



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Departamento de Estadística

Máster en Análisis Avanzado de Datos Multivariantes

Trabajo Fin de Máster

**Estudio del crecimiento y su relación
con el clima en *Pinus pinaster*
comparando las técnicas clásicas
empleadas en dendrocronología con
las multivariantes**

Autor:

Álvaro Rubio Cuadrado

Tutoras:

Dra. María José Fernández Gómez

Dra. Inmaculada Barrera Mellado

2016



Dpto. de Estadística
Universidad de Salamanca

DRAS. MARÍA JOSÉ FERNÁNDEZ GÓMEZ E INMACULADA BARRERA MELLADO

Profesoras Titulares del Departamento de Estadística de la Universidad de Salamanca

CERTIFICAN que **D. Álvaro Rubio Cuadrado** ha realizado en la Universidad de Salamanca, bajo su dirección, el trabajo que, para optar título de Máster en Análisis Avanzado de Datos Multivariantes, presenta con el título ***Estudio del crecimiento y su relación con el clima en Pinus pinaster comparando las técnicas clásicas empleadas en dendrocronología con las multivariantes***, autorizando expresamente su lectura y defensa.

Y para que conste, firman el presente certificado en Salamanca a 14 de julio de 2016.

María José Fernández Gómez

Inmaculada Barrera Mellado

**ESTUDIO DEL CRECIMIENTO Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA EN
PINUS PINASTER COMPARANDO LAS TÉCNICAS CLÁSICAS
EMPLEADAS EN DENDROCROLOGÍA CON LAS
MULTIVARIANTES**



Dpto. de Estadística
Universidad de Salamanca

Trabajo para optar al título de Máster en
Análisis Avanzado de Datos Multivariantes
por la Universidad de Salamanca.

Presenta:

Álvaro Rubio Cuadrado

**Salamanca
2016**

RESUMEN

El crecimiento del arbolado en las masas forestales se suele estudiar a partir de muestras radiales tomadas a 1'30 metros de altura del tronco, sin embargo los crecimientos radiales a lo largo del tronco y los crecimientos en altura pueden proporcionar información adicional sobre el desarrollo de los árboles. En este trabajo se han obtenido los crecimientos radiales a distintas alturas del tronco y el crecimiento en altura de 10 árboles dominantes de *Pinus pinaster* en una masa situada en Bayubas (Soria). Los crecimientos radiales se han medido a partir de trozas obtenidas a 5 alturas diferentes. Los crecimientos en altura se han reconstruido, tras cortar los troncos longitudinalmente, midiendo la distancia entre los nudos que deja la inserción de las ramas en la madera. Se presentan las relaciones entre clima y crecimiento radial a distintas alturas y crecimiento en altura, comparando los resultados de los métodos dendrocronológicos tradicionales y de distintos métodos multivariantes: HJ Biplot (Galindo, 1986) y Biplot Canónico (Amaro *et al.*, 2004). Además se analizan las diferencias debidas a la fisiología entre los crecimientos a distintas alturas comparando otros dos métodos multivariantes, el Análisis Triádico (Jaffrenou, 1978) y el Biplot Múltiple (Baccalá, 2004; Nieto, 2015). Los métodos multivariantes obtienen unos resultados similares a los métodos tradicionales de manera que pueden ser intercambiables o complementarios según el objetivo del estudio. En cuanto al Análisis Triádico y al Biplot Múltiple, obtienen exactamente los mismos resultados pero el segundo método es más sencillo de realizar e interpretar.

PALABRAS CLAVE

Dendrocronología, crecimiento, estadística multivariante, Biplot, Análisis Triádico.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Índice general.....	2
Índice de figuras	3
Índice de fotografías.....	4
Índice de tablas.....	5
Índice de mapas.....	6
1. Introducción	7
1.1. Aspectos generales de la dendrocronología	8
1.1.1. Definición.....	8
1.1.2. Anillos y clima.....	8
1.1.3. Metodología básica empleada en la dendrocronología	11
1.2. Justificación del trabajo.....	13
2. Objetivos	15
3. Material	17
3.1. Especie	18
3.2. Lugar de obtención.....	18
3.3. Clima	19
3.4. Obtención de las muestras.....	20
4. Métodos.....	25
4.1. Validación de las muestras	26
4.1.1. Caracterización	26
4.1.2. Sincronización	28
4.2. Estandarización	29
4.3. Análisis estadístico crecimiento-clima.....	31
4.3.1. Dendrocronología tradicional	31
4.3.2. Estadística multivariante con datos de dos vías.....	32
4.3.3. Estadística multivariante con datos de tres vías.....	38
5. Resultados y discusión	45
5.1. Descripción de las cronologías	46
5.1.1. Cronologías brutas	46
5.1.2. Cronologías <i>estandarizadas</i>	52
5.2. Relaciones entre clima y crecimiento siguiendo las técnicas tradicionales	53
5.3. Relaciones entre clima y crecimiento utilizando técnicas multivariantes	58
5.3.1. HJ Biplot	58
5.3.2. Biplots Canónicos	59
5.4. Evolución del diámetro según la altura	70
6. Conclusiones	79
7. Bibliografía	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la madera del tronco de un roble	9
Figura 2. Vista de una sección transversal de madera de pino.....	9
Figura 3. Ejemplo visual de datación cruzada en tres tarugos.....	12
Figura 4. Medidas en bruto de los anchos de los anillos y señal buscada	12
Figura 5. Climodiagrama de Walter-Lieth.....	20
Figura 6. Ejemplo de la caracterización realizada en los crecimientos radiales.....	27
Figura 7. Interpretación geométrica de una representación Biplot.....	36
Figura 8. Proyección de los intervalos de confianza en un Biplot Canónico	38
Figura 9. Cubo de datos sobre el que se ha realizado el Análisis Triádico	39
Figura 10. Esquema del análisis de datos en el Análisis Triádico Parcial.....	42
Figura 11. Pasos de un Biplot Múltiple.....	43
Figura 12. Crecimiento medio anual de las cronologías radiales	47
Figura 13. Comparativa entre los crecimientos radiales y los longitudinales.....	47
Figura 14. Media de crecimiento anual en los primeros 20 años	50
Figura 15. Autocorrelación media de los distintos grupos de cronologías.....	51
Figura 16. Sensibilidad media de los distintos grupos de cronologías	51
Figura 17. Crecimiento bruto de las series obtenidas a 1´30 con su maestra.....	52
Figura 18. HJ Biplot de las cronologías maestras.....	59
Figura 19. Primer Biplot Canónico: crecimientos radiales y temperaturas	62
Figura 20. Segundo Biplot Canónico: crecimientos radiales y precipitaciones.....	65
Figura 21. Tercer Biplot Canónico: crecimientos longitudinales y temperaturas.....	67
Figura 22. Cuarto Biplot Canónico: crecimientos longitudinales y precip	69
Figura 23. Interestructura del Análisis Triádico	72
Figura 24. Componentes principales de cada matriz sobre los ejes compromiso ...	72
Figura 25. Crecimiento medio de cada matriz	73
Figura 26. Compromiso de los crecimientos radiales.....	74
Figura 27. Compromiso de las variables (ejes 1-2)	75
Figura 28. Trayectorias temporales de los crecimientos radiales.....	76
Figura 29. Biplot Múltiple con clúster jerárquico.....	78

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Vistas de los cortes realizados en cada uno de los pies utilizados.....	22
Fotografía 2. Medidor de anillos Lintab.....	23
Fotografía 3. Rodaja con los recorridos por donde se hicieron las mediciones.....	24
Fotografía 4. Barrena de Pressler.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diámetros y alturas de los árboles de la muestra	21
Tabla 2. Matriz de datos completa utilizada en los Biplots	33
Tabla 3. Primera matriz de las 16 que componen el cubo de datos	40
Tabla 4. Descripción numérica de las cronologías	49
Tabla 5. Estadísticos de las cronologías maestras	53
Tabla 6. Correlaciones entre las cronologías maestras y la precipitación	56
Tabla 7. Correlaciones entre las cronologías maestras y la temperatura	58
Tabla 8. Calidad de representación de las variables del HJ Biplot	59
Tabla 9. Calidad de representación de los grupos del primer Biplot Canónico	62
Tabla 10. Bondad de ajuste de las variables del primer Biplot Canónico	63
Tabla 11. Calidad de representación de los grupos del segundo Biplot Canónico ..	65
Tabla 12. Bondad de ajuste de las variables del segundo Biplot Canónico	66
Tabla 13. Correlaciones entre las 16 matrices del cubo de datos	71
Tabla 14. Pesos de cada uno de los operadores y coseno al cuadrado	73
Tabla 15. Crecimientos que se agrupan dentro de cada clúster	78

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. : Situación de Bayubas de Arriba dentro de la provincia de Soria.....	19
---	----

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos generales de la dendrocronología

Siguiendo a Gutiérrez, 2008:

1.1.1. Definición

La dendrocronología es una disciplina científica dotada de un conjunto de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento anuales y extraer, separar e interpretar la información que contienen de los diferentes factores que han influido en su crecimiento.

1.1.2. Anillos y clima

El crecimiento de los árboles y de las plantas leñosas en general se debe a la actividad de los meristemas primarios y secundarios, unos tejidos formados por células no diferenciadas capaces de dividirse y generar nuevas células. Los primarios son los responsables del crecimiento en altura y los secundarios (el cámbium) del crecimiento en grosor.

La estructura del anillo en coníferas (ver Figura 2), en climas templados, está formada por dos bandas, una más clara, y casi siempre de mayor tamaño, y otra oscura y más estrecha. La primera que se forma es la madera temprana, compuesta por traqueidas de mayor tamaño y con paredes celulares finas, producida durante la primavera. Después, durante el verano y el otoño, se forma de manera más lenta la madera tardía, más oscura, densa y compuesta por traqueidas pequeñas y con paredes gruesas.

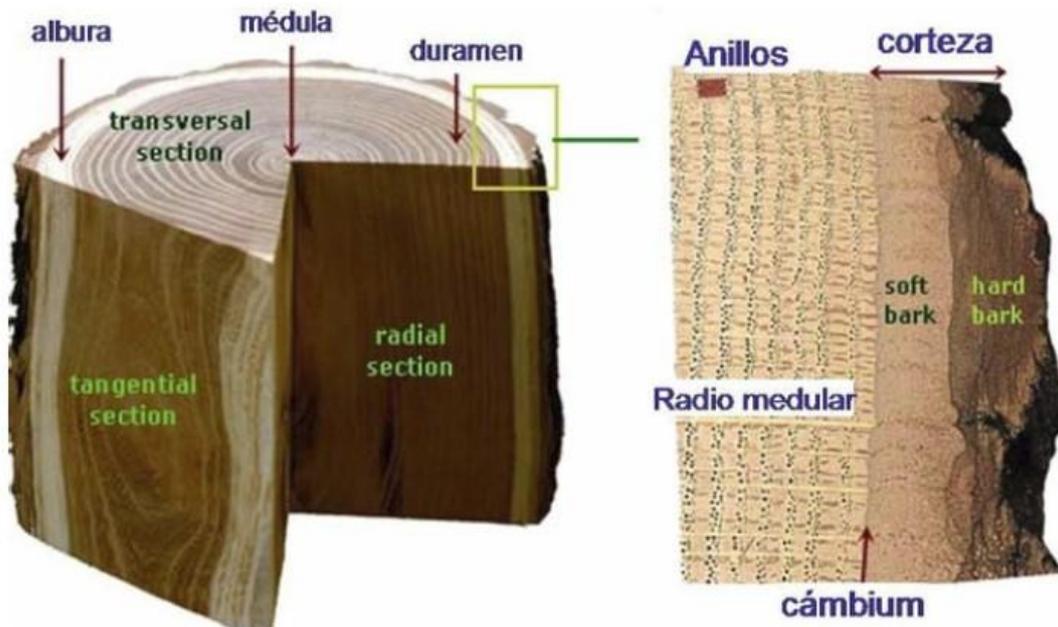


Figura 1. Izquierda, estructura de la madera del tronco de un roble vista según tres secciones de corte: transversal, radial y tangencial. Derecha, ampliación de la parte más externa del tronco.

Fuente: Gutiérrez, 2008, quien a su vez lo elaboró a partir de Schoch *et al.*, 2004.



Figura 2. Vista de una sección transversal de madera de pino. El área marcada es un anillo que está formado por dos bandas, una clara y otra oscura. Los anillos que aparecen en la parte inferior de la imagen son los primeros que se formaron.

Fuente: Gutiérrez, 2008

Bajo unas condiciones climáticas típicamente mediterráneas, el crecimiento de los árboles está limitado por las bajas temperaturas del invierno y la falta de agua en

verano de manera que la primavera y el otoño suelen ser las épocas más favorables para el crecimiento. Esta estacionalidad determina un ritmo bimodal de la actividad del cámbium que se refleja en la estructura de la madera del anillo que muestra bandas intraanuales (falsos anillos) dificultando la identificación y la datación de los anillos anuales. Además, como las temperaturas son altas durante muchos meses, el periodo de crecimiento puede ser muy largo y, si las precipitaciones son abundantes y están bien repartidas a lo largo del año, los anillos son muy anchos. No obstante, como la variabilidad íter e intraanual climática es elevada también se producen diferencias grandes en el grosor de los anillos. En concreto, si las precipitaciones son escasas o no están bien repartidas a lo largo del año los anillos son más estrechos.

En cualquier situación, la actividad del cámbium es muy sensible a los factores ambientales y esta sensibilidad queda reflejada en las características de los anillos formados. Por lo tanto, la variabilidad del clima, la composición atmosférica, las características físicas y químicas del suelo, etc. modifican la tasa de formación de nuevas células, su número, su tamaño y el material utilizado para construir las. Sin embargo, en climas mediterráneos, de todos los posibles factores que pueden influir en el cambium (exceptuando fenómenos puntuales como incendios, plagas o puestas en luz de arbolado mediante cortas, que están muy delimitados en el tiempo y tienen periodicidad baja) sólo el clima presenta una gran variabilidad interanual, quedando registrados sus efectos año tras año en los anillos, y una homogeneidad espacial elevada, de forma que dichos efectos serán los mismos sobre anillos de árboles distintos que se estén formando a la vez bajo un mismo clima.

Como resultado de la estrecha relación entre el crecimiento y el clima, las series de anillos anuales formados por los árboles que crecen bajo unas mismas condiciones climáticas presentan una sincronía, su patrón de variación temporal en el grosor es muy similar. Ese patrón o secuencia de anillos característicos es propio de un determinado periodo de tiempo: es la huella del clima que es reconocible a pesar de quedar grabada sobre las marcas de otros factores que también han afectado al crecimiento. Pero además, esta firma climática es la firma del tiempo, ya que es muy poco probable que un determinado patrón temporal se repita exactamente igual en otro periodo.

1.1.3. Metodología básica empleada en la dendrocronología

Una vez que se obtienen las muestras físicas donde se pueden leer los anillos se realiza su datación, que consiste en asignar a cada anillo el año correcto en el que se formó. Esta tarea viene facilitada al saber que el último anillo es el del último crecimiento, anterior a la obtención de las muestras. Sin embargo, como ya se ha comentado, en clima mediterráneo se pueden presentar anillos falsos, dobles crecimientos (en especies que puedan presentar policiclismo como *Pinus pinaster*), o incluso puede haber años en los que no se haya producido un anillo por las malas condiciones climáticas (generalmente sequía).

Para corregir los posibles errores que se puedan cometer se realiza la caracterización de los anillos (en la cual se ve qué anillos presentan particularidades) y la datación cruzada (Figura 3), la cual consiste en la comprobación visual de la sincronía que debe haber entre los años característicos de los árboles que han crecido bajo las mismas condiciones climáticas durante un periodo común.

Tras la realización de la datación cruzada se miden los anillos con herramientas de precisión y se realiza la validación estadística de la datación determinando el grado de sincronía entre las series mediante el coeficiente de correlación con un nivel de significación del 99%. Si no se consiguiese la validación estadística habría que detectar los errores cometidos en las dataciones efectuadas o eliminar aquellas muestras que distorsionen el conjunto. De esta manera se obtiene la datación absoluta de los anillos, asignando de manera definitiva y precisa el año que corresponde a cada anillo.

En los anillos se superponen muchas señales (información) que reflejan las variaciones de todos aquellos factores internos y externos que influyen en el crecimiento (edad en la que se formó cada anillo, características del suelo, genética, perturbaciones, etc.), sin embargo, si sólo interesa la relación entre crecimiento y clima lo que se hace es extraer la señal que interese mediante la utilización de técnicas estadísticas y matemáticas (estandarización), considerando ruido el resto de señales (Figura 4).

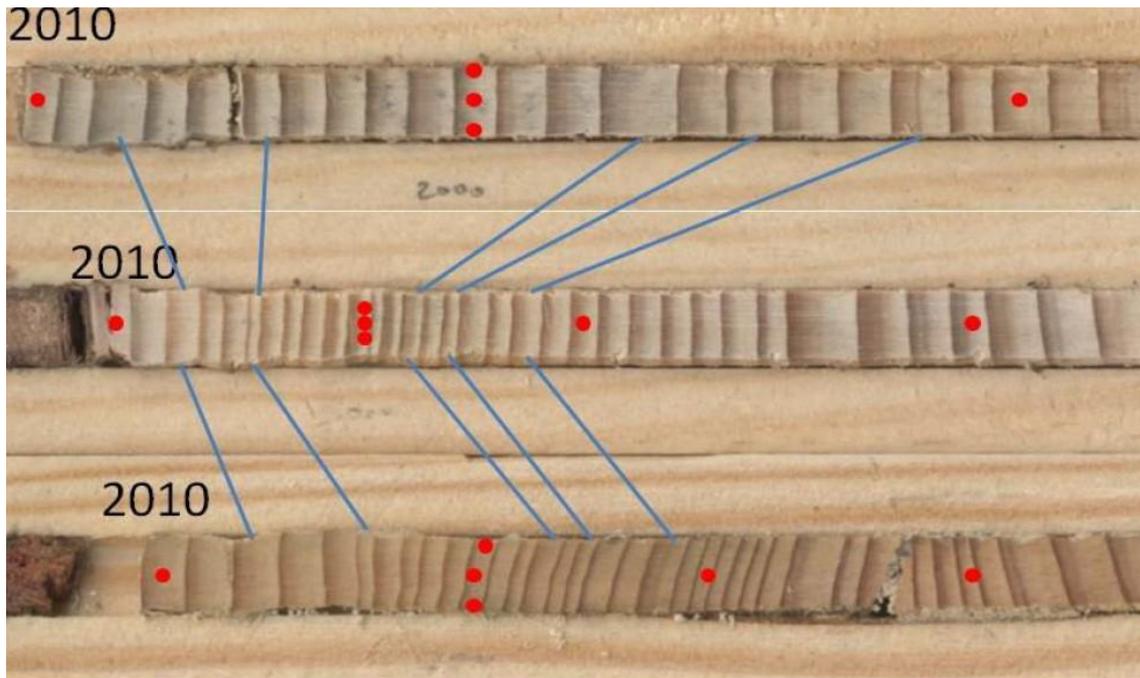


Figura 3. Ejemplo visual de datación cruzada en tres tarugos (segunda acepción del diccionario de la lengua española de la RAE) o *cores* obtenidos mediante barrena. Cada punto señala el cambio de década (los situados más a la izquierda corresponden al año 2010) y los tres puntos el cambio de centuria (el año 2000). Las líneas azules unen anillos formados el mismo año.

Fuente: Navarro *et al.*, 2011.

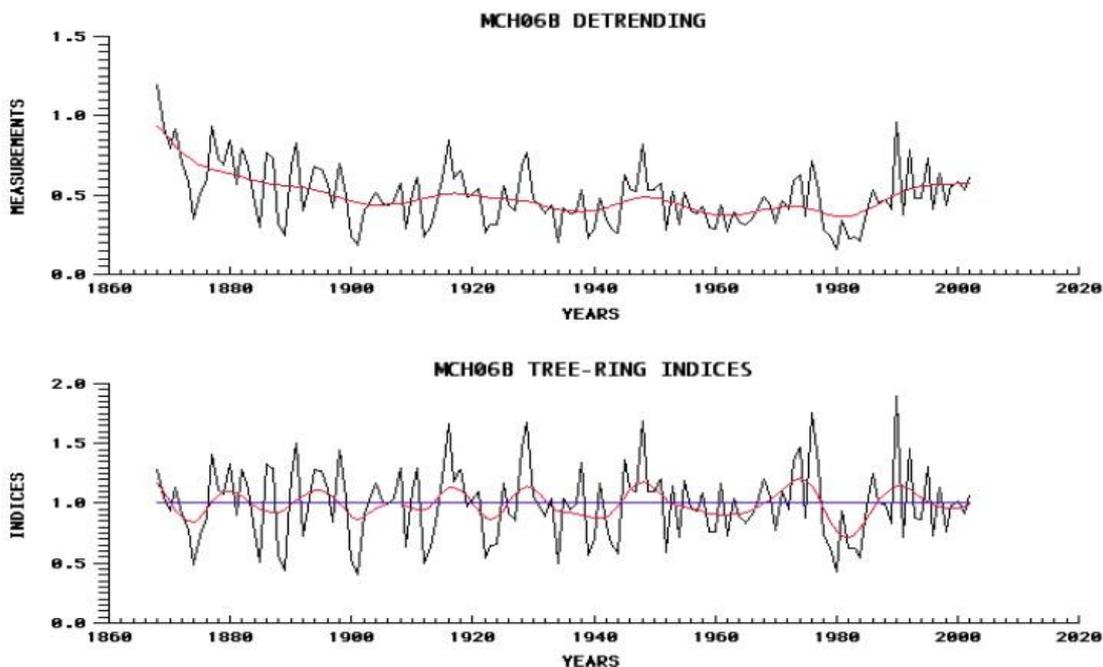


Figura 4. La gráfica superior son las medidas en bruto de los anchos de los anillos. La gráfica inferior es la señal buscada (que es adimensional) una vez se ha eliminado el ruido.

Fuente: Rozas, 2011.

Por otro lado, para la comparación de crecimientos de árboles no coetáneos, también es necesario quitar el ruido que produce la edad (a mayor edad, menor es el crecimiento).

Una vez estandarizadas independientemente cada una de las series de crecimientos se hace la media y de esta manera se obtiene la serie maestra, que es adimensional y es la que se utiliza en las comparaciones con el clima.

