbol, especies), las transformaciones mejoran los datos frente a las series no transformadas (Tablas del 1 al 6). Los mejores resultados en todos los casos se han obtenido mediante el suavizado asociado a las medias arrastradas, prevaleciendo la de 10 años sobre la de 5.

Pero tiene un inconveniente y es que se pierde variabilidad temporal a cuanto más años se agrupan en la media arrastrada, sigue prevaleciendo la de 10 años pero no se recomienda que se sobrepasen, porque entonces el suavizado es excesivo.

A su vez tiene una gran utilidad y es que cuando se reconstruyen las series empleando regresiones sobre series transformadas, se generan nuevas series con las que trabajar habiendo eliminado el efecto de las deformaciones. Esto supone que se pueda usar de forma rutinaria en muestras de cores permitiendo evitar el problema de las deformaciones.

Así, después de todos los análisis y comprobaciones realizadas se puede decir que la media arrastrada de paso 10 es el mejor método de transformación de los empleados, ya que es aplicable tanto a especies distintas como a los diferentes tamaños que pueda tener la misma.

Aunque es necesario tener cuidado con no perder el efecto de las variables ambientales, el efecto que tiene esta transformación para poder eliminar huecos de información y reducir deformaciones permiten su uso sobre cores de forma rutinaria.

6. REFERENCIAS

Biondi, F., & Qeadan, F. (2008). A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree-Ring Research*, 64(2): 81-97.

Crossdating - The Basic Principle of Dendrochronology. (2000). Crossdating - The Basic Principle of Dendrochronology. <https://www.ltrr.arizona.edu/lorim/basic.html>

Dendrochronology & Culturally Modified Tree Talk & Tour. (2012). [Fotografía]. <https://redfeatherhistoricalsociety.org/tours-events/historical-site-tours/dendrochronology-culturally-modified-tree-talk-tour/>

Kurth, A., International Association of Wood Anatomists. Committee on Nomenclature, International Association of Wood Anatomists. Committee on Nomenclature, & Schweizerische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. (1964). *Multilingual Glossary of Terms Used in Wood Anatomy*. The Association. https://www.iawa-website.org/uploads/soft/Abstracts/IAWA_glossary.pdf

Shestakova, T. A., Gutiérrez, E., Kirdyanov, A. V., Camarero, J. J., Génova, M., Knorre, A. A., Linares, J. C., Resco de Dios, V., Sánchez-Salguero, R., & Voltas, J. (2016). Forests synchronize their growth in contrasting Eurasian regions in response to climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(3), 662–667.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1514717113>

Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of Tree-ring Research*. Amsterdam University Press.

Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An Introduction to Tree-ring Dating*. Amsterdam University Press.