1.2. Justificación del trabajo

Tradicionalmente se ha considerado en dendrocronología que con obtener una serie de datos de crecimientos radiales, obtenidos a la altura normal (en Europa a 1'30 metros, aunque cambia según el país) o en la base de los árboles cuando se busca conocer su edad, se obtenía suficiente información de forma que se hacían prescindibles la toma de otras mediciones en un mismo sujeto. A esto contribuye la dificultad existente tanto en la toma de datos a distintas alturas, para lo que se requiere escalar los árboles para obtener tarugos o derribarlos para obtener rodajas, como en la reconstrucción de los crecimientos anuales en altura, los cuales, cuando se trabaja con ejemplares grandes, únicamente se pueden obtener derribando y cortando longitudinalmente los troncos muestreados y midiendo los crecimientos en campo debido a la dificultad de llevarse el tronco entero a laboratorio. Así, los estudios de esta disciplina utilizan en su inmensa mayoría series de crecimientos radiales obtenidas a un única altura, generalmente la altura normal. Sin embargo hay pocos trabajos que hagan el estudio a diferentes alturas del tronco (Novak *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2009) o que analicen el crecimiento anual en altura (Pensa *et al.*, 2005; Salminen *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2012), siendo muy escasos los que lo hacen de manera conjunta (Larson, 1963).

En el presente trabajo se estudian tanto los crecimientos a distintas alturas del tronco como el crecimiento en altura analizando las diferentes relaciones de unos y otros crecimientos con un determinado clima. Así se analizará la información, que en cualquier caso será mayor que la aportada por los estudios típicos con datos obtenidos sólo en la base o a una altura normal, ya que el crecimiento en altura se produce en periodos de tiempo diferentes al crecimiento en diámetro (Larson, 1960) e incluso los crecimientos en diámetro a lo largo del tronco no tienen por qué producirse de manera

simultánea pudiendo haber años en los que el tronco, a una determinada altura, no crece mientras que sí lo hace en otras (Novak *et al.*, 2011).

Por otro lado en el ámbito de la dendrocronología, salvo alguna excepción más relacionada con la ecología (Gutiérrez *et al.*, 2009), no se utilizan las técnicas estadísticas multivariantes, las cuales pueden tener un gran potencial por la simplicidad que supone presentar una gran cantidad de datos de manera gráfica y fácil de interpretar. Por ello se hace un estudio comparativo de las técnicas tradicionales con las multivariantes de dos vías empleando el programa MultBiplot (Vicente Villardón, 2015).

En los primeros años del crecimiento en diámetro de un árbol, debido a que dedica más recursos al desarrollo de la raíz y a la fisiología de la especie, los crecimientos radiales empiezan siendo pequeños y poco a poco van aumentando hasta llegar a un máximo, momento a partir del cual van disminuyendo gradualmente (Serrada, 2003). Este comportamiento, a consecuencia de la edad diferente en el que se produce, varía a lo largo de la altura del árbol (Fritts *et al.*, 1965). Queremos analizar estas diferencias, en la evolución del crecimiento a lo largo del tiempo, según la altura del crecimiento radial que se considere. Para ello se quiere realizar un análisis multivariante a partir de un cubo de datos.

Habitualmente, cuando se trabaja con datos de tres vías, se suelen emplear técnicas específicas como el STATIS (L'Hermier Des Plantes, 1976), el Análisis Factorial Múltiple (Escoufier *et al.*, 1983) o el Análisis Triádico (Jaffrenou, 1978). Sin embargo mediante un Biplot, más sencillo de interpretar y de realizar, se puede trabajar también con cubos de datos (Galindo, 2007). Por eso se hace otra comparación, en este caso de dos análisis multivariantes realizados con cubos de datos: un Análisis Triádico (Jaffrenou, 1978) utilizando el programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997) y un Biplot Múltiple (Baccalá, 2004; Nieto, 2015) empleando el paquete multibiplotGUI de R (Nieto *et al.*, 2015).

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este estudio son:

- Hallar mediante métodos dendrocronológicos tradicionales y estadística multivariante los parámetros del clima que más influyen tanto en el crecimiento en altura de los árboles como en el crecimiento radial según la altura a la que se ha tomado la medida en el tronco.
- Comparar los resultados de los métodos tradicionales con los de la estadística multivariante.
- Analizar, mediante un Análisis Triádico y un Biplot Múltiple, los cambios temporales del crecimiento radial a distintas alturas debidos a factores internos de la especie.
- Comparar igualmente los resultados del Análisis Triádico y del Biplot Múltiple.

3. MATERIAL

3. MATERIAL

3.1. Especie

Le especie sobre la que se hace el estudio es *Pinus pinaster* Ait. subsp. *mesogeensis* Fieschi & Gaussen, siendo *Pinus pinaster* la segunda especie arbórea española en extensión superficial y con la que más superficie se ha repoblado en España, y dentro de ésta, la subespecie *mesogeensis* (o pino resinero) dobla en superficie a la *atlantica* (Rodríguez *et al.*, 2008). Esta subespecie es típica de climas mesotérmicos subhúmedos (Zazo *et al.*, 2000).

Una característica importante de esta especie en dendrocronología es su frecuente policiclismo: puede tener en un mismo año varios crecimientos internodales en altura creando el cambium a su vez un cambio de densidad en la madera con aspecto de anillo por cada crecimiento (Alía *et al.*, 1996). Estos falsos anillos y dobles crecimientos se pueden llegar a dar en más de la mitad de los años.

3.2. Lugar de obtención

Las muestras se han obtenido en la parcela permanente del CIFOR (Centro de Investigación Forestal, perteneciente al INIA) de *Pinus pinaster* "Soria-44", situada a unos mil metros de altitud en un pinar monoespecífico procedente de repoblación del término municipal de Bayubas de Arriba (Mapa 1). La masa tiene unos 130 años de edad en el momento de la corta. En esta parcela se han estado realizando claras cada 10 años y midiendo las alturas y los diámetros de los árboles cada 5 años desde 1963. En este tipo de parcelas los árboles se numeran en campo de manera permanente para poder atribuir las medidas correspondientes a cada uno y así conocer el crecimiento de cada uno de ellos a lo largo del tiempo.



Mapa 1. Situación de Bayubas de Arriba dentro de la provincia de Soria. Escala aproximada: 1:11.500.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Clima

Mediante el programa WCLIMOAL (Sarmiento *et al.*, 1997) se ha obtenido el climodiagrama de Walter-Lieth y la clasificación fitoclimática de Allúe Andrade, la cual es la VI(IV)₂ Nemoromediterráneo Genuino (Allúe, 1990).

El climodiagrama (Figura 5) se ha calculado a partir de los datos climáticos recogidos de 1932 a 2008 por la estación de El Burgo de Osma de la Agencia Estatal de Meteorología situada a 895 metros de altitud (el indicativo de la estación es el 2085). Cuando faltaban datos en esta estación se han utilizado los datos de Bayubas de Abajo (indicativo 2071) realizando una transformación de los datos que se explica en el apartado 4.3.1. Dendrocronología tradicional (página 31). En aquellos casos en los que no se registraron datos ni en El Burgo de Osma ni en Bayubas de Abajo se han usado las medias de todo el periodo (1932-2008) para el mes correspondiente.

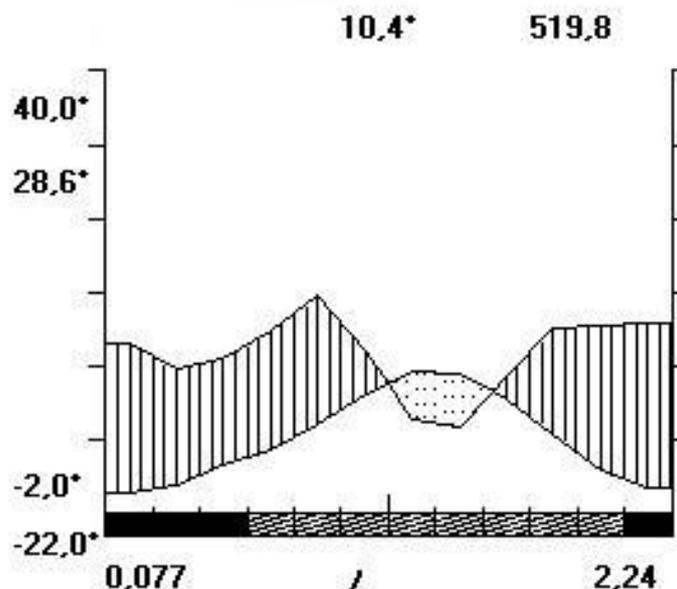


Figura 5. Climodiagrama de Walter-Lieth.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa WCLIMOAL (Sarmiento *et al.*, 1997).

Como se observa en la Figura 5, la precipitación media anual es de 519,8 mm, la temperatura media es de 10,4 °, la máxima absoluta del periodo es de 40,0 °, la mínima absoluta del periodo es de -22,0 °, la temperatura media de las máximas diarias del mes más cálido es de 28,6 ° y la temperatura media de las mínimas diarias del mes más frío es de -2,0°. Hay cuatro meses de heladas seguras y 8 de heladas probables. El periodo árido es de 2,24 meses y la intensidad de aridez (área que en el gráfico cumple $2 \cdot t_i > P_i$ dividida entre el área que verifica $2 \cdot t_i < P_i$, donde t_i es la media de las temperaturas medias mensuales del mes i y P_i , la media de las precipitaciones mensuales de ese mismo mes) 0,077.

3.4. Obtención de las muestras

Se cortaron 10 árboles dominantes en el invierno de 2008-2009 (ver Tabla 1). Éstos fueron cortados longitudinalmente, para medir los crecimientos entre verticilos, y transversalmente, para obtener 5 rodajas por árbol distribuidas por la altura del tronco (Fotografía 1): una basal (a una altura aproximada de 30 centímetros a causa del tocón), otra a la altura normal (130 centímetros), y las siguientes distribuidas

aleatoriamente a lo largo del tronco (en general, y de manera aproximada, estas alturas fueron de 8, 12 y 15 metros).

Los estudios previos muestran que con 10 árboles es suficiente para estudiar el crecimiento de una especie en un lugar (Jalkanen *et al.*, 2000).

Tabla 1. Diámetros y alturas de los árboles de la muestra. La numeración de cada uno se corresponde a la que tenían en campo.

Árbol	Diámetro normal (cm)	Altura total (m)	Altura de copa (m)
4	46,7	17,2	11,9
19	47,0	17,6	11,0
25	49,5	17,5	12,0
33	47,6	16,1	12,0
42	48,5	16,6	11,3
47	51,0	18,7	11,7
53	48,0	17,8	12,9
56	47,4	17,8	12,5
58	52,0	19,4	13,5
72	46,3	18,2	13,5

Fuente: Elaboración propia.

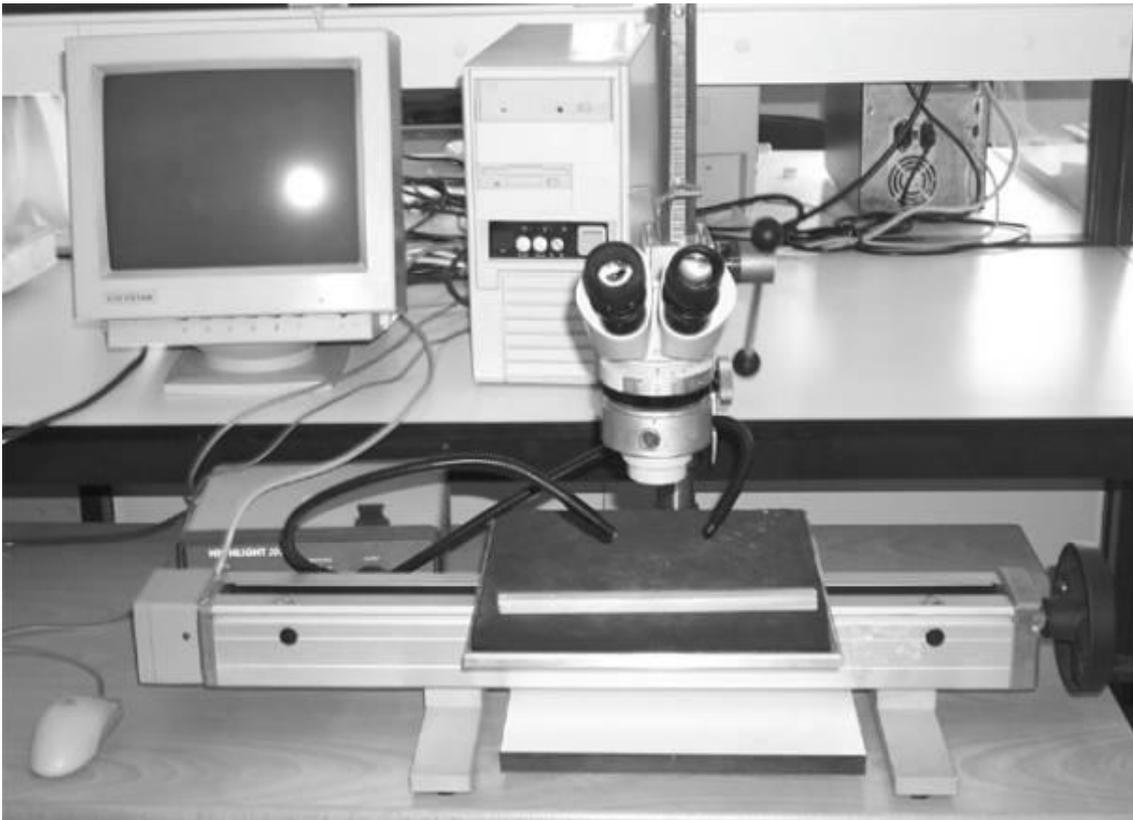
Los crecimientos internodales se dataron y se midieron en campo con cinta métrica con una precisión de 1 centímetro (en la imagen superior-derecha de la Fotografía 1 se pueden observar varios nudos). De esta manera se obtuvieron 10 series de crecimiento en altura.

En cuanto a las rodajas, fueron llevadas a laboratorio donde se pulieron con lijadora industrial y con rotorbital. Tras esto se dataron y se midieron sus crecimientos radiales con una precisión de 0'01 milímetros mediante la herramienta *Lintab* (Fotografía 2) en combinación con el software *TsapWin* (Rinn, 1996).



Fotografía 1. Vistas de los cortes realizados en cada uno de los diez árboles utilizados.

Fuente: INIA-CIFOR.



Fotografía 2. Medidor de anillos *Lintab*.

Fuente: García González *et al.*, 2001.

Para que los crecimientos radiales medidos fueran representativos de cada árbol, debido al crecimiento excéntrico de muchos de ellos, se trazaron entre dos y cinco recorridos (Fotografía 3) por rodaja por donde se midieron los crecimientos radiales, dependiendo su número de la homogeneidad en la anchura de los anillos a lo largo de su circunferencia y de los distintos factores que afectan a las características de los anillos como los nudos o heridas, las cuales reducen la superficie disponible para realizar las mediciones. En todo caso, en el trazado de los recorridos se han evitado las zonas de crecimientos máximos y mínimos.



Fotografía 3. Rodaja con tres recorridos por donde se hicieron las mediciones radiales. Esos recorridos son orientativos ya que se trazaron haciendo una recta desde el centro al perímetro, sin embargo estas rectas a menudo atraviesan los anillos de manera oblicua, siendo la medida tomada la perpendicular a ellos.

Fuente: INIA-CIFOR

4. MÉTODOS

4. MÉTODOS

4.1. Validación de las muestras

4.1.1. Caracterización

Una vez hechas las dataciones, que consisten en asignar a cada anillo el año en el que se formó, se caracterizaron, con la ayuda de una lupa de laboratorio, tanto los crecimientos radiales como los longitudinales, distinguiendo si presentan algunas de las siguientes características. Como la caracterización se hizo en laboratorio, donde se llevaron las rodajas pero no los fustes, en los crecimientos en altura sólo se distinguieron aquellas características basadas en las longitudes, que son las marcadas con un asterisco. Entre paréntesis se ponen las abreviaturas que se emplearon al caracterizar (ver Figura 6).

- *Anillo ancho/internudo ancho (A).
- *Anillo estrecho/internudo estrecho (E).
- Anillo con helada (H).
- *Anillo ausente o perdido/internudo ausente o perdido (P).
- Anillo con madera tardía estrecha (TA-E).
- Anillo con madera tardía ancha (TA-A).
- Anillo con madera tardía oscura (TA-O).
- Anillo con madera tardía clara (TA-C).
- Anillo con madera temprana estrecha (TE-E).
- Anillo con madera temprana ancha (TE-A).
- Anillo con madera temprana oscura (TE-O).
- Anillo con madera temprana clara (TE-C).

- Cambio de densidad en la madera tardía (CD(TA)).
- Cambio de densidad en la madera temprana (CD(TE)).
- Cambio de densidad entre la madera temprana y la tardía (CD).
- Claro cambio de anchura en un determinado año a partir del cual todos los anillos son más estrechos (CA).
- Paso de madera temprana a tardía difuminado (Dif-TA).
- Paso de la madera tardía a la temprana del siguiente anillo difuminado (TA-Dif).
- *Por último también se han distinguido aquellos anillos o internudos con alguna de las anteriores características muy acusadas o especialmente débiles (+).

AÑO	25 A	42 A	47 B	A-42 B
1949		TA-A/CD(TA) Dif-TA	TA-A/TA-C/CD(TA)	A/TA-A/TA-C CD(TA)
1948	TA-E	TA-E	TA-A/Dif-TA	TA-E
1947		E/TA-A	TA-A/TA-C/CD(TA)	E/TA-O
1946	E	E	E	+E/TA-O
1945	+E/CD(TE)/TA-C	+E/TA-C/CD(TE)	+E/TA-E/CD(TE)	+E/CD(TE) TA-C/TA-E
1944	E/TA-C/CD(TA)	E/TA-C/CD(TE) CD(TA)	E/CD(TE)/CD(TA)	CD(TE)/CD(TA)
1943		CD(TE)	TA-A/CD(TA)/Dif-TA	CD(TA)
1942	A	A/TA-A/CD(TA) Dif-TA	A/TA-A/CD(TA)/Dif-TA	A/CD(TA)
1941	A	TA-A/Dif-TA	A/TA-A/CD(TA)/Dif-TA	E
1940	Dif-TA	TA-A/Dif-TA	TA-A/Dif-TA	TA-O/Dif-TA
1939			Dif-TA	
1938			Dif-TA	
1937			A/TA-A/CD(TA) CD(TE)	CD(TA)
1936	TA-A/	A/TA-A/Dif-TA	A/TA-A/Dif-TA	A/TA-A/TA-C Dif-TA
1935	TA-A/	A/TA-A/Dif-TA	A/TA-A/Dif-TA	TA-A/TA-C/Dif-TA
1934	E/TA-E	E/TA-E	E	E/TA-E
1933	TA-E	CD(TA)		TA-C/CD(TA)

Figura 6. Ejemplo de la caracterización realizada en los crecimientos radiales. La primera fila indica el número de troza que se está midiendo.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Sincronización

Tras la caracterización se realizó una validación doble de los crecimientos longitudinales y radiales para evitar cualquier error de medida: por un lado se hizo la datación cruzada (validación visual en la que, a partir de la caracterización realizada, nos fijamos en que las distintas muestras presenten características similares en los anillos formados en un mismo año) y por otro se utilizó el programa COFECHA (Holmes, 1997) con el que se realiza una validación estadística.

Los pasos que realiza COFECHA son los siguientes:

- La denominada *estandarización* de COFECHA: aunque se denomina estandarización no se corresponde con el significado habitual de este término en estadística y para distinguirlo se pondrá en cursiva. Lo que hace el programa es transformar cada serie de crecimientos mediante su ajuste a una función *spline* (dividiendo cada valor de dicha serie entre el valor correspondiente de la función *spline*), calcular un modelo autorregresivo y realizar una transformación logarítmica, obteniendo una serie de índices adimensionales, con la mayor parte del ruido eliminado, por cada serie de crecimientos. La rigidez de la *spline* utilizada es de 32 años que es la que se ha visto que es más útil cuando se buscan correlaciones con el clima (Grissino-Mayer, 2001) ya que rigideces menores pueden eliminar variabilidad climática real en la que se pueden suceder periodos de varios años más secos o cálidos con otros más lluviosos o fríos, y rigideces mayores no eliminarían mucho ruido (como las debidas a la realización de claras o a la ocurrencia de plagas, avalanchas, etc.) lo cual impediría una correcta interpretación de la señal climática.
- Serie maestra: tras esto calcula la media de estas series de índices adimensionales de forma que tenemos la serie maestra de COFECHA.
- Comprobación de errores: divide cada serie de crecimientos en segmentos de longitudes fijas con superposiciones iguales a la mitad de dichas longitudes (por ejemplo una serie que vaya del año 1900 al 2000, trabajando con longitudes de 50 años, se dividirá en tres segmentos: 1900-1950, 1925-1975, 1950-2000). Cada segmento lo compara con la serie maestra de COFECHA y calcula su correlación (mediante el coeficiente de correlación de Pearson), con un nivel de significación del 99%, tanto para la posición que le correspondería

con la datación previa realizada, como sumando y restando a esta datación hasta 10 años para comprobar si la mejor datación es la propuesta o si hay algún tipo de error (una equivocación en el año de datación), en cuyo caso habrá una mejor correlación al sumar o restar una serie de años. Las longitudes con las que se ha trabajado son de 50 años, que es lo recomendado (Grissino-Mayer, 2001), salvo cuando las series de crecimientos son menores de 100 años en cuyo caso se han realizado dos validaciones estadísticas con COFECHA, una con longitudes de 50 años y otra con longitudes de 30. Trabajar con longitudes de menos de 30 años no es recomendable ya que se tenderá a obtener resultados erróneos y con baja correlación.

- También marca aquellos segmentos con valores extraños (baja correlación) y los años atípicos (que influyen mucho en la correlación de cada segmento con la serie maestra, posibles anillos ausentes, valores extremos).

Por otro lado COFECHA proporciona una serie de estadísticos que permiten valorar la bondad de las cronologías para estudiar su relación con el clima: desviación típica media de los crecimientos de cada grupo de cronologías, desviación típica media de los crecimientos una vez *estandarizados* (mediante la *estandarización* de COFECHA ya explicada), autocorrelación (indica la correlación media del ancho de cada anillo respecto al ancho del anillo del año anterior de las series sin *estandarizar*), sensibilidad media (indica el cambio medio del ancho de cada anillo con respecto al siguiente de las series sin *estandarizar*) y correlación media con la serie maestra de COFECHA. Esta correlación resulta de calcular a su vez las correlaciones de cada serie bruta (sin *estandarizar*) con la serie maestra (que es la media de las *estandarizadas* según COFECHA) y tras esto sacar la media de dichas correlaciones.

4.2. Estandarización

La *estandarización* en dendrocronología es el conjunto de técnicas estadísticas que permiten transformar las series brutas de crecimiento en índices anuales adimensionales y combinarlas en una cronología de sitio, especie, tratamiento, sexo, edad, región, etc., según los objetivos del estudio (Rozas, 2011). Tal y como se ha mencionado para el programa COFECHA, esta *estandarización* no se corresponde con su significado habitual en estadística y para distinguirla se pondrá en cursiva.

En nuestro caso, se han *estandarizado* las series brutas para obtener una cronología maestra de crecimientos en altura y 5 cronologías maestras de crecimientos radiales a distintas alturas: basales (aproximadamente a 30 centímetros de altura), en la altura normal (130 centímetros de altura), y aproximadamente a 8, 12 y 15 metros de altura. Para esto se ha usado el programa ARSTAN (Holmes, 1997).

Pasos que realiza ARSTAN:

- Permite tratar los datos de distintas maneras. Para este trabajo se ha hecho una doble *estandarización* de cada serie de datos bruta mediante el ajuste a una función exponencial negativa para eliminar la tendencia de la edad (los crecimientos radiales y longitudinales, a igualdad de condiciones ambientales, siempre son de media mayores cuanto más joven es un árbol) y el ajuste posterior a una función *spline* con una rigidez de 32 años para eliminar la máxima variabilidad no debida al clima. Así, todas las series brutas son transformadas en series de índices adimensionales directamente comparables entre sí (Rozas, 2011). Las series *estandarizadas* tienen una media de 1 y una varianza estable y homogénea. Al igual que en COFECHA el ajuste de las series de crecimientos a los modelos matemáticos (ya sea la función exponencial negativa o la *spline*) se realiza dividiendo cada valor de dichas series entre el valor correspondiente de las funciones matemáticas.
- Realiza la media robusta (elimina la influencia de los valores extremos) de las series *estandarizadas*.
- Por último aplica un modelado autorregresivo a la serie *estandarizada* media, para eliminar la autocorrelación, obteniéndose una serie residual (o serie maestra) en la que está maximizada la relación con el clima.

Además ARSTAN proporciona los siguientes estadísticos: sensibilidad media de la serie maestra, que como ya se ha indicado mide el cambio medio del ancho de cada anillo con respecto al siguiente; relación señal-ruido, que es una ratio que determina la robustez de la señal común observada entre las series *estandarizadas* (según ARSTAN) que componen la cronología maestra; señal de la población, que cuantifica el grado en que la cronología maestra obtenida representa la cronología teóricamente perfecta de esa población; varianza compartida, que es la proporción de la variación interanual del crecimiento compartida por todas las series *estandarizadas* (según ARSTAN) que componen una cronología maestra.

4.3. Análisis estadístico crecimiento-clima

4.3.1. Dendrocronología tradicional

Para el estudio de las relaciones entre crecimiento y clima se han usado por un lado las cronologías maestras de crecimientos, obtenidas con el programa ARSTAN, y por otro las series mensuales de precipitación y de temperaturas medias. Los datos climáticos son los registrados por la estación más cercana a la parcela de donde se han extraído las muestras que posee la Agencia Estatal de Meteorología, en la localidad de El Burgo de Osma (el indicativo de la estación es el 2085), de la cual se tienen datos suficientes desde el año 1932.

Cuando falta algún dato de la estación de El Burgo de Osma se han utilizado los datos de Bayubas de Abajo (indicativo 2071 de la Agencia Estatal de Meteorología) realizando una transformación de los datos que se corresponden con las siguientes regresiones lineales:

- Precipitación mensual (P): $P_{\text{El Burgo}} = P_{\text{Bayubas}} * 0'8567 + 58'384$
- Temperatura media mensual (T): $T_{\text{El Burgo}} = 0'9152 * T_{\text{Bayubas}} + 6'466$

Estos dos modelos se han obtenido de calcular sendas regresiones lineales utilizando los datos de todos los meses disponibles, entre los años 1932 y 2008, en los que ninguna de las estaciones meteorológicas tenía el dato perdido.

En aquellos casos en los que no se registraron datos ni en El Burgo de Osma ni en Bayubas de Abajo se han usado las medias de todo el periodo (1932-2008) para el mes correspondiente.

La relación crecimiento-clima se ha cuantificado mediante los coeficientes de correlación de Pearson significativos con un nivel de confianza del 95%, calculados con el programa DENDROCLIM (Biondi *et al.*, 2004), creado específicamente para calcular dichas correlaciones a partir de las cronologías maestras de crecimientos y el clima.

Las posibles relaciones entre las cronologías maestras radiales de crecimientos y las variables climáticas mensuales fueron exploradas desde septiembre del año anterior al del crecimiento (por la influencia que puedan tener los meses previos al periodo

vegetativo) hasta noviembre del año del crecimiento, ya que el crecimiento de otoño se puede alargar hasta finales de año si lo permiten las condiciones ambientales (Río *et al.*, 2014). Para la cronología maestra longitudinal el periodo estudiado se ha alargado a todo el año previo al crecimiento porque éste es el año en el que se forman las yemas.

4.3.2. Estadística multivariante con datos de dos vías

Con los mismos datos que los usados en el análisis dendrocronológico tradicional, a partir de una matriz con los años en filas y con las cronologías maestras (obtenidas con ARSTAN) de los crecimientos radiales obtenidos a distintas alturas, la cronología maestra longitudinal y con las precipitaciones y temperaturas medias mensuales entre los años 1933 y 2008 en columnas, se han realizado cinco análisis multivariantes utilizando Biplots (Gabriel, 1971) mediante el programa MultBiplot (Vicente Villardón, 2015). La matriz de datos completa (ver tabla 2) está compuesta por 76 filas, desde el año 1933 al 2008, y 52 columnas: 5 cronologías maestras radiales obtenidas a 0, 1'3, 8, 12 y 15 metros de altura; una cronología maestra longitudinal; doce series de las precipitaciones correspondientes a los doce meses del año previo al del crecimiento (pene, pfeb, pmar, pabr, pmay, pjun, pjul, pago, psep, poct, pnov y pdic); 11 series de precipitaciones mensuales del año del crecimiento (Pene, Pfeb, pmar, Pabr, Pmay, Pjun, Pjul, Pago, Psep, Poct y Pnov); otras doce series de las temperaturas medias correspondientes a los doce meses del año previo al del crecimiento (tene, tfeb, tmar, tabr, tmay, tjun, tjul, tago, tsep, toct, tnov y tdic) y otras 11 series de temperaturas medias mensuales del año del crecimiento (Tene, Tfeb, Tmar, Tabr, Tmay, Tjun, Tjul, Tago, Tsep, Toct y Tnov). Para facilitar la comprensión las variables del año previo al del crecimiento se han denominado con letras en minúscula mientras que en las del año del crecimiento la primera letra se pone en mayúsculas.

En el primer Biplot se ha buscado realizar un análisis visual de las correlaciones entre las cronologías maestras de crecimientos. Para ello se ha optado por usar un HJ Biplot (Galindo, 1986) ya que, entre los Biplots clásicos, éste es el que representa con la máxima calidad tanto las filas como la columnas. Para este análisis no se ha empleado la matriz completa sino una submatriz con todas las filas (76, correspondientes a cada uno de los años entre 1933 y 2008) pero sólo con las seis columnas de las cronologías maestras (las de los crecimientos radiales obtenidos en la base, a 1'3, 8, 12, 15 metros de altura y la de los crecimientos longitudinales).

Tabla 2. Matriz de datos completa utilizada en los Biplots.

	Basal	1´3	8	12	15	Cron. Long.	pene	pfeb	...	Toct	Tnov
1933	0´90	0´92	0´99	0´93	0´93	0´84	472	212	...	112	45
1934	0´54	0´64	0´72	0´66	0´64	0´96	224	619	...	123	37
1935	1´31	1´28	1´10	1´17	1´21	0´59	55	81	...	94	55
...
2006	1´19	1´15	1´01	0´91	0´92	0´43	137	1247	...	136	95
2007	1´28	1´28	1´12	1´10	1´12	1´00	257	881	...	102	34
2008	1´07	1´15	1´17	1´25	1´19	1´37	262	447	...	98	37

Fuente: Elaboración propia.

Además se han realizado cuatro Biplots Canónicos (Amaro *et al.*, 2004). Entre los distintos análisis que se podían realizar se ha empleado este tipo de Biplot porque, además de un análisis descriptivo, permite realizar otro inferencial debido a que se representan las regiones de predicción (intervalos de confianza) de la media de los grupos (establecidos *a priori*) sobre el gráfico. Igualmente en esta técnica, al contrario que en los métodos multivariantes más frecuentes, no se representan los ejes con mayor variabilidad sino aquellos con mayor poder de discriminación de los grupos. Los ejes con mayor variabilidad pueden no contener la información que buscamos o contenerla mezclada con ruido.

Los cuatro Biplots Canónicos se han realizado a partir de otras cuatro submatrices con todas las filas (76) pero con distinto número de columnas:

- En el primer Biplot Canónico, para ver la relación entre las temperaturas y los crecimientos radiales, se han empleado como variables las temperaturas mensuales desde septiembre del año anterior hasta noviembre del año del crecimiento (15 columnas) y se ha buscado discriminar cuatro grupos según el comportamiento del crecimiento radial: el grupo 1 está formado por aquellos años en los que los crecimientos radiales promedio de todas las cronologías son superiores a la media y la cronología maestra basal es superior a la obtenida a 12 metros de altitud; el grupo 2 es como el anterior pero con crecimientos radiales promedio inferiores a la media; el grupo 3 está formado por los años en los que los crecimientos radiales promedio son inferiores a la media y la cronología maestra basal es inferior a la obtenida a 12 metros de altitud; el grupo 4 son los años con crecimientos promedio superiores a la media y con la cronología maestra basal inferior a la de 12 metros. De esta manera podremos determinar qué caracteriza al clima de aquellos años en los

- que el crecimiento general es bueno (grupos 1 y 4) o malo (grupos 2 y 3) y a aquellos años en los que el mejor crecimiento se da en la base del tronco (grupos 1 y 2) o a mayores alturas (grupos 3 y 4), con lo que veremos las diferentes relaciones del clima con los crecimientos radiales a distintas alturas.
- En el segundo, para ver la relación entre las precipitaciones y los crecimientos radiales, se han empleado como variables las precipitaciones mensuales de los mismos meses que en el caso anterior (15 columnas) y con los mismos grupos.
 - En el tercero, para ver la relación entre las temperaturas y los crecimientos longitudinales, se han empleado como variables las temperaturas mensuales de todo el año previo al del crecimiento y las del propio año del crecimiento hasta noviembre (23 columnas) y los grupos que se busca discriminar se han obtenido de dividir los crecimientos longitudinales en tres conjuntos del mismo tamaño: crecimiento elevado (grupo 1), escaso (grupo 3) e intermedio (grupo 2). Así podremos ver qué caracteriza al clima de los años que producen un determinado crecimiento longitudinal de los árboles.
 - En el cuarto, para ver la relación entre las precipitaciones y los crecimientos longitudinales, se han empleado como variables las precipitaciones mensuales de los mismos meses que en el caso anterior (23 columnas) y con los mismos grupos.

En el HJ Biplot, en la cronología correspondiente a los 15 metros de altitud, como no tiene la serie temporal completa ya que sus crecimientos comienzan en 1961 (ver Tabla 4, página 49), se ha completado cada dato faltante con la media del resto de crecimientos para el año dado.

En los Biplots Canónicos no se han empleado las cronologías maestras correspondientes a los crecimientos radiales obtenidos a 1´3, 8 y 15 metros de altura ya que los dos primeros, como se verá en el apartado de Resultados y Discusión, toman unos valores y presentan unas relaciones con el clima intermedios al de las cronologías de los crecimientos obtenidos en la base y a 12 metros, y por tanto son menos interesantes que estos últimos. En cuanto al crecimiento obtenido a 15 metros, sólo se tienen datos de él desde 1961.

Los Biplots (Gabriel, 1971) son una representación gráfica de datos multivariantes en la que se representan de manera conjunta tres o más variables (Gabriel *et al.*, 1990). De esta manera un Biplot nos permite representar en un espacio de dimensión reducida, además de sujetos, variables en forma de vectores sobre los cuales se

pueden proyectar ortogonalmente los sujetos para interpretar el valor que toman los mismos en cada una de dichas variables.

Siguiendo a Galindo *et al.*, 1999:

Los métodos Biplot propuestos por Gabriel permiten representar los datos de una matriz $\mathbf{X}_{n \times p}$ (individuos x variables) en un espacio de dimensión reducida, sin más que elegir unos marcadores a_1, \dots, a_n para sus filas (individuos) y b_1, \dots, b_p para sus columnas (variables), de forma que el producto interno $a_i b_j$ reproduzca el elemento x_{ij} de la matriz \mathbf{X} .

Partiendo de la descomposición en valores singulares de la matriz \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^t$$

donde \mathbf{U} es la matriz de vectores propios de $\mathbf{X}\mathbf{X}^t$, \mathbf{V} es la matriz de vectores propios de $\mathbf{X}^t\mathbf{X}$ y \mathbf{D} es una matriz diagonal formada por los valores singulares de \mathbf{X} .

Podemos escribir \mathbf{X} en la forma $\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{B}^t$, sin más que elegir, $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{D}^\alpha$ y $\mathbf{B} = \mathbf{V}\mathbf{D}^{1-\alpha}$. Si $\alpha = 0$ entonces tenemos la representación GH-Biplot y si $\alpha = 1$ la representación JK-Biplot (Gabriel, 1971; Gabriel *et al.*, 1986).

Si tomamos como marcadores $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{D}$ y $\mathbf{B} = \mathbf{V}\mathbf{D}$ obtenemos la representación HJ-Biplot (Galindo, 1985, 1986; Galindo *et al.*, 1986).

En el GH-Biplot sólo se preserva la métrica de las columnas, por lo que los individuos vienen representados en coordenadas estándar. En el JK-Biplot sólo los individuos aparecen representados en coordenadas principales. El HJ-Biplot, por el contrario, aunque no reproduce los elementos de la matriz original, tiene la ventaja de que sí se trata de una representación simultánea en sentido estricto, alcanzándose una máxima calidad de representación tanto para las filas como para las columnas de la matriz de datos.

La interpretación de los resultados gráficos de un Biplot es la siguiente (Medina Hernández, 2015): los ángulos de los vectores que representan a las variables con los ejes factoriales muestran cuales son los elementos característicos de dichos ejes; un elemento se dice que es característico de un eje si el ángulo que forma con dicho eje es muy pequeño. El ángulo entre vectores presenta la correlación entre los indicadores o la covarianza entre las variables; es decir, si los indicadores están próximos se dice

que están altamente correlacionados, con parecido comportamiento; si son perpendiculares, que son independientes; si toman direcciones opuestas, que tienen una alta correlación en sentido inverso. La longitud de los vectores que representan a las variables muestra la información contenida para discriminar entre individuos, además proporciona una idea de la dispersión de dicha variable, porque a mayor longitud del vector, mayor variabilidad, y viceversa. Por su parte, la distancia entre los individuos informa en qué medida son similares ya que refleja el grado de parecido o diferencia en relación a las variables que se han medido. Además, si la proyección del punto que representa a un individuo sobre el vector que representa a una variable es grande, dicho es significativo para la explicación de la variable, y a su vez ésta tiene un valor alto para discriminar al individuo (ver Figura 7).

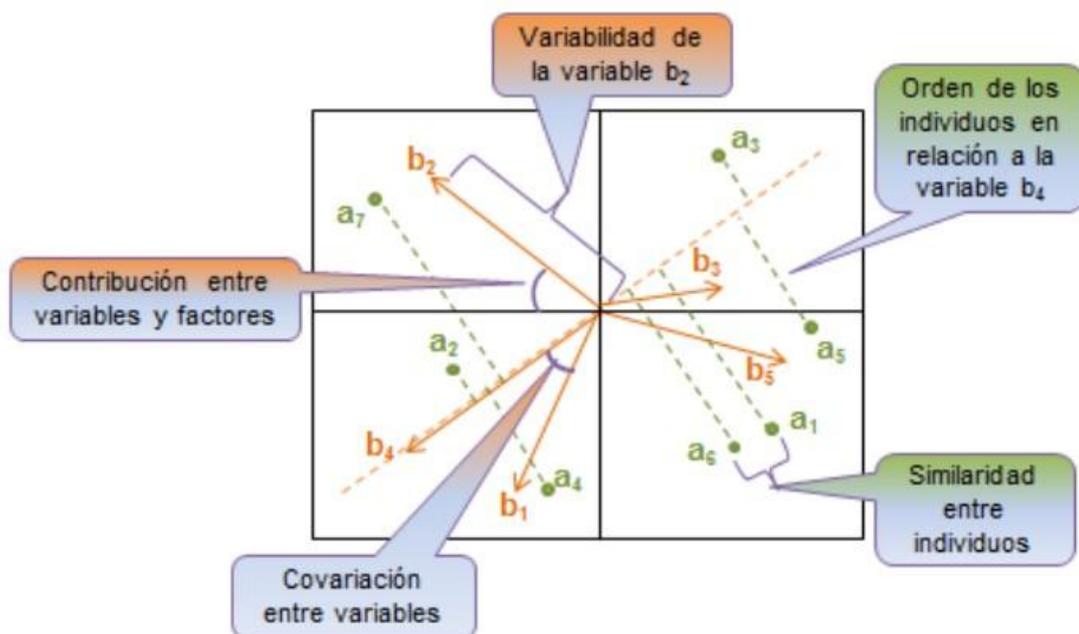


Figura 7. Interpretación geométrica de una representación Biplot.

Fuente: Medina Hernández, 2015.

En el HJ Biplot se ha calculado la variabilidad explicada y la calidad de representación de las variables.

El Biplot Canónico (Vicente Villardón, 1992; Amaro *et al.*, 2004) o MANOVA Biplot es un Biplot en el que grupos de sujetos establecidos a priori se representen separados con el máximo poder discriminante entre ellos mediante la proyección de las matrices de medias. Este tipo de Biplot, además de un análisis descriptivo, permite realizar otro inferencial ya que se representan las regiones de predicción (intervalos de confianza)

de la media (centroides) de los grupos sobre el gráfico. Estas regiones son siempre circulares ya que las distancias en el espacio euclídeo del gráfico se aproximan a las distancias de Mahalanobis en el espacio de partida.

Siguiendo a Varas *et al.*, 2005:

Supongamos que las n filas de la matriz \mathbf{X} están divididas en K grupos con n_k individuos cada uno y que dicha matriz se centra o estandariza por columnas. Sea \mathbf{X} la matriz que contiene las medias de cada grupo para cada variable, \mathbf{D}_n la matriz diagonal que contiene los tamaños de los grupos y \mathbf{W} y \mathbf{B} las matrices de covariación *dentro* y *entre* grupos:

$$\mathbf{W} = \frac{1}{n - k} (\mathbf{X}^t \mathbf{X} - \mathbf{X}^t \mathbf{D}_n \mathbf{X})$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{k - 1} (\mathbf{X}^t \mathbf{D}_n \mathbf{X})$$

Por tanto para obtener una representación Biplot de manera que los grupos estén separados con el máximo poder discriminante entre ellos, siendo $\mathbf{Y} = \mathbf{S}_{11}^{1/2} \mathbf{X} \mathbf{S}^{1/2}$ se puede obtener la representación Biplot de \mathbf{Y} : $\mathbf{Y} = \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{Q}^t$ donde \mathbf{P} y \mathbf{Q} son matrices ortogonales que contienen los vectores singulares y \mathbf{D} es la matriz diagonal que contiene los valores singulares en orden decreciente. A partir de esta ecuación se puede obtener el JK, GH y HJ Biplot Canónico.

La interpretación gráfica del Biplot Canónico es igual que en la Figura 7 salvo que además se representan los intervalos de confianza de las medias de los grupos (centroides). Cuando las proyecciones de dichos intervalos de confianza o regiones de predicción de dos grupos cualesquiera sobre alguna de las variables no se solapan significa que las medias de dichos grupos presentan diferencias significativas (ver la Figura 8).

El tipo de Biplot Canónico empleado en el presente trabajo es el JK, que permite proyectar gráficamente los sujetos sobre las variables y los representa con la máxima calidad, y el contraste utilizado para calcular las regiones de predicción es el ji-cuadrado (contraste multivariante). En los cuatro análisis se han estandarizado las variables, se ha calculado la varianza explicada, la bondad de ajuste de las variables para explicar a los grupos y la calidad de representación de los grupos.

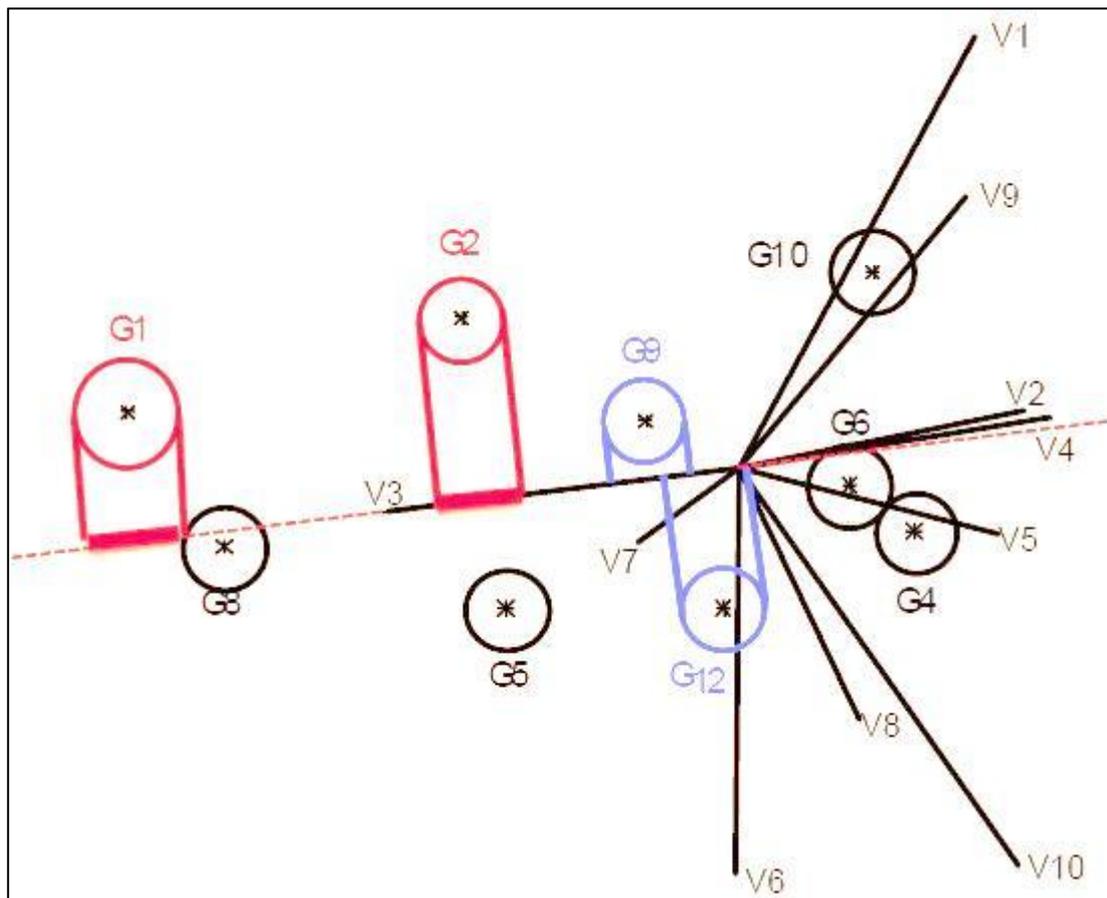


Figura 8. Proyección de los intervalos de confianza sobre la variable V3 en un Biplot Canónico. Las medias de los grupos G1 y G2 presentan diferencias significativas, mientras que las de los grupos G9 y G12 no.

Fuente: Vicente Tavera, 2016.

4.3.3. Estadística multivariante con datos de tres vías

Queremos analizar la evolución del crecimiento diametral según la altura del crecimiento radial que se considere. Para ello se ha realizado un Análisis Triádico (Jaffrenou, 1978) a partir de un cubo de datos de crecimientos anuales (ver Figura 9) con 5 filas, 10 columnas y 16 matrices correspondientes a distintos años (5, 10, 16).

La elección del Análisis Triádico frente a otros métodos similares que también permiten analizar trayectorias temporales se debe a que por un lado es más sencillo de interpretar que los modelos Tucker (Tucker, 1966) y que a diferencia del STATIS (L'Hermier Des Plantes, 1976), el Análisis Factorial Múltiple (Escoufier *et al.*, 1983) o el Metabiplot (Martín-Rodríguez *et al.*, 2002), que son métodos multitabla, el Análisis Triádico ha sido creado específicamente para trabajar con matrices de datos obtenidas

en distintos tiempos. Por ello no utiliza operadores sino que trabaja directamente con las matrices de datos originales evitándose así la pérdida de información.

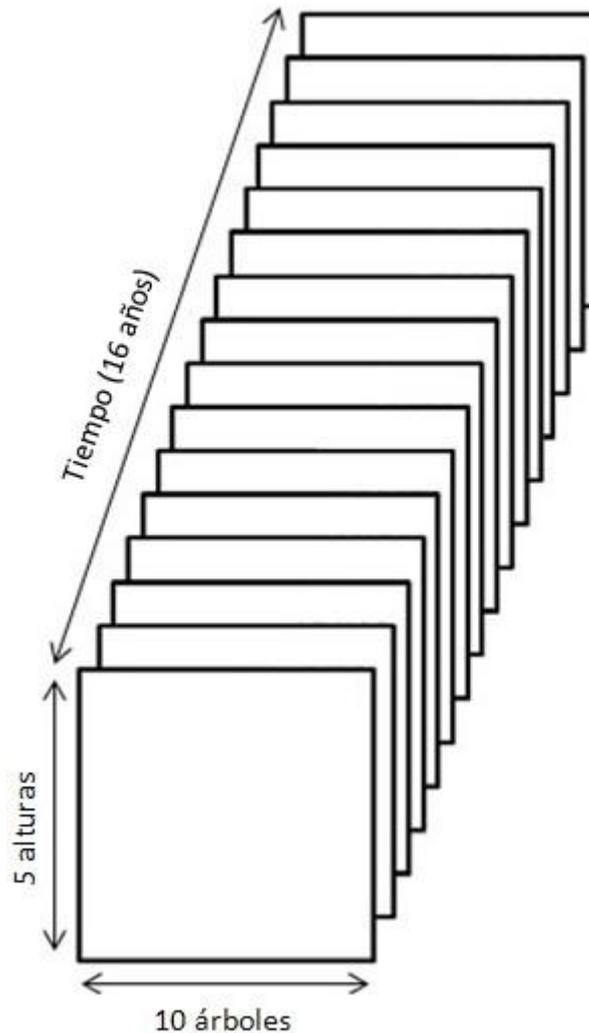


Figura 9. Cubo de datos sobre el que se ha realizado el Análisis Triádico. Son 16 matrices correspondientes a los crecimientos de 16 años. En cada una de ellas están los datos del crecimiento anual a distintas alturas del tronco de los diez árboles medidos.

Fuente: Elaboración propia.

Para no considerar los cambios en el crecimiento debidos a factores externos como el clima, se ha trabajado con medias móviles de 5 años de los crecimientos brutos, por lo que cada dato es la media del crecimiento correspondiente con los crecimientos de los cuatro años siguientes.

En la Tabla 3 se muestra la primera matriz de datos que se corresponden con la media de los crecimientos de los cinco primeros años (contando desde el centro de cada rodaja medida hacia el exterior). Igualmente la segunda matriz se corresponderá con

la media de los crecimientos que se dieron entre el segundo y el sexto año. Debido a las distintas edades a las que cada árbol llegó a las distintas alturas (basal, 1,3, 8, 12 y 15 metros) las fechas (años) en las que se produjeron estos crecimientos son distintas de un árbol a otro y de una altura a otra.

Se han utilizado 16 matrices, que como trabajamos con medias móviles de 5 años se corresponden con 20 crecimientos anuales, ya que esta es la longitud de la serie más corta tomada a 15 metros y a partir de ahí las matrices ya no estarían completas.

Tabla 3. Primera matriz de las 16 que componen el cubo de datos del Análisis Triádico.

	Árbol									
	4	19	25	33	42	47	53	56	58	72
Basal	113,9	113,9	236,5	61,8	55,3	47,3	135,3	121,5	113,3	28,1
1,3 m	320,6	320,6	421,4	510,5	300,5	397,5	312,8	328,2	325,7	289,7
8 m	161,9	250,1	358,1	297,3	381,3	241,1	139,6	363,7	263,2	173,0
12 m	203,3	212,6	185,5	217,1	219,0	163,1	219,5	160,3	214,0	186,8
15 m	95,1	175,9	235,9	215,5	133,0	163,9	124,7	150,9	127,7	139,6

Fuente: Elaboración propia.

Un Análisis Triádico (ATP) sobre el cubo de datos de la Figura 9 permite analizar la variabilidad altitudinal de los crecimientos y su dinámica en el tiempo. Siguiendo a Mendes *et al.*, 2011: este análisis se basa en el Análisis de Componentes Principales (ACP). Está diseñado para estudiar simultáneamente varias matrices de datos cuantitativos y detectar dentro de la estructura cualquier patrón común. El principio de funcionamiento general del ATP consiste en encontrar una matriz que sea consenso de todas las demás. El ATP realiza las siguientes etapas: análisis de la interestructura, que proporciona una descripción global de las matrices; construcción y análisis del compromiso, cuyo objetivo es resumir la información de las matrices originales en una sola; y estudio de la intraestructura, que permite interpretar las trayectorias de los sujetos sobre el compromiso.

Siguiendo a Medina Hernández, 2015, una trayectoria se define como el cambio en la posición de una variable (o individuo) a lo largo del tiempo o condiciones; de esta forma, una trayectoria con poca variación (envolvente) indica que dicha variable (o individuo) es estable en el tiempo. Si la trayectoria es excéntrica indica que la variable (o individuo) correspondiente no es estable a lo largo del tiempo o condiciones. En el primer tipo, que en la Figura 10 se representa en azul, los individuos siguen una evolución media, es decir, la diferencia entre el valor de cada individuo en cada tiempo

y la del individuo medio, es regular de un tiempo a otro. En las excéntricas por su parte, que son también conocidas como trayectorias de gran amplitud, se refleja cambio en la estructura del individuo en el transcurso del tiempo.

Si \mathbf{X}_t es el conjunto de matrices, tomando t un valor entre 1 y 16 según el año que se considere, el Análisis Triádico consiste en la construcción de una matriz \mathbf{Z} con 16 columnas donde la primera de ellas está formada por todas las columnas concatenadas de la matriz \mathbf{X}_1 , la segunda por todas las columnas de \mathbf{X}_2 y así sucesivamente. Posteriormente se realiza el ACP de \mathbf{Z} y de ahí se obtiene por un lado la interestructura y por otro, a partir de la primera componente, se obtienen las ponderaciones para construir el compromiso. Éste se calcula mediante una media ponderada de las tablas originales, utilizando como pesos los coeficientes del primer vector propio obtenido en el análisis de la interestructura. Siendo \mathbf{X}_c la matriz compromiso, \mathbf{Y}_c la matriz de componentes principales de \mathbf{X}_c con la que se obtiene la representación de los individuos compromiso e \mathbf{Y}_t el espacio compromiso sobre el que se puede proyectar cada matriz:

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{U}_{\mathbf{X}_c} \Delta_{\mathbf{X}_c}^{1/2} \mathbf{V}_{\mathbf{X}_c}^t$$

$$\mathbf{Y}_c = \mathbf{U}_{\mathbf{X}_c} \Delta_{\mathbf{X}_c}^{1/2} = \mathbf{X}_c \mathbf{V}_{\mathbf{X}_c}$$

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{X}_t \mathbf{V}_{\mathbf{X}_c}$$

En la Figura 10 se muestra el esquema del análisis de datos en el Análisis Triádico Parcial.

Se ha calculado la varianza explicada por el compromiso, las correlaciones entre las matrices, los pesos de cada operador en el compromiso y la calidad con la que el mismo reproduce las matrices originales (coseno²). Todos los análisis se han realizado utilizando el programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997), disponible en: <http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4>.

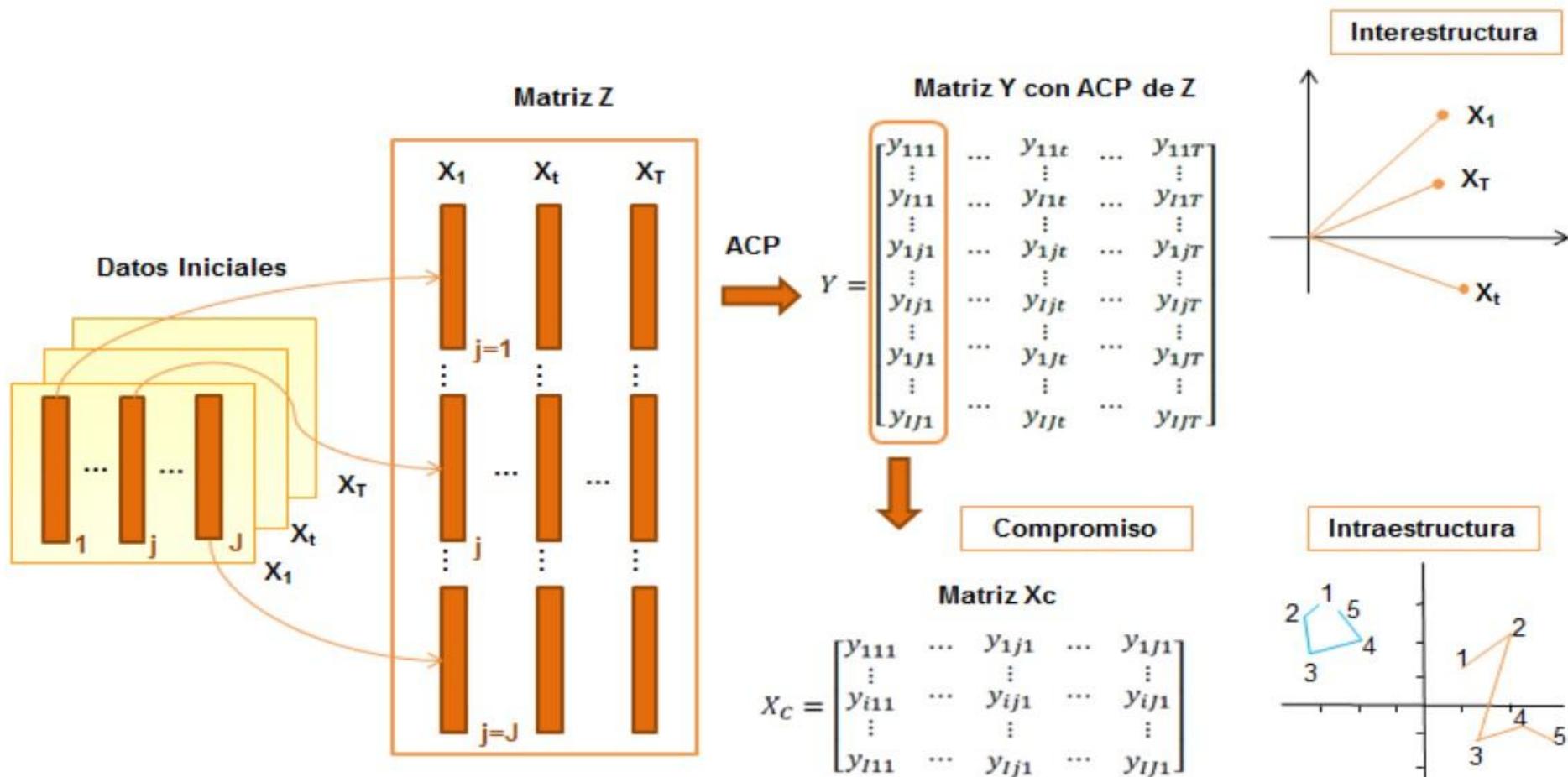


Figura 10. Esquema del análisis de datos en el Análisis Triádico Parcial.

Fuente: Medina Hernández, 2015, quien a su vez lo elaboró a partir de THIOULOUSE *et al.*, 2004; MENDES *et al.*, 2010; ROLLAND *et al.*, 2009; VICENTE GALINDO *et al.*, 2013.

Recientemente se ha desarrollado el paquete multibiplotGUI (Nieto *et al.*, 2015) de R (R Core Team, 2013) que permite realizar fácilmente un Biplot Múltiple (Baccalá, 2004; Nieto, 2015). Por ello se ha aprovechado esta circunstancia para realizar un análisis con el mismo cubo de datos de la Figura 9 y así poder comparar los resultados de esta técnica con los obtenidos con el ATP. El tipo de análisis empleado ha sido el HJ Biplot Múltiple ya que obtiene la máxima calidad de representación tanto para las filas como para las columnas.

Los pasos que realiza un Biplot Múltiple siguen el mismo esquema que el Análisis Factorial Múltiple (Escoufier *et al.*, 1983) pero empleando Biplots: (1) ACP de cada matriz; (2) ponderación de cada matriz por su primer valor propio; (3) realización del HJ Biplot conjunto sobre todas la matrices concatenadas unas debajo de otras.

En la Figura 11 se muestra el esquema de un Biplot Múltiple.

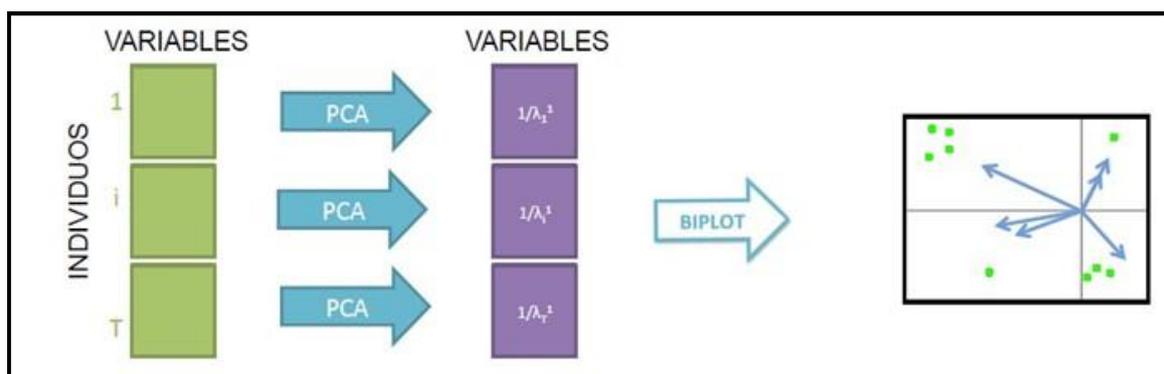


Figura 11. Pasos de un Biplot Múltiple.

Fuente: Modificado de NIETO, 2016.

Además sobre el HJ Biplot Múltiple se ha realizado un clúster jerárquico de 3 grupos siguiendo el Método de Inercia (Vicente Tavera, 1992; García-Talegón *et al.*, 1999). La inercia total, que para unos mismos datos permanece constante, está formada por la suma de las inercias dentro de las clases (suma de las distancias de cada elemento al centro de gravedad de su grupo calculadas con las coordenadas del Biplot) y la inercia entre clases (suma de las distancias de cada grupo al centro absoluto calculadas con las coordenadas del Biplot). El Método de Inercia busca minimizar la diferencia entre la inercia *dentro* antes de hacer un clúster y la inercia *dentro* después de crearlo de forma que se maximice la homogeneidad intracluster.



Se ha calculado la variabilidad explicada por el HJ Biplot.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Descripción de las cronologías

5.1.1. Cronologías brutas

Para el estudio de las series de crecimientos o cronologías, éstas se han agrupado en seis clases: por un lado las cronologías longitudinales y por otro las cronologías radiales divididas en cinco clases según la altura aproximada a la que se han obtenido en el tronco de cada árbol, base, altura normal (1´3 metros), 8, 12 y 15 metros. En las cronologías longitudinales sólo se han usado los datos de crecimientos posteriores al año 1930 debido a que la caracterización mostró que los datos de los años anteriores posiblemente fueran poco fiables.

En la Figura 12 se muestran los crecimientos medios anuales de cada grupo de cronologías radiales donde se ve una tendencia decreciente con la edad y se observa que tanto los valores máximos como los mínimos tienden a ser coincidentes en los mismos años. Sin embargo, en la Figura 13 se ve, además de la misma tendencia decreciente, como los máximos y mínimos de la serie de crecimientos longitudinales tiene un desfase de +1 año respecto a los valores máximos y mínimos de las series de crecimientos radiales.

Este desfase de un año entre crecimientos longitudinales y radiales se debe a que en las especies del género *Pinus* la longitud del crecimiento anual en altura de un año se encuentra bastante predeterminada en la yema que se ha formado el año anterior, de manera que si un año es climáticamente desfavorable, al siguiente año el crecimiento en altura será pequeño (Salminen *et al.*, 2009). Esta falta de plasticidad se ve parcialmente compensada aquellos años de clima favorable que han sido precedidos por un año desfavorable gracias a que no todo el crecimiento está predeterminado y gracias a la formación, en ramas vigorosas, de crecimientos secundarios durante el verano y el otoño, aunque estos siempre son de escasa longitud (Mutke, 2000).

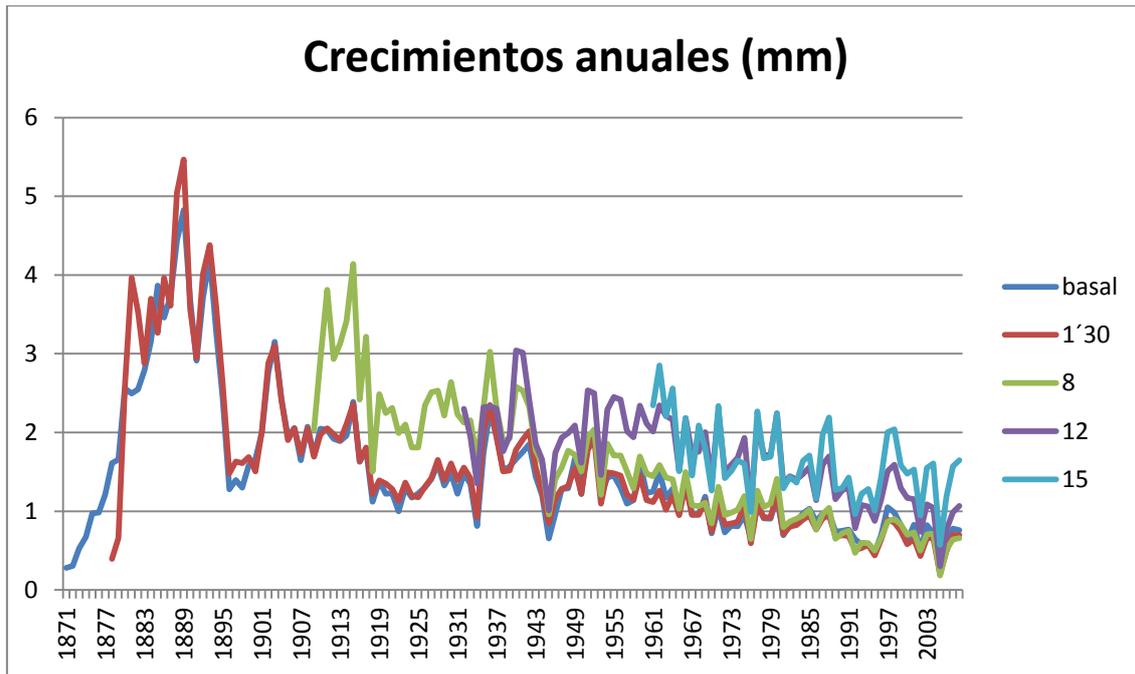


Figura 12. Crecimiento medio anual de los distintos grupos de cronologías radiales.

Fuente: Elaboración propia.

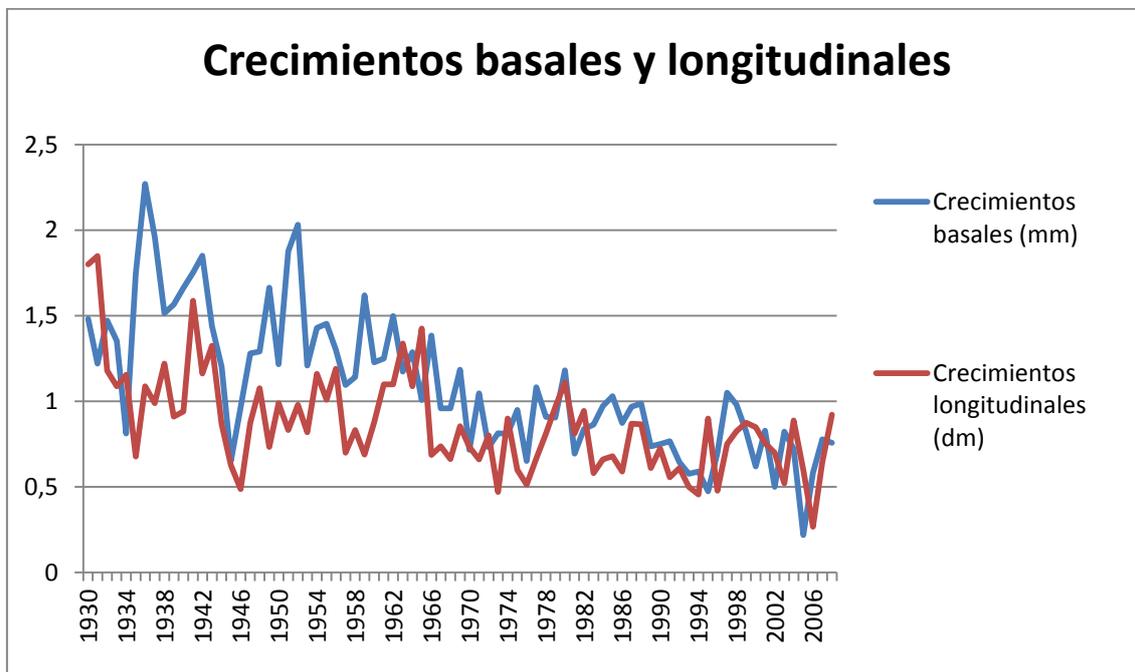


Figura 13. Comparativa en el periodo 1930-2008 entre los crecimientos radiales anuales medios basales en milímetros y los crecimientos longitudinales anuales medios en decímetros.

Fuente: Elaboración propia.

Hay que señalar que el crecimiento longitudinal se produce en un periodo de tiempo diferente al crecimiento radial. Aunque el inicio del crecimiento se produce más o

menos a la vez, el crecimiento longitudinal acaba antes. Larson, 1960, sugiere que cuando termina el crecimiento longitudinal es cuando empieza a formarse la madera tardía del crecimiento radial.

Usando el programa COFECHA se han obtenido una serie de estadísticos que se muestran en la Tabla 4. Estos estadísticos se han obtenido para las series completas y también para las mismas series a partir del año 1930 y del año 1961 para poder comparar las variaciones de las series a lo largo del tiempo.

Uno de los estadísticos obtenidos es el de la correlación media con la serie maestra de COFECHA. Según Grissino-Mayer, 2001, las correlaciones que se han obtenido de crecimiento radial cercanas a 0,8 y las de crecimiento longitudinal cercanas a 0,6 indican una buena o muy buena calidad de los datos (asignar correctamente una fecha a cada anillo es una tarea compleja debido a la presencia de dobles anillos o a años en los que no ha habido crecimiento, por ello, para obtener unos buenos datos con los que trabajar, es muy importante realizar una buena validación de las muestras tal y como se explica en el apartado 4.1).

El crecimiento medio, usando las series completas, se mantiene en un rango similar (1,47-1,63) para todos los grupos de cronologías. Sin embargo si usamos sólo los datos a partir del año 1930, y sobre todo a partir del año 1961, hay un aumento muy claro de crecimiento medio según subimos en la altura a la que se ha obtenido cada cronología debido, por un lado a que a mayor altura en el tronco de un árbol, menor será su diámetro y, suponiendo un mismo crecimiento anual en superficie o área basimétrica a lo largo de todo el fuste, a mayor diámetro, menor será el crecimiento radial, y por otro lado a que los crecimientos radiales no se producen todos al mismo tiempo sino que la activación fenológica de las partes más elevadas del tronco comienzan antes y terminan más tarde que en las inferiores, teniendo por tanto un periodo vegetativo mayor (Novak *et al.*, 2011). No obstante los crecimientos máximos son mayores en las partes inferiores del tronco cuando consideramos toda la serie. Como se observa en la Figura 14, en la que se representa el crecimiento medio de las series en los primeros 20 años, el crecimiento radial en la base es inferior al que se da a la altura normal y éste es a su vez superior a los que se dan a mayores alturas. Esto se debe a que el incremento anual en diámetro de un árbol va aumentando con los años hasta que llega a un máximo y empieza a decrecer. Este decaimiento se suele dar cuando se alcanza la clase de edad de fustal, es decir, cuando el diámetro a 1'3 metros es de 20 centímetros (Serrada, 2003).

Tabla 4. Descripción numérica de las cronologías, para el periodo completo (1871-2008), a partir de 1930 y a partir de 1961. ¹El año de inicio varía dentro de un rango para cada clase de cronología. Obviamente los diez árboles cogidos de muestra no han crecido exactamente igual por lo que alcanzaron las distintas alturas a diferentes edades. ²Correlación media con la serie maestra de COFECHA. ³Crecimiento medio: es la anchura media de los anillos de cada grupo de cronologías. ⁴Crecimiento máximo: es la anchura del mayor anillo de cada grupo de cronologías. ⁵Desviación típica media de los crecimientos de cada grupo de cronologías. ⁶Desviación típica media de los crecimientos una vez *estandarizados*. ⁷Autocorrelación. ⁸Sensibilidad media.

Cronología		¹ Año de inicio de las cronologías	² Corr.	³ Crec. Med. (mm)	⁴ Crec. Máx. (mm) ⁴	⁵ DT	⁶ DTE	⁷ Aut.	⁸ Sens.
Tipo	Altura (m)								
Radial	Basal	1871-1881	0,787	1,55	8,84	1.083	0,419	0,851	0,27
	1'30	1878-1890	0,789	1,49	11,95	1.142	0,434	0,846	0,267
	8	1909-1920	0,840	1,47	5,35	0,794	0,42	0,826	0,248
	12	1932-1955	0,875	1,63	4,65	0,593	0,458	0,58	0,261
	15	1961-1991	0,885	1,54	3,88	0,482	0,53	0,231	0,312
Long.		1930	0,613	90	310	34	0,568	0,268	0,363
Radial	Basal	1930	0,833	1,12	4,59	0,507	0,452	0,687	0,275
	1'30	1930	0,813	1,07	5,08	0,512	0,464	0,695	0,271
	8	1930	0,844	1,3	4,47	0,653	0,431	0,801	0,254
	12	1932-1955	0,875	1,63	4,65	0,593	0,458	0,58	0,261
	15	1961-1991	0,885	1,54	3,88	0,482	0,53	0,231	0,312
Long.		1930	0,613	90	310	34	0,568	0,268	0,363
Radial	Basal	1961	0,839	0,88	2,5	0,313	0,489	0,528	0,28
	1'30	1961	0,838	0,8	3,06	0,28	0,5	0,476	0,286
	8	1961	0,852	0,92	2,29	0,345	0,472	0,576	0,278
	12	1961	0,899	1,46	4,53	0,509	0,488	0,521	0,273
	15	1961	0,885	1,54	3,88	0,482	0,53	0,231	0,312
Long.		1961	0,567	80	220	29	0,588	0,191	0,384

Fuente: Elaboración propia.

La desviación típica más útil para analizar los crecimientos es aquella en la que las series han sido *estandarizadas* (según COFECHA, ver el apartado 4.1.2) de manera que su media es cero. En principio a mayor desviación típica de las series *estandarizadas*, mayor es la variabilidad y mayor es la sensibilidad media de las series a las variables ambientales, al contrario que la autocorrelación de las series brutas (no *estandarizadas*), que cuanto mayor es, los crecimientos anuales se ven más influidos por los crecimientos del año inmediatamente anterior y menos por las variables ambientales del año correspondiente. La sensibilidad media corresponde al cambio medio de cada ancho de anillo con respecto al siguiente; tomará valores mayores que cero cuando las series analizadas sean sensibles o presenten variaciones de

importancia y serán más complacientes a medida que su valor se acerque a cero. Así los valores más altos indican un sitio con mejores características para estudios dendrocronológicos (Urrutia, 2002). Una sensibilidad media superior a 0,20 se considera bastante apropiada para analizar la señal climática (Speer, 2010). Viendo la Tabla 4 se aprecia que utilizando el periodo 1961-2008, respecto a utilizar el periodo completo, aumenta la desviación típica y la sensibilidad y sobre todo disminuye la correlación. Además los crecimientos a mayor altura y los longitudinales son los que presentan mejores valores de los estadísticos con diferencia: alta sensibilidad y desviación y muy baja autocorrelación que indican una fuerte respuesta a los cambios del clima (ver Figura 15 y Figura 16). Estudios anteriores también muestran mejores estadísticos, sobre todo en las masas jóvenes, en el crecimiento longitudinal que en el radial debido a una menor dependencia de esos últimos al valor del crecimiento del año previo (Salminen *et al.*, 2009). Este autor sugiere que un año favorable para el crecimiento seguido de otro desfavorable dará como resultado dos crecimientos radiales de magnitud similar mientras que darán un buen crecimiento longitudinal y otro malo (con un año de desfase respecto al crecimiento radial) porque las reservas acumuladas en el año favorable sólo son usadas para el crecimiento radial, y no para el longitudinal, en el año desfavorable.

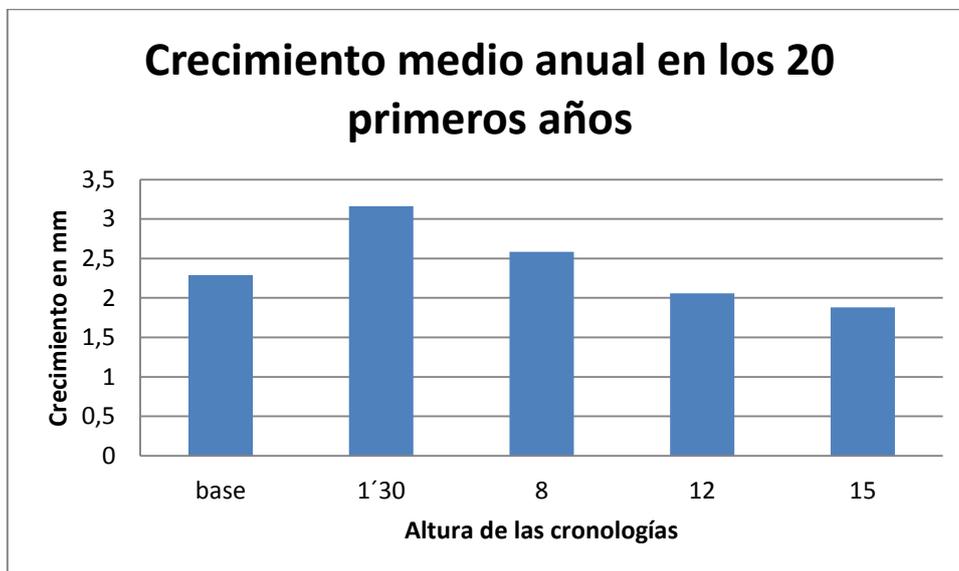


Figura 14. Media de crecimiento anual en los primeros 20 años de las series agrupadas por alturas.

Fuente: Elaboración propia.

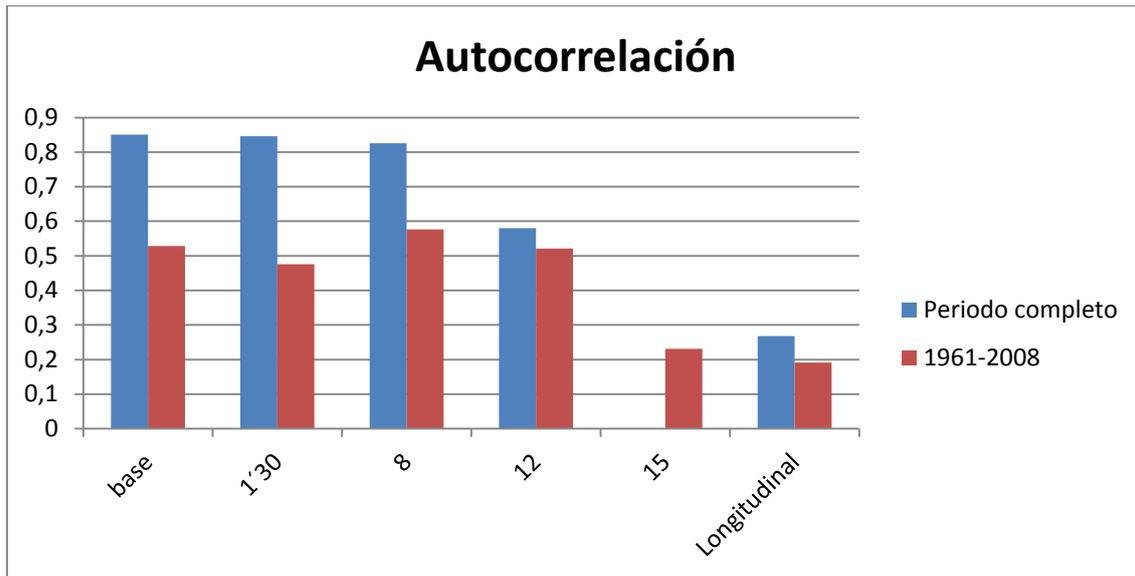


Figura 15. Autocorrelación media de los distintos grupos de cronologías.

Fuente: Elaboración propia.

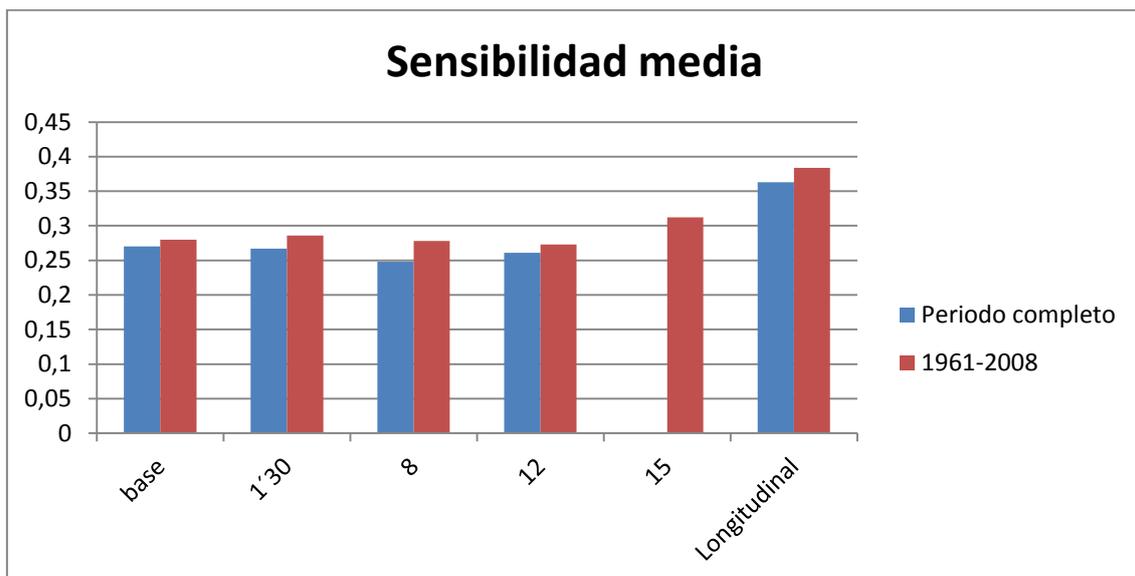


Figura 16. Sensibilidad media de los distintos grupos de cronologías.

Fuente: Elaboración propia.

En un principio, con estos datos, se podría decir que las mejores series para analizar la señal climática son la radial a elevadas alturas y sobre todo la longitudinal, al ser éstas las que aparentemente se ven más influidas por las condiciones ambientales y por tanto expresarán mejor dicha señal. No obstante hay que considerar que el crecimiento en altura incluye la señal climática de dos años.

5.1.2. Cronologías estandarizadas

En la Figura 17 se muestra uno de los resultados al *estandarizar* con el programa ARSTAN las series de crecimientos brutos.

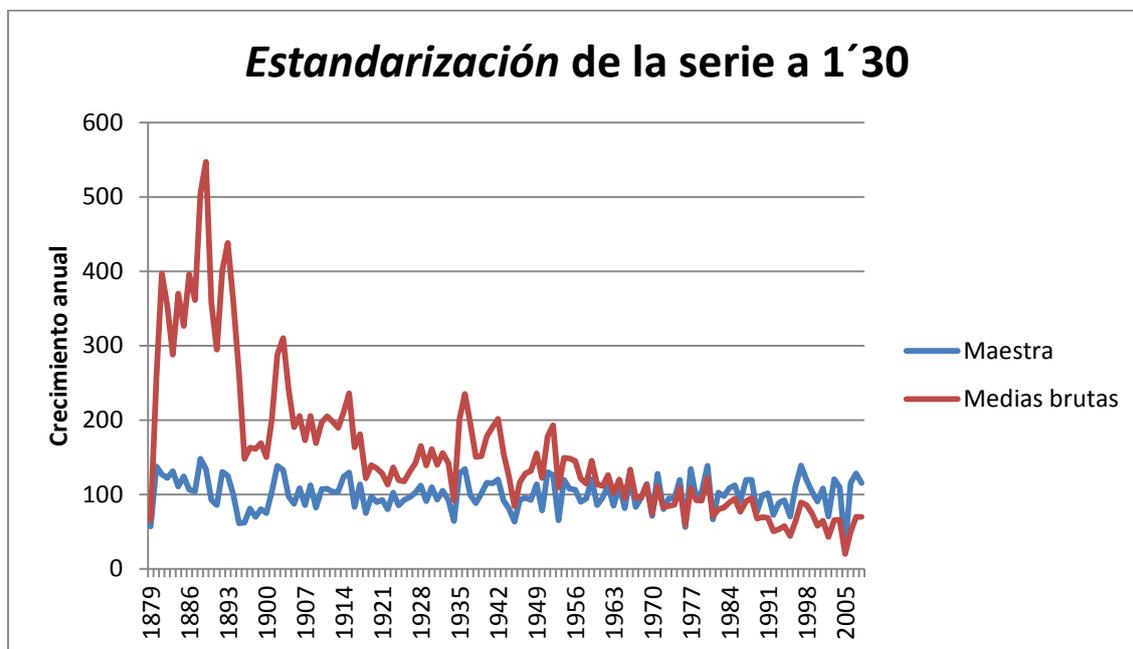


Figura 17. Crecimiento medio anual bruto (no *estandarizado*) en centésimas de milímetro de las series obtenidas a una altura de 1'30 metros con su correspondiente cronología maestra.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez *estandarizadas* las series de crecimientos y obtenidas las series maestras la sensibilidad media es similar en todas ellas aunque sigue siendo superior en la cronología maestra longitudinal (ver Tabla 5). Esta sensibilidad es similar a la obtenida en estudios previos de *Pinus pinaster* (Richter *et al.*, 1991). Además de la sensibilidad media en la Tabla 5 se analizan los estadísticos relación señal-ruido, señal de la población y varianza compartida.

Al contrario que la sensibilidad media, el resto de estadísticos, aunque son notablemente buenos en todos los casos (Bogino *et al.*, 2008), son peores en la cronología longitudinal. Esto se debe a que, aunque como se ha dicho más arriba en la descripción de las cronologías brutas (apartado 5.1.1) las series longitudinales presentan mayor sensibilidad y no se ven influidas por el crecimiento longitudinal del año anterior, sus crecimientos presentan un componente aparentemente más aleatorio que los crecimientos radiales debido a que en los crecimientos longitudinales influirán

factores que no serán comunes a todos los árboles de la muestra como pueden ser las condiciones particulares del micrositio (Ramírez-Contreras *et al.*, 2004; Pensa *et al.*, 2005). A esto hay que sumar la dificultad para reconstruir en campo el crecimiento en altura a partir de los nudos, que hace que el error sea mayor al producido en las mediciones de los crecimientos radiales hechas en laboratorio.

Para evitar confusiones hay que aclarar que no es lo mismo el que los crecimientos longitudinales no se vean influenciados por el crecimiento del año anterior (como ya se ha indicado al hablar de los estadísticos de la Tabla 4, página 49), como así es, a que no se vean influenciados por el clima del año anterior. Como ya se ha discutido al comentar la Figura 13 (página 47) en el crecimiento longitudinal influye el clima del año del crecimiento y sobre todo el clima del año anterior.

Por otro lado las cronologías radiales presentan mejores estadísticos según es mayor la altura a la que se ha obtenido la serie, por tanto a mayor altura dentro del tronco de los árboles mejor será la correspondencia entre crecimiento radial y condiciones ambientales. Esto confirma lo aportado por otros estudios en otras especies y latitudes (Kerhoulas *et al.*, 2011).

Tabla 5. Estadísticos de las cronologías maestras. Los estadísticos para la cronología obtenida a 15 metros no se han obtenido debido a lo poco fiables que serían por su escasa longitud.

	Basal	1'30	8	12	Longitudinal
Sensibilidad media	0,2458	0,2382	0,224	0,2381	0,2643
Relación señal-ruido	11,335	14,403	16,793	32,14	9,759
Señal de la población	0,919	0,935	0,944	0,97	0,907
Varianza compartida	60,20%	64,82%	70,71%	79,64%	54,61%

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Relaciones entre clima y crecimiento siguiendo las técnicas tradicionales

Con el programa DendroClim (Biondi *et al.*, 2004) se han obtenido las correlaciones que son significativas con un nivel de confianza del 95% entre los crecimientos

adimensionales de las series maestras y las variables climáticas del año de crecimiento y del año previo.

La variable climática que más influye en el crecimiento de *Pinus pinaster* en la zona de estudio es la precipitación (Bogino *et al.*, 2008). En la Tabla 6 se muestran las correlaciones entre la precipitación mensual y las cronologías. La interpretación de estos datos es la siguiente (para nombrar a los meses se han empleado en el texto las mismas abreviaturas que en la Tabla 6, utilizando minúsculas para el año previo al del crecimiento y mayúsculas para el propio año del crecimiento):

- Todas las correlaciones son positivas: a mayor precipitación, mayor crecimiento.
- Las precipitaciones que influyen sobre el crecimiento longitudinal son completamente diferentes a las que influyen sobre el crecimiento radial de tal manera que se puede dar el caso de que haya muy buenas condiciones pluviométricas para el crecimiento en altura, pero esas mismas condiciones sean menos favorables para el crecimiento en diámetro.
- En el crecimiento en altura la precipitación que más influye es la de febrero del año anterior al del crecimiento (f). La explicación más probable es que ese mes es justo el anterior al de la activación fenológica. Aunque el inicio del crecimiento suele ser en abril o mayo (Miguel *et al.*, 2002) para unas condiciones climáticas similares a las de la parcela de donde se han extraído las muestras, la activación fenológica suele empezar un mes antes mediante el hinchado e inicio de apertura de las yemas. Esta correlación se puede traducir en que el modo de empezar el año influirá en el desarrollo de las yemas apicales, las cuales tienen el crecimiento preformado del año siguiente.
- Otras precipitaciones que influyen en el crecimiento en altura son las del mes de septiembre del año anterior (s) y del mes de marzo del mismo año del crecimiento (M). En las especies del género *Pinus* policíclicas como *Pinus pinaster* el llamado crecimiento de otoño (referido a crecimientos longitudinales) se produce realmente durante el verano (Mutke, 2000), pudiéndose alargar o retomar en algunos casos hasta el otoño. Cuestión diferente es la del crecimiento diametral de otoño, en cuyo caso sí es correcta la expresión ya que éste suele parar durante los meses de verano y retoma el crecimiento al final del verano y en otoño (Miguel *et al.*, 2002). La presencia de lluvias en septiembre (s) puede traducirse en un beneficio para la formación de

la yema apical de la tirada o crecimiento longitudinal de verano en aquellos años en los que haya habido policiclismo.

En cuanto a las lluvias del mes de marzo del mismo año del crecimiento (M), éstas son las que se producen justo durante la activación fenológica.

- En el crecimiento en diámetro prácticamente influyen todos los meses de otoño e invierno anteriores al inicio del crecimiento (n, d, E, F), lo que permite tener una reserva de agua en el suelo para el inicio de la primavera. Enero (E) es el mes más importante de todos ellos posiblemente porque, sabiendo que este mes es el que tiene las temperaturas anuales más bajas, aquellos años en los que dicho mes sea lluvioso, además de aumentar el agua retenida en el suelo, las temperaturas serán más suaves.
- Los meses de abril, mayo, junio y julio (A, M, J, JL) también influyen sobre el crecimiento diametral, siendo mayo el mes más importante.
- La correlación entre crecimientos radiales y la precipitación es semejante pero no igual en todas las alturas. Los meses de febrero, marzo, abril, junio y julio (F, M, A, J, JL) no son significativos para todas las alturas. Además este comportamiento no parece aleatorio al estar siempre agrupados los meses significativos (ver las elipses punteadas en la Tabla 6).
- Entre febrero y junio (F, M, A, J) las correlaciones significativas entre las precipitaciones y el crecimiento radial se desplazan desde la cronología basal a la cronología a 15 metros, invirtiéndose este desplazamiento en julio (JL). Esto probablemente se deba a que el crecimiento radial generalmente empieza en la copa, que es donde se produce la savia elaborada, y va descendiendo hasta la base del árbol. Igualmente el crecimiento radial termina antes en la base que en el ápice. Incluso en los años especialmente secos entre enero a mayo el crecimiento puede producirse sólo en la copa y no en la base (Novak *et al.*, 2011). Por tanto los meses más importantes para el crecimiento radial en la base son aquellos que garanticen suficiente agua al principio (para acelerar el comienzo del crecimiento) y al final (para ampliar el periodo de crecimiento) del periodo vegetativo, mientras que para el crecimiento radial en altura son más importantes los meses intermedios (A, MY, J).

Tabla 6. Correlaciones significativas entre las cronologías maestras y la precipitación mensual. Las elipses punteadas marcan las agrupaciones.

		Año anterior al crecimiento											Año del crecimiento															
		e	f	m	a	my	j	jl	ag	s	o	n	d	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	O	N				
P	Long.	0,35									0,24																	
	15												0,31	0,25	0,39			0,22										
	12												0,24	0,19	0,37	0,25	0,25	0,34	0,35	0,29								
	8												0,25	0,21	0,41	0,21	0,26	0,25	0,31									
	1'30												0,28	0,23	0,37	0,21	0,25			0,34								
	Basal												0,34	0,27	0,37	0,23	0,27			0,30								

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla, la Tabla 7, se presentan las correlaciones entre la temperatura media mensual y las cronologías de crecimientos. La interpretación de los resultados es la que sigue (para nombrar a los meses se han empleado en el texto las mismas abreviaturas que en la Tabla 7, utilizando minúsculas para el año previo al del crecimiento y mayúsculas para el propio año del crecimiento):

- Hay correlaciones positivas y negativas. Dependiendo del mes el crecimiento puede ser mayor con altas o con bajas temperaturas.
- Hay independencia entre las variables que influyen en el crecimiento longitudinal y las que influyen en el radial.
- La temperatura media mensual que más influye sobre el crecimiento longitudinal es la de julio del año en el que se presenta el crecimiento (JL). La relación es negativa. Los meses de julio con temperaturas moderadas es más probable que se produzca un segundo crecimiento (tirada de verano).
- También influyen sobre el crecimiento longitudinal las temperaturas de agosto y septiembre del año anterior al del crecimiento (ag, s). En este caso la relación es positiva. Posiblemente esto se deba a que en aquellos meses de agosto con temperaturas moderadas, en los cuales continua el crecimiento longitudinal, hay una elevada probabilidad de producirse repentinos ascensos de la temperatura provocando una parada vegetativa precipitada sin que se hayan formado correctamente las yemas. Por lo tanto, meses de agosto y septiembre cálidos obligan a los árboles a comenzar antes el reposo estival sin peligro de que se produzcan estas situaciones. En cuanto a septiembre (s), en el climodiagrama (Figura 5, página 20) se ve que es un mes en el que ya empiezan a bajar las temperaturas. Quizá esta correlación se deba a que un periodo de bajas temperaturas en el mes de septiembre podría dañar las yemas que todavía no estén lo suficientemente endurecidas.

- Para el crecimiento diametral lo que prima es unas temperaturas moderadas con inviernos suaves (relación positiva entre temperaturas y crecimientos en los meses de noviembre, n, y diciembre, d, del año anterior al del crecimiento y en los de enero, E, y febrero, F, del año de crecimiento) y con primaveras y veranos frescos (meses de mayo, MY, y julio, JL, con relación negativa). El beneficio de primaveras y veranos frescos es muy intuitivo (poca evapotranspiración, mayor duración del periodo vegetativo, etc.) pero no lo es tanto el beneficio que reporta el que el invierno y otoño justo anterior al comienzo del crecimiento sea suave ya que estos meses los árboles se encuentran en parada vegetativa. A parte de los daños que se pueden producir en los tejidos vivos en los inviernos demasiado fríos, una posible explicación es la influencia que las lluvias tienen sobre las temperaturas, suavizándolas, y como ya se explicó, un otoño e invierno lluvioso suponen un aumento de la retención del agua en el suelo.
- Un mes de septiembre (S) en el que no bajen mucho las temperaturas (relación positiva entre temperatura y crecimiento) beneficia el crecimiento otoñal en diámetro.
- En noviembre del año de crecimiento (N) hay una relación negativa entre temperatura y crecimiento otoñal, es decir, a noviembre más fríos mayor crecimiento ese mismo año. Esta relación es muy difícil de explicar ya que algunos años en noviembre puede continuar el crecimiento radial y unas temperaturas muy frías no parece que puedan beneficiar este crecimiento. Sin embargo esta relación aparece en tres de las cronologías radiales por lo que seguramente no sea fruto del azar. Además en otros estudios similares se da el mismo tipo de relación (Río *et al.*, 2014).
- Igual que con la precipitación, la correlación entre crecimientos radiales y la temperatura media mensual es semejante pero no igual en todas las alturas. También en este caso se agrupan los datos lo que nos inclina a pensar que no es un comportamiento aleatorio.

Tabla 7. Correlaciones significativas entre las cronologías maestras y la temperatura media mensual. Las elipses punteadas marcan las agrupaciones.

		Año anterior al crecimiento											Año del crecimiento																		
		e	f	m	a	my	j	jl	ag	s	o	n	d	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	O	N							
T	Long.	0,17 0,21																													
	15												0,31	0,43				0,32	-0,28			-0,35			0,42			-0,27			
	12												0,28	0,29	0,35					-0,38						0,26			-0,28		
	8													0,30	0,30	0,32					-0,38			-0,21			0,23			-0,24	
	1'30													0,27	0,37	0,32	0,33					-0,38						0,27			
	Basal													0,30	0,39	0,35	0,35					-0,32						0,26			

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Relaciones entre clima y crecimiento utilizando técnicas multivariantes

5.3.1. HJ Biplot

Para realizar un análisis visual de las correlaciones entre las cronologías maestras de crecimientos se ha realizado un HJ Biplot a partir de una matriz de seis columnas (las cronologías maestras de los crecimientos radiales obtenidos en la base, a 1'3, 8, 12, 15 metros de altura y la de los crecimientos longitudinales) y 76 filas (los años en los que se han producido los crecimientos, de 1933 a 2008). Los resultados se muestran en la Tabla 8 y la Figura 18. La variabilidad explicada es del 95 % entre los dos primeros ejes, siendo el eje horizontal el que explica casi toda la variabilidad de los crecimientos radiales y un 78'3 % de la variabilidad total.

Como se observa en la Figura 18 la cronología basal y la obtenida a 1'3 metros de altura son prácticamente iguales. Igualmente las series obtenidas a 8, 12 y 15 metros son muy parecidas, siendo la que más se separa del crecimiento basal la serie de 12 metros, aunque hay que tener en cuenta que, como ya se comentó en la página 34 (apartado 4.3.2), en la serie de 15 metros se utilizó (para sustituir los datos faltantes) la media del resto de cronologías radiales entre los años 1933 y 1961. Se confirma lo visto en la Tabla 6 y la Tabla 7 donde las correlaciones con el clima se van haciendo más diferentes según se sube en altura en el tronco. Además la cronología longitudinal es casi perpendicular a las radiales. Como se vio en la Figura 13 en los dos tipos de crecimientos influyen factores diferentes: mientras que en los crecimientos

longitudinales la principal influencia se debe al clima del año previo en los radiales de debe al clima del año del crecimiento.

Tabla 8. Calidad de representación de las variables del HJ Biplot.

	Eje 1	Eje 2
Basal	868	916
1'3 m	937	966
8 m	956	958
12 m	922	928
15 m	944	944
Longitudinal	71	990

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultBiplot (Vicente Villardón, 2015).

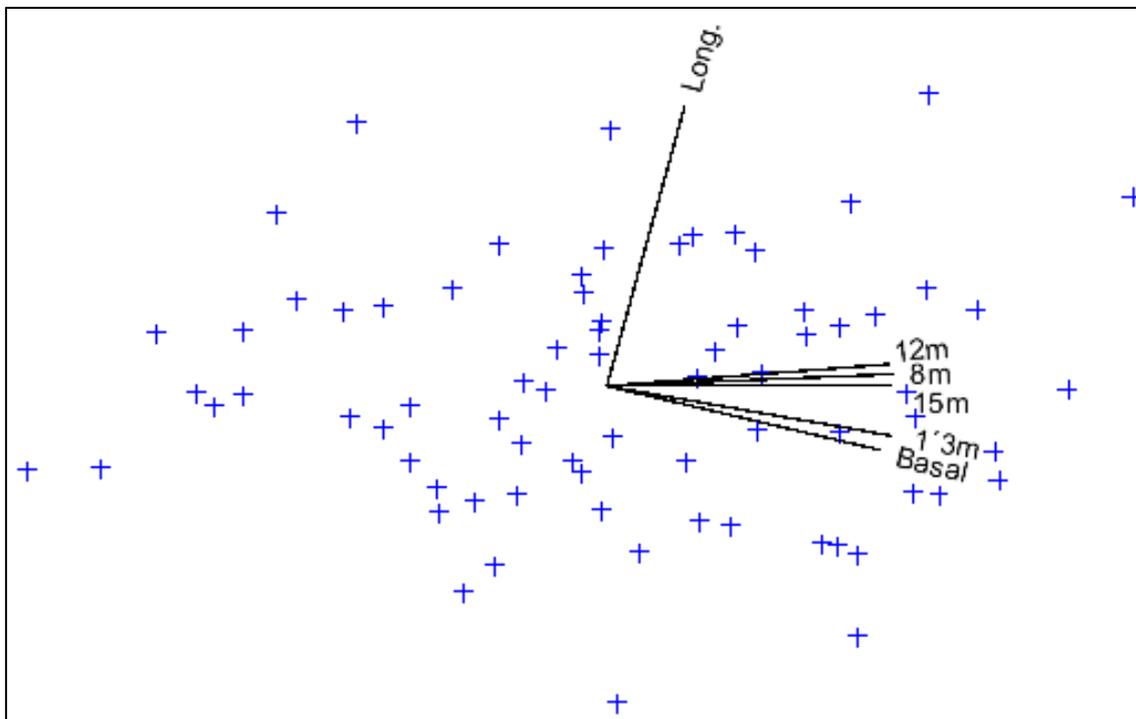


Figura 18. HJ Biplot de las cronologías maestras correspondientes a los crecimientos longitudinales y radiales en la base, a 1'3, 8, 12 y 15 metros de altura.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultBiplot (Vicente Villardón, 2015).

5.3.2. Biplots Canónicos

Como se ha visto en el HJ Biplot, los crecimientos radiales se pueden agrupar en Basal y 1'3 metros por un lado y 8, 12 y 15 metros por el otro, siendo el basal y el de

12 metros los más diferentes, por lo que los grupos que buscamos discriminar en los Biplots Canónicos se basan en estos dos últimos (ver el apartado 4.3.2).

En la Figura 19, la Tabla 9 y la Tabla 10 se muestran los resultados gráficos y numéricos del Biplot Canónico con el que se quiere ver la relación entre las temperaturas y los crecimientos radiales. La matriz de datos de partida contiene 76 filas, los años en los que se han producido los crecimientos, de 1933 a 2008, y 15 columnas, empleando como variables las temperaturas mensuales desde septiembre del año anterior (tsep, toct, tnov, tdic) hasta noviembre del año del crecimiento (Tene, Tfeb, Tmar, Tabr, Tmay, Tjun, Tjul, Tago, Tsep, Toct, Tnov). Se ha buscado discriminar los cuatro grupos siguientes: GR1 está formado por aquellos años en los que los crecimientos radiales promedio de todas las cronologías son superiores a la media y la cronología maestra basal es superior a la cronología maestra obtenida a 12 metros de altitud; GR2 es como el anterior pero con crecimientos radiales promedio inferiores a la media; GR3 está formado por los años en los que los crecimientos radiales promedio son inferiores a la media y la cronología maestra basal es inferior a la obtenida a 12 metros de altitud; GR4 son los años con crecimientos promedio superiores a la media y con la cronología maestra basal inferior a la de 12 metros. De esta manera podremos determinar qué caracteriza al clima de aquellos años en los que el crecimiento general es bueno (grupos 1 y 4) o malo (grupos 2 y 3) y a aquellos años en los que el mejor crecimiento se da en la base del tronco (grupos 1 y 2) o a mayores alturas (grupos 3 y 4), con lo que veremos las diferentes relaciones del clima con los crecimientos radiales a distintas alturas. En el plano formado por los dos primeros ejes se explica el 86 % de la variabilidad total, un 66 % en el primero y un 20 % en el segundo. Para nombrar a los meses se han empleado, tanto en el texto como en las tablas y en la figura, las mismas abreviaturas, utilizando minúsculas para el año previo al del crecimiento y poniendo la primera letra en mayúsculas para el propio año del crecimiento.

Los grupos 1 y 4 se diferencian por la temperatura de septiembre del año previo (tsep) y por la de agosto del año del crecimiento (Tago) y, aunque no son significativas, también se diferencian por las de octubre, noviembre y diciembre del año previo (toct, tnov, tdic) y las de mayo, septiembre y noviembre del año del crecimiento (Tmay, Tsep, Tnov). En cuanto a los grupos 2 y 3, no hay diferencias significativas entre ellos (ni en este plano ni en los otros posibles), pero sí con los otros dos grupos, de los cuales se diferencian conjuntamente por las temperaturas de enero y febrero del año del crecimiento (Tene, Tfeb). Además individualmente también se diferencian de uno

de los otros dos grupos por las temperaturas de octubre, noviembre y diciembre del año previo (toct, tnov, tdic) y las de abril, mayo, junio, septiembre y noviembre del año del crecimiento (Tabr, Tmay, Tjun, Tsep, Tnov). La interpretación de estos datos es la siguiente:

- Tal y como se vio en la Tabla 7 (página 58) los años de temperaturas moderadas con inviernos suaves (temperaturas altas en noviembre, tnov, y diciembre, tdic, del año previo y en enero, Tene, y febrero, Tfeb, del año del crecimiento) y primaveras y veranos frescos (temperaturas bajas en mayo y junio, Tmay y Tjun) benefician el crecimiento.
- Igualmente septiembrés (Tsep) cálidos y noviembres (Tnov) fríos benefician el crecimiento.
- También, como se vio en la Tabla 7, los crecimientos basales están más relacionados con las temperaturas de noviembre, tnov, y diciembre, tdic, del año previo (a mayor temperatura, mayor crecimiento) y la cronología de 12 metros está más relacionada con las temperaturas de septiembre, Tsep, y noviembre, Tnov, del año del crecimiento (a mayor temperatura en septiembre y menor en noviembre mayor es el crecimiento).
- Sin embargo el Biplot aporta una información adicional: hay diferencias significativas entre los valores que toman las temperaturas según se produzcan los mayores crecimientos en la cronología basal o en la de 12 metros y estas diferencias se dan en la temperatura de septiembre del año previo, tsep, y la de agosto del año del crecimiento, Tago, beneficiando las mayores temperaturas el crecimiento en la parte alta del tronco. Debido a que el crecimiento en diámetro comienza en la parte superior del tronco (Novak *et al.*, 2011), periodos vegetativos cortos, como el que se puede producir en otoño, beneficiarán sobre todo esas partes altas, tanto por el propio crecimiento que se produce en el año como en la acumulación de nutrientes en la zona que aumentará el crecimiento del siguiente. El beneficio de las temperaturas altas en agosto no podemos explicarlo aunque es algo que también se detectó empleando la metodología clásica.

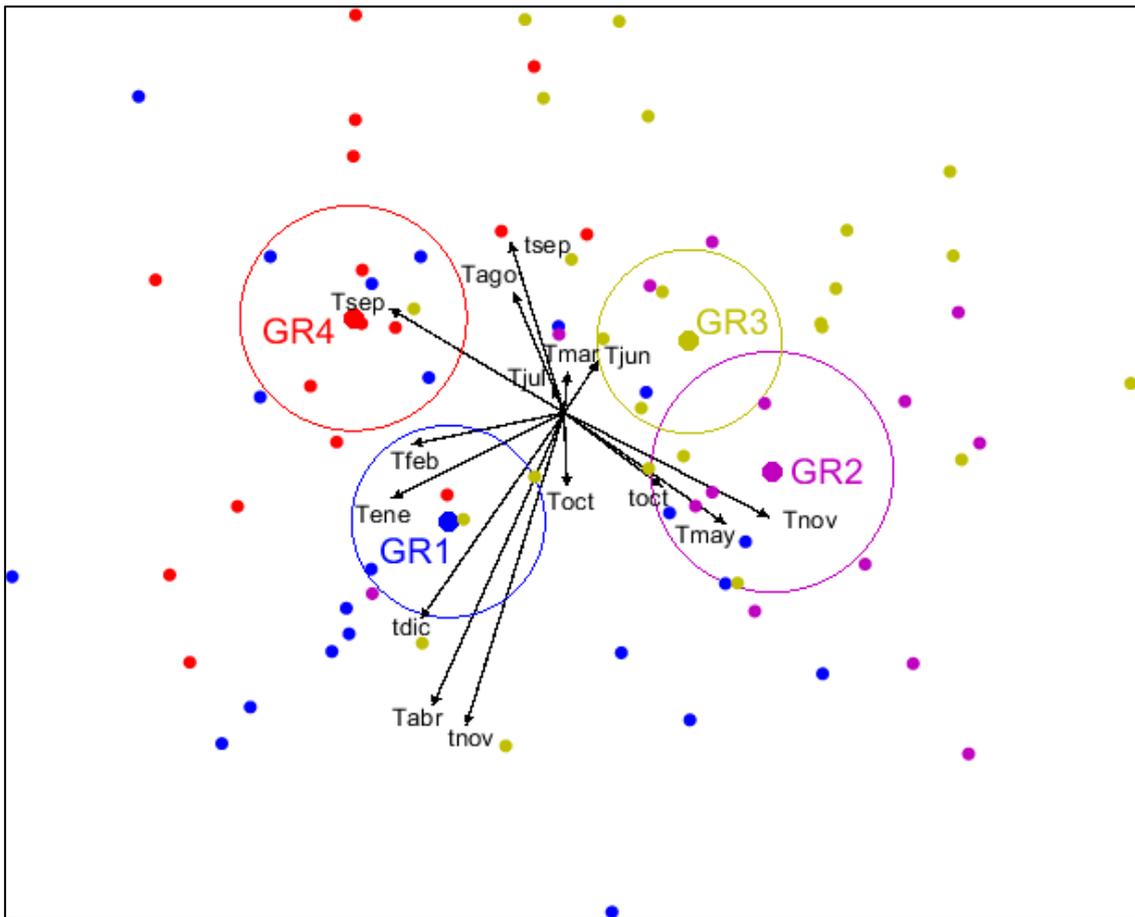


Figura 19. Ejes I y II del primer Biplot Canónico empleando como variables las temperaturas mensuales desde septiembre del año anterior hasta noviembre del año del crecimiento discriminando los cuatro grupos ya referidos en el texto.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultiBiplot (Vicente Villardón, 2015).

Tabla 9. Calidad de representación de los grupos del primer Biplot Canónico.

	Eje 1	Eje 2
GR1	0,487	0,436
GR2	0,722	0,059
GR3	0,606	0,199
GR4	0,761	0,155

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultiBiplot (Vicente Villardón, 2015).

Tabla 10. Bondad de ajuste acumulada de las variables para explicar a los grupos del primer Biplot Canónico.

	Eje 1	Eje 2
Tsep	0,198	0,795
Toct	0,708	0,828
Tnov	0,225	0,904
Tdic	0,619	1
Tene	0,831	0,893
Tfeb	0,987	1
Tmar	0,029	0,069
Tabr	0,368	0,912
Tmay	0,806	0,920
Tjun	0,575	0,967
Tjul	0,002	0,073
Tago	0,346	0,933
Tsep	0,829	0,918
Toct	0,002	0,363
Tnov	0,928	0,999

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultBiplot (Vicente Villardón, 2015).

Para ver la relación entre las precipitaciones y los crecimientos radiales se ha realizado otro Biplot Canónico a partir de otra matriz de datos con 76 filas, los años en los que se han producido los crecimientos, de 1933 a 2008, y 15 columnas, empleando como variables las precipitaciones mensuales desde septiembre del año anterior (psep, poct, pnov, pdic) hasta noviembre del año del crecimiento (Pene, Pfeb, Pmar, Pabr, Pmay, Pjun, Pjul, Pago, Psep, Poct, Pnov). Se ha buscado discriminar los mismos grupos que en el Biplot anterior: GR1 está formado por aquellos años en los que los crecimientos radiales promedio de todas las cronologías son superiores a la media y la cronología maestra basal es superior a la cronología maestra obtenida a 12 metros de altitud; GR2 es como el anterior pero con crecimientos radiales promedio inferiores a la media; GR3 está formado por los años en los que los crecimientos radiales promedio son inferiores a la media y la cronología maestra basal es inferior a la obtenida a 12 metros de altitud; GR4 son los años con crecimientos promedio superiores a la media y con la cronología maestra basal inferior a la de 12 metros. De esta manera podremos determinar qué caracteriza al clima de aquellos años en los que el crecimiento general es bueno (grupos 1 y 4) o malo (grupos 2 y 3) y a aquellos años en los que el mejor crecimiento se da en la base del tronco (grupos 1 y 2) o a mayores alturas (grupos 3 y 4), con lo que veremos las diferentes relaciones del clima con los crecimientos radiales a distintas alturas. La Figura 20, la Tabla 11 y la Tabla 12

muestran los resultados gráficos y numéricos del Biplot Canónico. Los dos primeros ejes explican el 89 % de la variabilidad total, un 68 % en el primero y un 21 % en el segundo. Para nombrar a los meses se han empleado, tanto en el texto como en las tablas y en la figura, las mismas abreviaturas, utilizando minúsculas para el año previo al del crecimiento y poniendo la primera letra en mayúsculas para el propio año del crecimiento.

Los grupos 1 y 4 se diferencian por las precipitaciones de septiembre, noviembre y diciembre del año previo (psep, pnov, pdic) y por las de abril, agosto y noviembre del año del crecimiento (Pabr, Pago, Pnov) y, aunque no son significativas, también se diferencian por las de marzo, mayo, agosto y septiembre del año del crecimiento (Pmar, Pmay, Pago, Psep). En cuanto a los grupos 2 y 3, al igual que en la figura anterior, no hay diferencias entre ellos, ni en este plano ni en los otros posibles, pero sí con alguno de los otros dos grupos (o con los dos a la vez), de los cuales se diferencian, conjunta o individualmente, por las precipitaciones de enero, febrero, marzo, mayo, junio, julio y agosto del año del crecimiento (Pene, Pfeb, Pmar, Pmay, Pjun, Pjul, Pago). La interpretación de estos datos es la siguiente:

- Excluyendo aquellos meses con baja calidad de representación (ver Tabla 12) todas las lluvias producen un efecto positivo sobre el crecimiento. Como se vio en la Tabla 6 (página 56), la precipitación de enero (Pene) es la que mejor discrimina los grupos de mayor crecimiento de los otros dos y las precipitaciones de septiembre y octubre del año previo (psep, poct) y las posteriores a julio del año del crecimiento (Pago, Psep, Poct) tienen poca influencia sobre el mismo.
- La fecha de caída de las precipitaciones influye de manera importante en la distribución del crecimiento diametral o radial a lo largo de la altura del árbol, habiendo una gran cantidad de meses que presentan diferencias significativas para los grupos 1 y 2: al igual que con las temperaturas (ver Figura 19), mayores precipitaciones en el mes de septiembre del año previo (psep) benefician el crecimiento en las zonas más altas. También las precipitaciones de abril del año del crecimiento (Pabr) lo benefician, mientras que las de noviembre y diciembre del año previo (pnov, pdic) y las de marzo, septiembre y noviembre del año del crecimiento (Pmar, Psep, Pnov) benefician los crecimientos de la base del árbol. Sabiendo que el crecimiento en diámetro comienza en la parte superior del tronco (Novak *et al.*, 2011) y lo hace en el

mes de abril o mayo (Miguel *et al.*, 2002), es lógico que las lluvias de estos meses beneficien fundamentalmente dichos crecimientos.

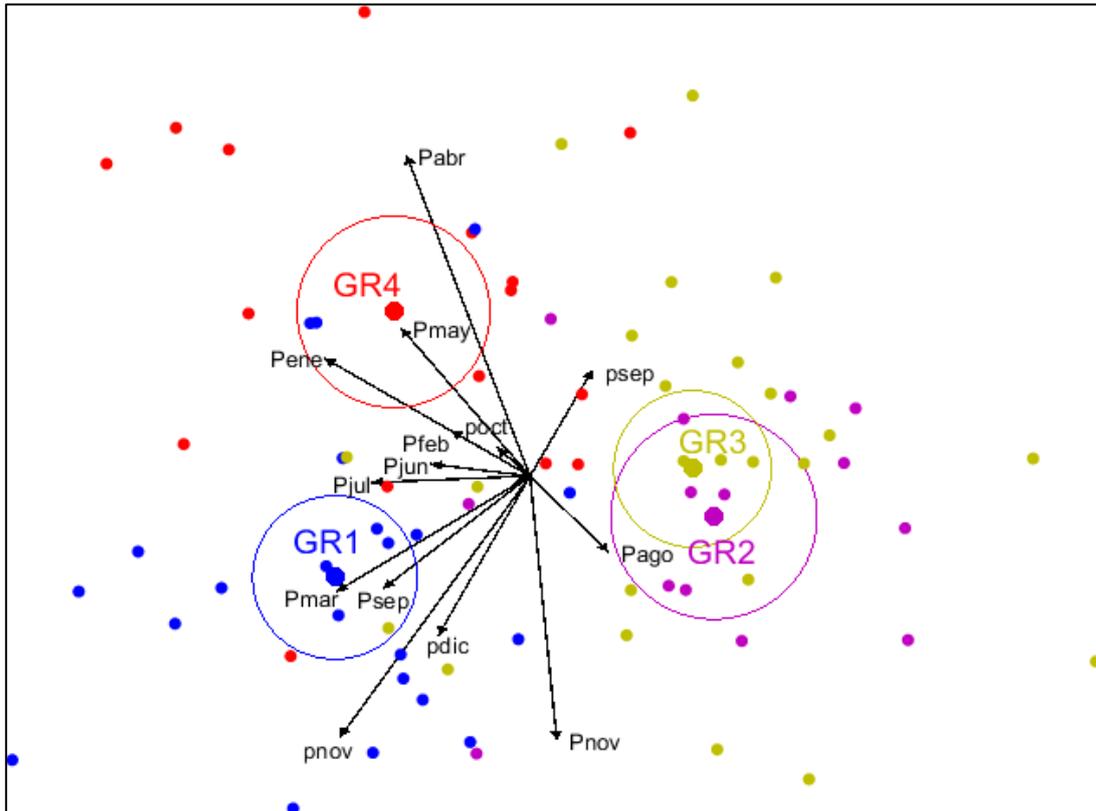


Figura 20. Ejes I y II del segundo Biplot Canónico empleando como variables las precipitaciones mensuales y discriminando los cuatro grupos ya referidos en el texto. La precipitación de octubre del año del crecimiento (Poc) no se representa por tener un vector de longitud casi nula.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultiBiplot (Vicente Villardón, 2015).

Tabla 11. Calidad de representación de los grupos del segundo Biplot Canónico.

	Eje 1	Eje 2
GR1	0,784	0,215
GR2	0,672	0,033
GR3	0,812	0,002
GR4	0,4	0,588

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultiBiplot (Vicente Villardón, 2015).

Tabla 12. Bondad de ajuste acumulada de las variables para explicar a los grupos del segundo Biplot Canónico.

	Eje 1	Eje 2
psep	0,493	0,942
poct	0,195	0,242
pnov	0,561	0,892
pdic	0,514	0,999
Pene	0,798	0,881
Pfeb	0,535	0,591
Pmar	0,876	0,973
Pabr	0,321	0,999
Pmay	0,699	0,987
Pjun	0,884	0,888
Pjul	0,959	0,959
Pago	0,258	0,334
Psep	0,746	0,883
Poct	0,308	0,328
Pnov	0,018	0,569

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultBiplot (Vicente Villardón, 2015).

Para ver la relación entre las temperaturas y los crecimientos longitudinales se ha realizado un tercer Biplot Canónico empleando una matriz de datos con 76 filas, los años en los que se han producido los crecimientos, de 1933 a 2008, y 23 columnas, utilizando como variables las temperaturas mensuales de todo el año previo al del crecimiento (tene, tfeb, tmar, tabr, tmay, tjun, tjul, tago, tsep, toct, tnov, tdic) y las del propio año del crecimiento hasta noviembre (Tene, Tfeb, Tmar, Tabr, Tmay, Tjun, Tjul, Tago, Tsep, Toct, Tnov). Los grupos que se busca discriminar se han obtenido de dividir los crecimientos longitudinales en tres conjuntos del mismo tamaño: crecimiento elevado (grupo 1), escaso (grupo 3) e intermedio (grupo 2). Así podremos ver qué caracteriza al clima de los años que producen un determinado crecimiento longitudinal de los árboles. Para nombrar a los meses se han empleado, tanto en el texto como en la figura, las mismas abreviaturas, utilizando minúsculas para el año previo al del crecimiento y poniendo la primera letra en mayúsculas para el propio año del crecimiento.

El Biplot (Figura 21) explica el 100 % de la variabilidad total, un 61 % en el primer eje y un 39 % en el segundo. Como sólo se buscan discriminar tres grupos, la calidad de representación de los mismos y la bondad de ajuste de las variables para explicarlos es en todos los casos del 100 % entre los dos ejes. La interpretación del gráfico es la siguiente:

- Tal y como se vio en la Tabla 7 (página 58) las temperaturas que más influyen en el crecimiento longitudinal (los vectores de mayor longitud) son las de agosto y septiembre del año previo (hay relación directa) y las de julio del año del crecimiento (relación inversa).
- En general influyen en mayor medida las temperaturas de año del crecimiento.
- Los crecimientos pequeños se dan los años de verano (Tjul, Tago, Tsep) caluroso debido a que este clima impide que se produzcan los segundos crecimientos en las especies de pinar policíclicas, los cuales se dan en estas fechas (Mutke, 2000).
- Los crecimientos intermedios se dan con finales del invierno y principios de la primavera suaves (Tfeb, Tmar, Tabr).
- Los mayores crecimientos se dan con años previos, que es cuando se forma la yema (Salminen *et al.*, 2009), calurosos y lluviosos, tal y como se verá en la Figura 22.

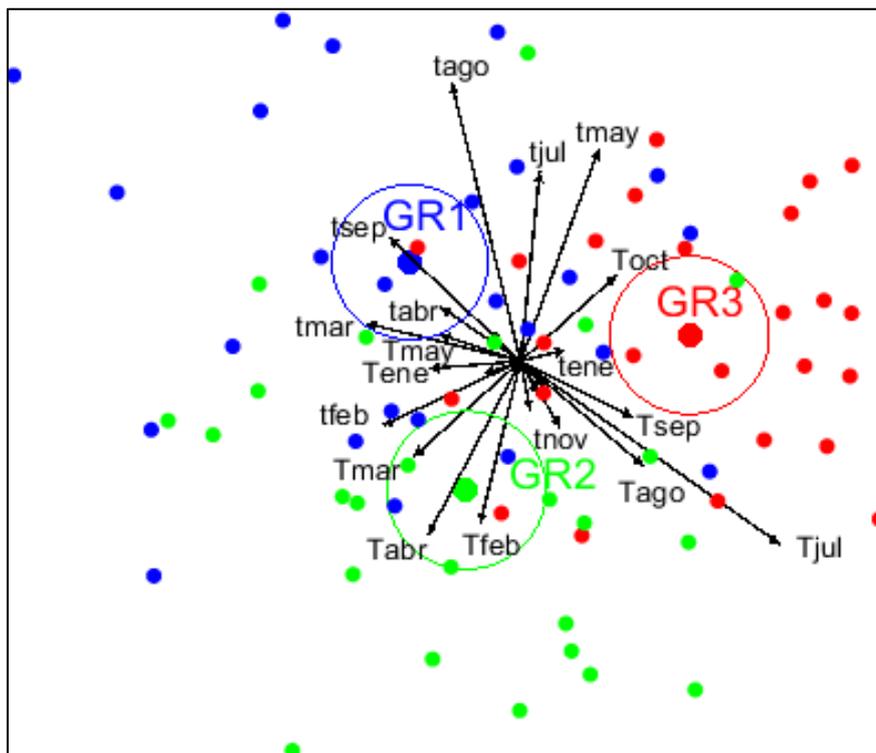


Figura 21. Ejes I y II del tercer Biplot Canónico empleando como variables las temperaturas mensuales y discriminando los tres grupos ya referidos en el texto. Las temperaturas de junio, octubre y diciembre del año previo y las de junio y noviembre del año del crecimiento (tjun, toct, tdic, Tjun y Tnov) no se representan por tener un vector de longitud casi nula.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultiBplot (Vicente Villardón, 2015).

En cuanto a la relación entre las precipitaciones y los crecimientos longitudinales, se ha visto a través de un último Biplot Canónico empleando una matriz de datos con 76 filas, los años en los que se han producido los crecimientos, de 1933 a 2008, y 23 columnas, utilizando como variables las precipitaciones mensuales de todo el año previo al del crecimiento (pene, pfeb, pmar, pabr, pmay, pjun, pjul, pago, psep, poct, pnov, pdic) y las del propio año del crecimiento hasta noviembre (Pene, Pfeb, Pmar, Pabr, Pmay, Pjun, Pjul, Pago, Psep, Poct, Pnov). Los grupos que se busca discriminar son los mismos que en la figura anterior: crecimiento elevado (grupo 1), escaso (grupo 3) e intermedio (grupo 2). Así podremos ver qué caracteriza al clima de los años que producen un determinado crecimiento longitudinal de los árboles. Para nombrar a los meses se han empleado, tanto en el texto como en la figura, las mismas abreviaturas, utilizando minúsculas para el año previo al del crecimiento y poniendo la primera letra en mayúsculas para el propio año del crecimiento.

El Biplot de la Figura 22 explica el 100 % de la variabilidad total, un 55 % en el primer eje y un 45 % en el segundo. Igual que en caso anterior, como sólo se buscan discriminar tres grupos, la calidad de representación de los mismos y la bondad de ajuste de las variables para explicarlos es en todos los casos del 100 % entre los dos ejes. La interpretación del gráfico es la siguiente:

- Como se vio en la Tabla 6 (página 56) las precipitaciones más importantes en el crecimiento longitudinal (los vectores de mayor longitud) son las de febrero y septiembre del año previo. Aunque en menor medida, también son importantes las temperaturas de marzo y junio del año del crecimiento. En todos los casos la relación es directa.
- En general influyen en mayor medida las precipitaciones de año del crecimiento.
- Los crecimientos pequeños se dan los años secos con un año previo también poco lluvioso.
- Los crecimientos intermedios se dan con veranos e inicios de otoño lluviosos (Pjun, Pago, Poct) que permiten que haya un segundo crecimiento.
- Los mayores crecimientos se dan con años previos lluviosos, sobre todo en los meses de febrero y septiembre y, en menor medida, abril (pfeb, pabr, psep). Como ya se explicó en el apartado 5.2 sobre las relaciones entre clima y crecimiento siguiendo las técnicas tradicionales, el modo de empezar el año influirá en el desarrollo de las yemas apicales, las cuales tienen el crecimiento

preformado del año siguiente. Igualmente la presencia de lluvias en septiembre (psep) puede traducirse en un beneficio para la formación de la yema apical del crecimiento longitudinal de verano en aquellos años en los que haya habido policiclismo.

- Las precipitaciones de abril del año del crecimiento (Pabr) también son importantes ya que es cuando se produce el inicio del desarrollo apical (Miguel *et al.*, 2002).

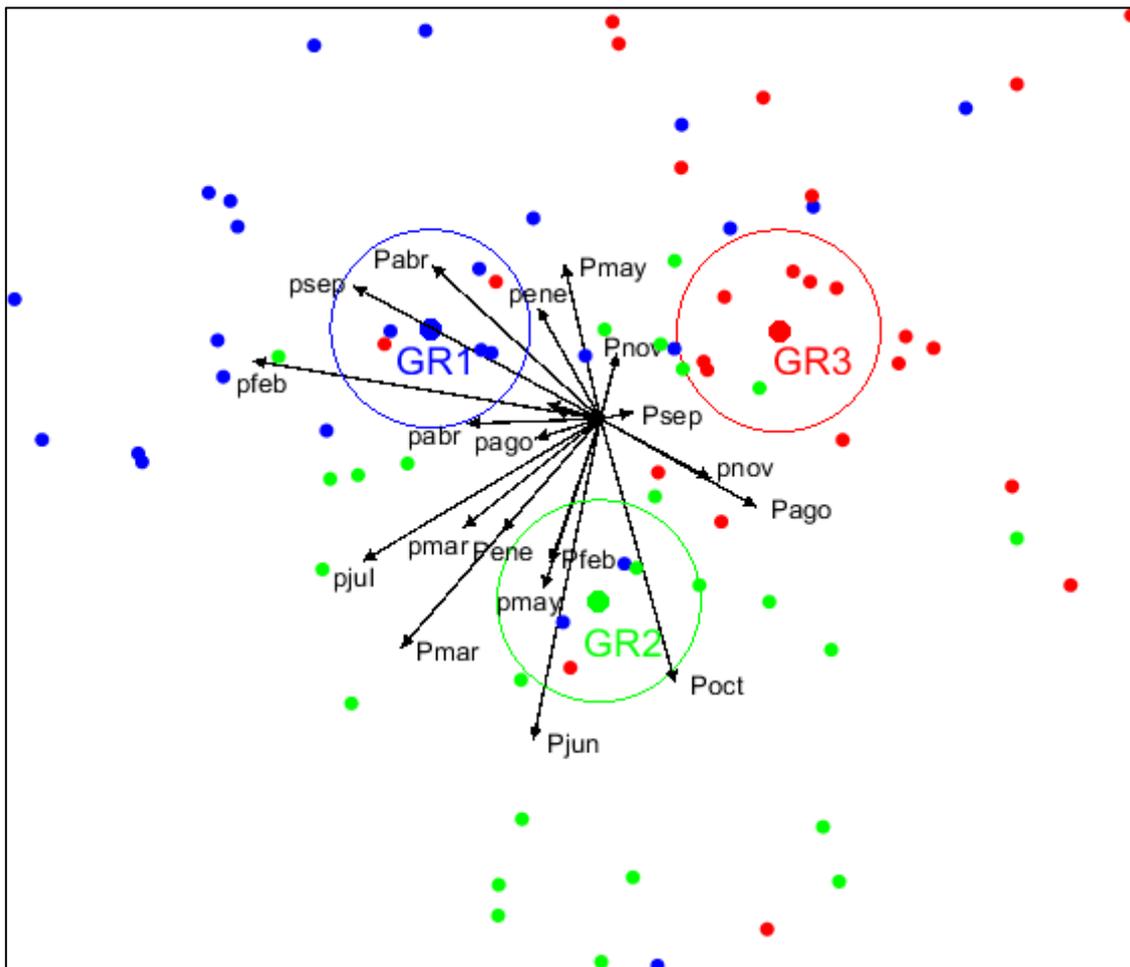


Figura 22. Ejes I y II del cuarto Biplot Canónico empleando como variables las precipitaciones mensuales y discriminando los tres grupos ya referidos en el texto. Las precipitaciones de junio, octubre y diciembre del año previo y la de julio del año del crecimiento (pjun, poct, pdic y Pjul) no se representan por tener un vector de longitud casi nula.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa MultiBiplot (Vicente Villardón, 2015).

Comparando los resultados utilizando los métodos tradicionales (Tabla 6 y Tabla 7) y la estadística multivariante (de la Figura 18 a la Figura 22) y teniendo en cuenta la metodología empleada:

- En ambos casos los resultados son similares.
- Los métodos tradicionales requieren más tiempo para obtener y presentar de forma visual y fácilmente interpretable los resultados.
- La metodología tradicional permite presentar una mayor cantidad de datos en menor número de figuras.
- En la Tabla 6 y en la Tabla 7 se ven fácilmente cómo se agrupan los valores en torno a ciertos meses o cómo varían los resultados según la cronología considerada.
- Los Biplots muestran las diferencias significativas entre los valores que toman las variables en los distintos grupos. Además según cómo se creen dichos grupos se pueden obtener resultados con mayor interés. Por ejemplo se ha visto cómo las diferencias entre los crecimientos radiales a distintas alturas se dan fundamentalmente en los años en los que éstos son grandes, mientras que no hay diferencias significativas (aunque sí se observa cierta tendencia) cuando son pequeños.
- Mientras que en la Tabla 6 y en la Tabla 7 sólo se muestran las correlaciones significativas para facilitar su interpretación, los Biplots permiten interpretar fácilmente todas las relaciones.

5.4. Evolución del diámetro según la altura

Para ver cómo es la evolución del crecimiento diametral en los primeros años de vida de un árbol, el cual no es constante ni en el tiempo ni a lo largo de su altura (Serrada, 2003; Fritts *et al.*, 1965) se ha realizado un Análisis Triádico (Jaffrenou, 1978; ver esquema del análisis en la Figura 10) de un cubo de datos de crecimientos radiales anuales (ver Figura 9) con las 5 cronologías maestras obtenidas a partir de los crecimientos radiales como filas, los 10 árboles muestreados en columnas y 16 matrices correspondientes a distintos años (5, 10, 16).

En la Tabla 13 se observa que las correlaciones de cada matriz son altas con las otras matrices cercanas (algo esperable teniendo en cuenta que trabajamos con medias móviles), sin embargo a partir de cierto momento esa correlación pasa a ser negativa, lo que pone de manifiesto los cambios importantes en el crecimiento que se dan a lo largo de estos primeros años.

Tabla 13. Correlaciones entre las 16 matrices del cubo de datos. Al trabajar con medias móviles de 5 años la matriz 1 se corresponde con los crecimientos medios de los 5 primeros años, la matriz 2 con la media del año dos al seis y así sucesivamente.

Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1000															
2	968	1000														
3	894	974	1000													
4	831	937	987	1000												
5	736	869	945	982	1000											
6	618	771	869	926	976	1000										
7	457	616	732	809	891	956	1000									
8	296	456	568	656	760	862	954	1000								
9	80	237	354	450	576	704	836	947	1000							
10	-123	28	142	243	374	513	661	817	947	1000						
11	-251	-109	5	106	235	372	517	689	857	972	1000					
12	-348	-213	-103	1	133	275	420	601	786	931	983	1000				
13	-411	-292	-195	-92	41	184	332	514	707	873	940	981	1000			
14	-407	-309	-232	-137	-14	128	280	459	639	807	874	928	975	1000		
15	-371	-294	-237	-151	-44	97	250	419	577	730	788	846	907	973	1000	
16	-375	-314	-272	-193	-94	43	201	369	514	659	707	769	842	929	983	1000

Fuente: Elaboración propia a partir del programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

En la Tabla 14 se muestran los pesos y la calidad de representación de las matrices por el compromiso. La matriz 9 es la que más aporta en la construcción del compromiso y también la mejor representada por el mismo, mientras que las primeras matrices aportan muy poco peso y están muy mal representadas. Igualmente, en la Figura 23, donde se muestra la interestructura, se ve que el vector 9 es el de mayor longitud y prácticamente está en el eje horizontal. Hay una tendencia clara de rápido crecimiento que llega a un máximo y luego comienza a descender pero a un ritmo cada vez más lento (ver Figura 25). Además los crecimientos en altura de los árboles no se reparten de la misma manera a lo largo del tiempo sino que van evolucionando de distinta manera lo que hace que las matrices 1 y 16 sean las más alejadas en la interestructura.

Los dos primeros ejes del compromiso del Análisis Triádico retienen un 95 % de la variabilidad, un 83 % el primer eje y un 12 % el segundo, por lo que proporcionan un buen resumen de las 16 matrices.

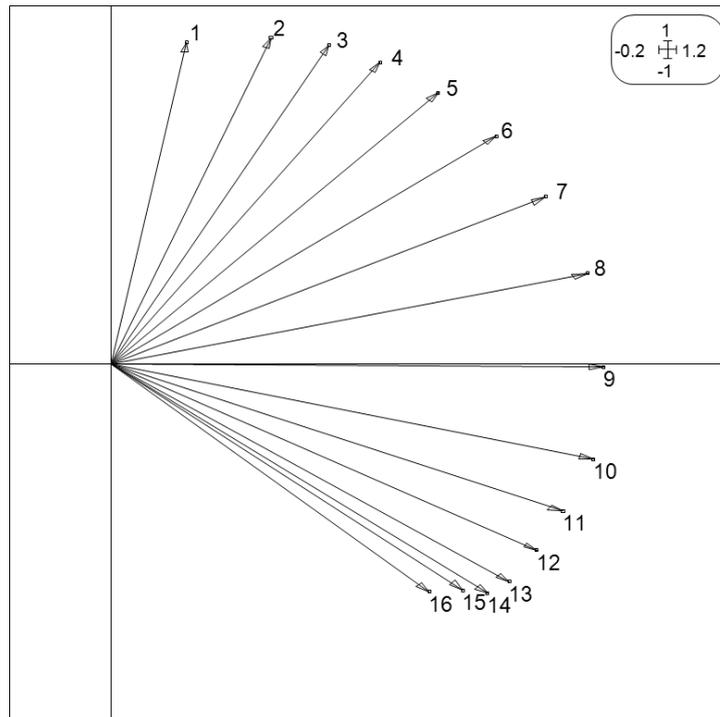


Figura 23. Interestructura del Análisis Triádico. Al trabajar con medias móviles de 5 años la matriz 1 se corresponde con los crecimientos medios de los 5 primeros años, la matriz 2 con la media del año dos al seis y así sucesivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

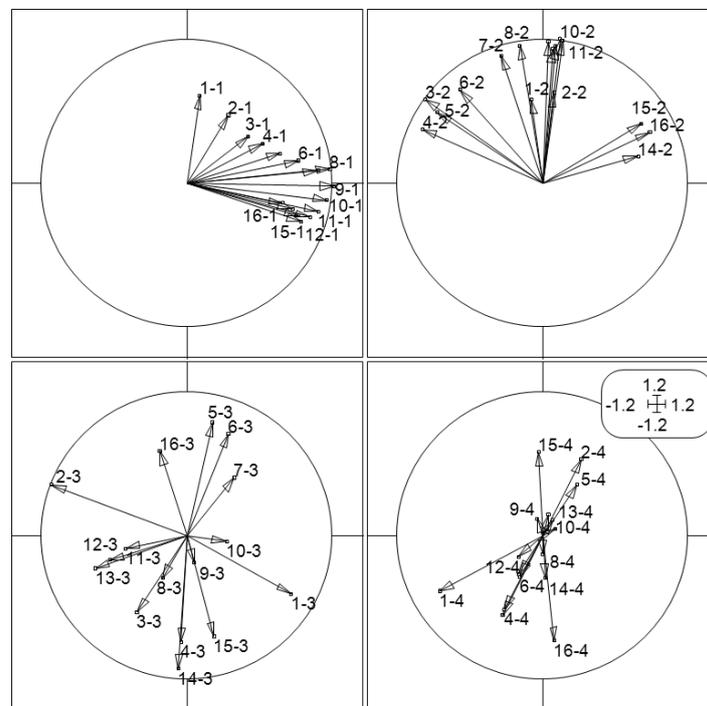


Figura 24. Componentes principales de cada matriz sobre los ejes comprometido.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

Tabla 14. Pesos de cada uno de los operadores para construir el operador compromiso y coseno al cuadrado que muestra qué matrices vienen mejor representadas por el compromiso. Al trabajar con medias móviles de 5 años la matriz 1 se corresponde con los crecimientos medios de los 5 primeros años, la matriz 2 con la media del año dos al seis y así sucesivamente.

Matriz	Peso	Cos ²
1	0,05	0,01
2	0,11	0,08
3	0,15	0,16
4	0,18	0,25
5	0,22	0,37
6	0,26	0,52
7	0,29	0,69
8	0,32	0,85
9	0,33	0,91
10	0,32	0,86
11	0,30	0,75
12	0,29	0,66
13	0,27	0,55
14	0,25	0,47
15	0,24	0,40
16	0,21	0,31

Fuente: Elaboración propia a partir del programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

Las matrices mejor representadas, como se ve en los cosenos al cuadrado de la Tabla 14, son las correspondientes a los años centrales ya que en la Figura 23 son las que están más cerca del eje horizontal y en la Figura 24 son las únicas donde la componente principal primera y segunda se representan cerca de la horizontal y vertical respectivamente (que son los ejes del compromiso).

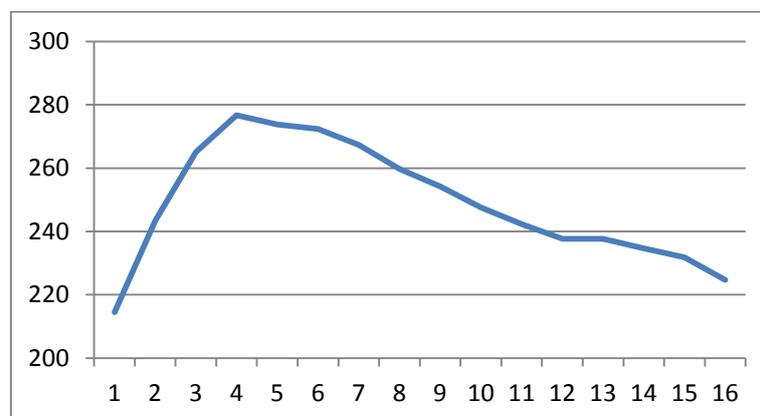


Figura 25. Crecimiento medio de cada matriz.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 26 es el gráfico de los dos primeros ejes del compromiso de los crecimientos radiales en la base, a 1,3, 8, 12 y 15 metros de altura y la Figura 27 es el compromiso (también ejes 1-2) de las variables (el crecimiento en los 10 árboles muestreados), donde todas ellas se encuentran hacia la izquierda del gráfico, alrededor del eje horizontal. Es, por tanto, este eje horizontal el que recoge la información del crecimiento. De manera aproximada un sujeto, cuanto más a la izquierda se represente, mayor será su crecimiento. Según se sube en la altura a la que se han obtenido las muestras, los crecimientos van disminuyendo y se van diferenciando más de los obtenidos en la base, encontrándose las mayores diferencias entre la cronología basal y la obtenida a 15 metros.

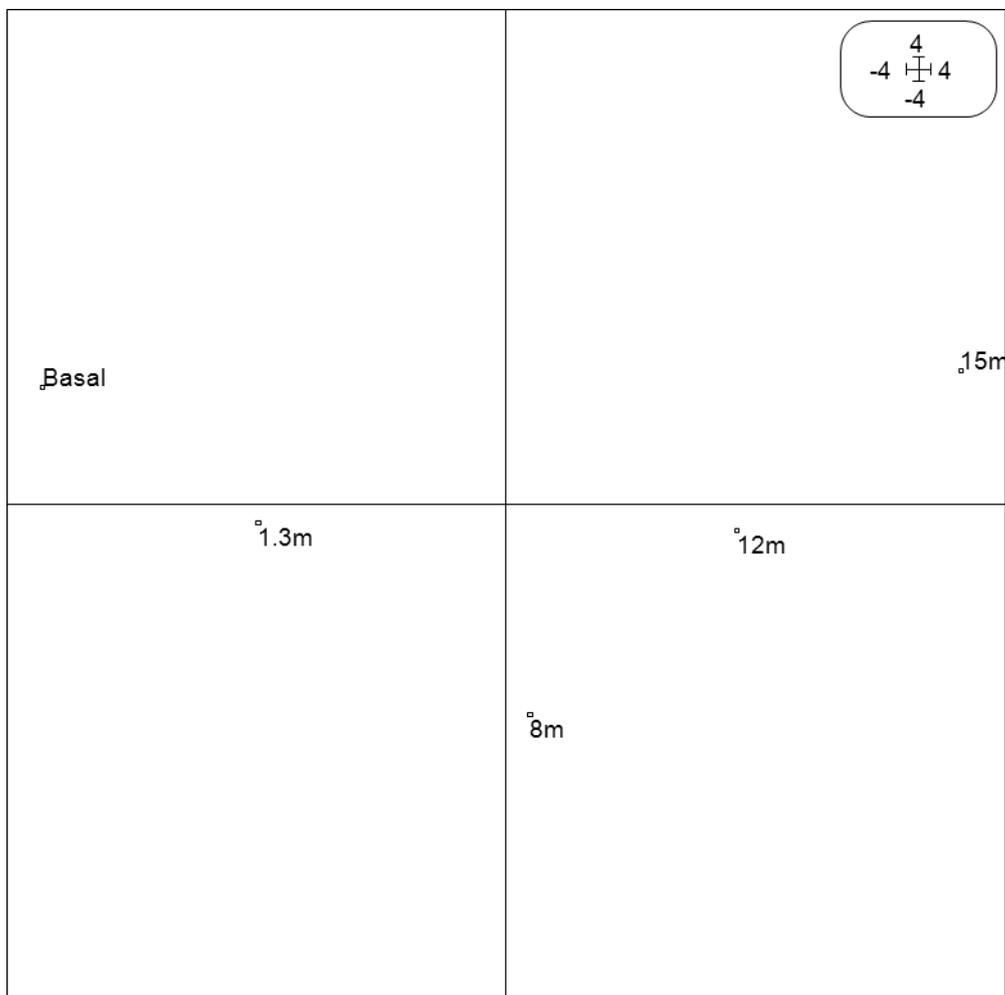


Figura 26. Compromiso de los crecimientos radiales obtenidos en la base, a 1,3, 8, 12 y 15 metros de altura (ejes 1-2).

Fuente: Elaboración propia a partir del programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

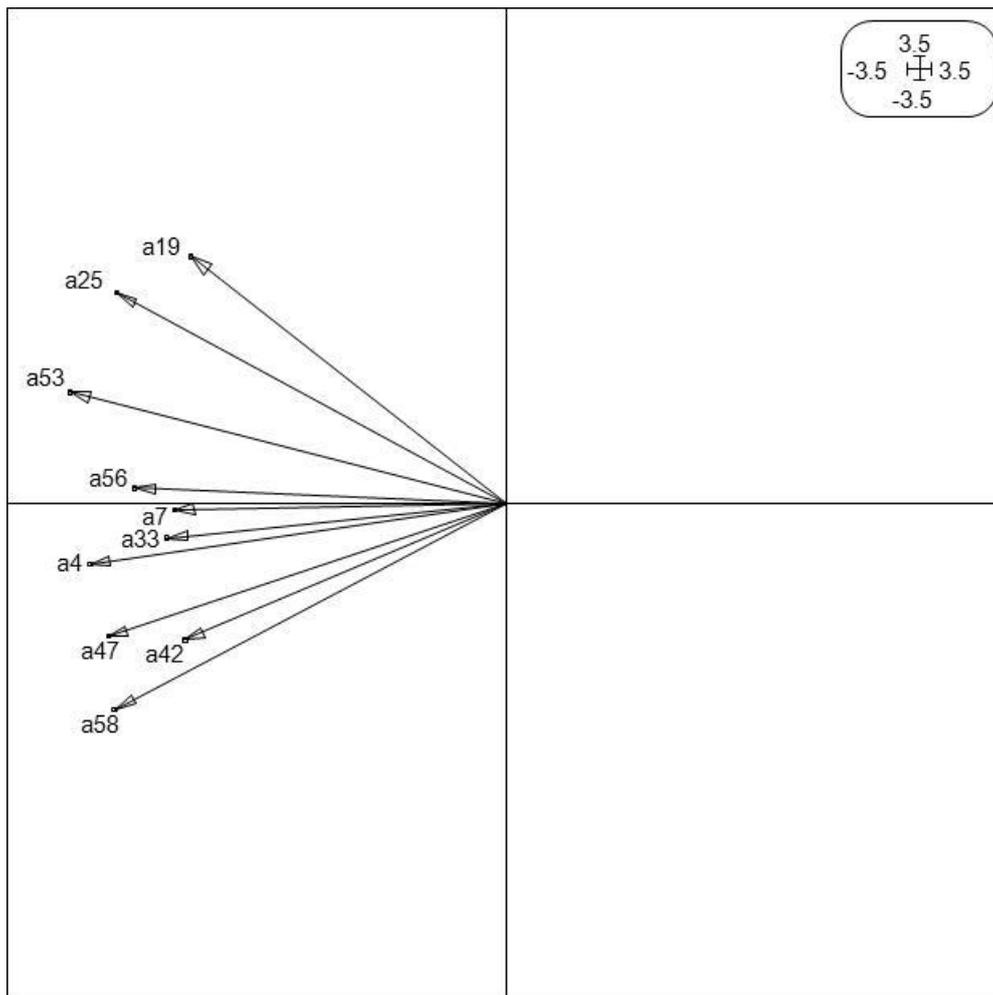


Figura 27. Compromiso de las variables (ejes 1-2). En nuestro caso las variables son los crecimientos en los 10 árboles muestreados (árboles 4, 19, 25, 33, 42, 47, 53, 56, 58 y 72).

Fuente: Elaboración propia a partir del programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

Las trayectorias temporales de los crecimientos radiales se muestran en la Figura 28. Los crecimientos a los 8, 12 y 15 metros tienen trayectorias envolventes, es decir, sus crecimientos siguen la evolución media (ver Figura 25). El eje horizontal mide los crecimientos hacia la izquierda (esto es, cuanto más a la izquierda esté un punto, mayor es el crecimiento de ese año) por lo que a 15 metros se dan los crecimientos más bajos, a 12 metros los crecimientos son ligeramente mayores y a 8 metros son aún mayores.

El crecimiento basal y el obtenido a 1'3 metros de altura tienen trayectorias excéntricas y opuestas. El basal empieza siendo escaso pero durante algo más de 10 años va aumentando por encima de la media hasta que se estabiliza en la zona de mayores crecimientos. Sin embargo, a 1'3 metros el crecimiento empieza siendo muy

grande pero cada año aumenta menos que la media hasta que se estabiliza a partir de los 13 años en unos valores bajos similares a los que se dan a los 12 metros.

Hay muy pocos estudios que analicen la evolución de los crecimientos diametrales a distintas alturas. Fritts *et al.*, 1965, y Speer, 2010, coinciden en que el crecimiento diametral en las partes más bajas del tronco (en la base y a 1´3 metros) comienza siendo muy grande para luego descender mientras que a mayor altura se mantiene más o menos estable a lo largo del tiempo. Sin embargo en ambos trabajos se consideran periodos largos de tiempo (más de 100 años) con muy poco detalle lo que impide apreciar pequeñas diferencias. Además en los estudios dendrocronológicos rara vez se obtienen rodajas, utilizándose casi siempre la barrena de Pressler (ver Fotografía 4) por su facilidad de uso y porque así se evita la tala de los árboles muestreados, con la que en pocas ocasiones se obtienen los anillos centrales. Para obtener resultados comparables en longitud temporal con los anteriores se realizó un Análisis Triádico con las cronologías más largas pero no se muestra en este trabajo debido a que la técnica no dio buenos resultados (bajas calidades de representación, interestructura con grandes ángulos y por tanto sin estructura común, etc.).

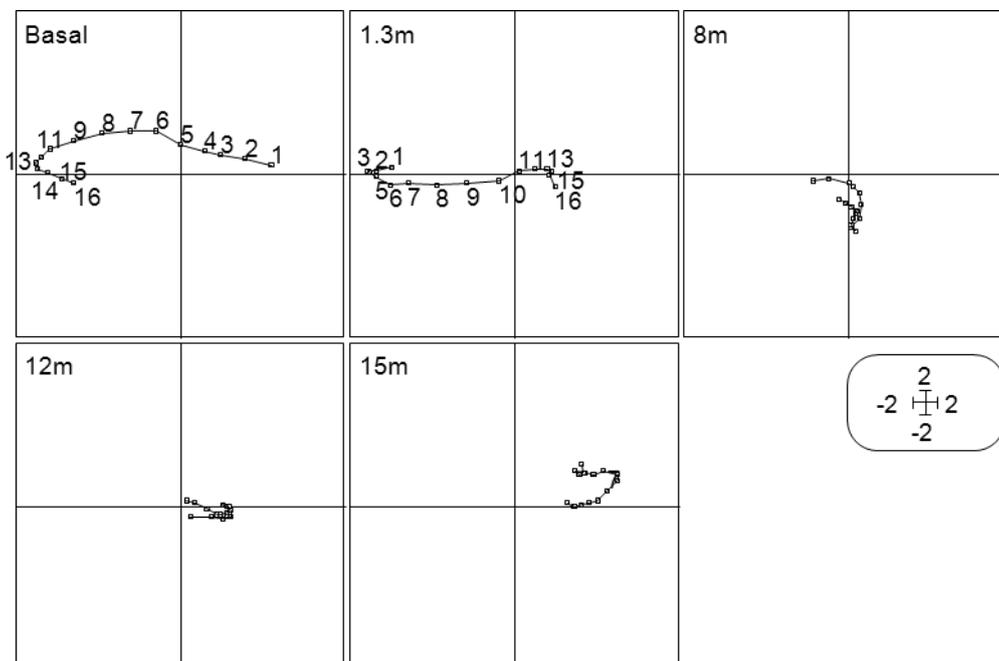


Figura 28. Trayectorias temporales de los crecimientos radiales obtenidos en la base, a 1´3, 8, 12 y 15 metros de altura.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).



Fotografía 4. Barrena de Pressler.

Fuente: GIS Ibérica.

Para comparar los resultados del Análisis Triádico con los de un Biplot Múltiple se han repetido los cálculos empleando esta última técnica (Figura 29). Los datos de partida son los mismos, un cubo de datos de crecimientos radiales anuales (ver Figura 9) con las 5 cronologías maestras obtenidas a partir de los crecimientos radiales como filas, los 10 árboles muestreados en columnas y 16 matrices correspondientes a distintos años (5, 10, 16).

Los dos primeros ejes del Biplot Múltiple explican una variabilidad del 86 %, un 75 % el primero y un 11 % el segundo. El eje horizontal indica los crecimientos de tal forma que los puntos situados más a la derecha son los de mayores crecimientos relativos (en función de los que se dan en el resto de alturas para el mismo año). Para obtener los crecimientos que destacan sobre el resto se ha realizado un clúster jerárquico (ver Tabla 15) sobre el Biplot. Al igual que lo que se vio en el Análisis Triádico los crecimientos obtenidos a 12 y 15 metros son los estables y bajos, los de 8 metros son intermedios y también estables, y los basales y obtenidos a 1'3 metros varían mucho a lo largo del tiempo y en sentidos opuestos.

Por tanto se han obtenido los mismos resultados que con el Análisis Triádico pero empleando una técnica más sencilla y un sólo gráfico.

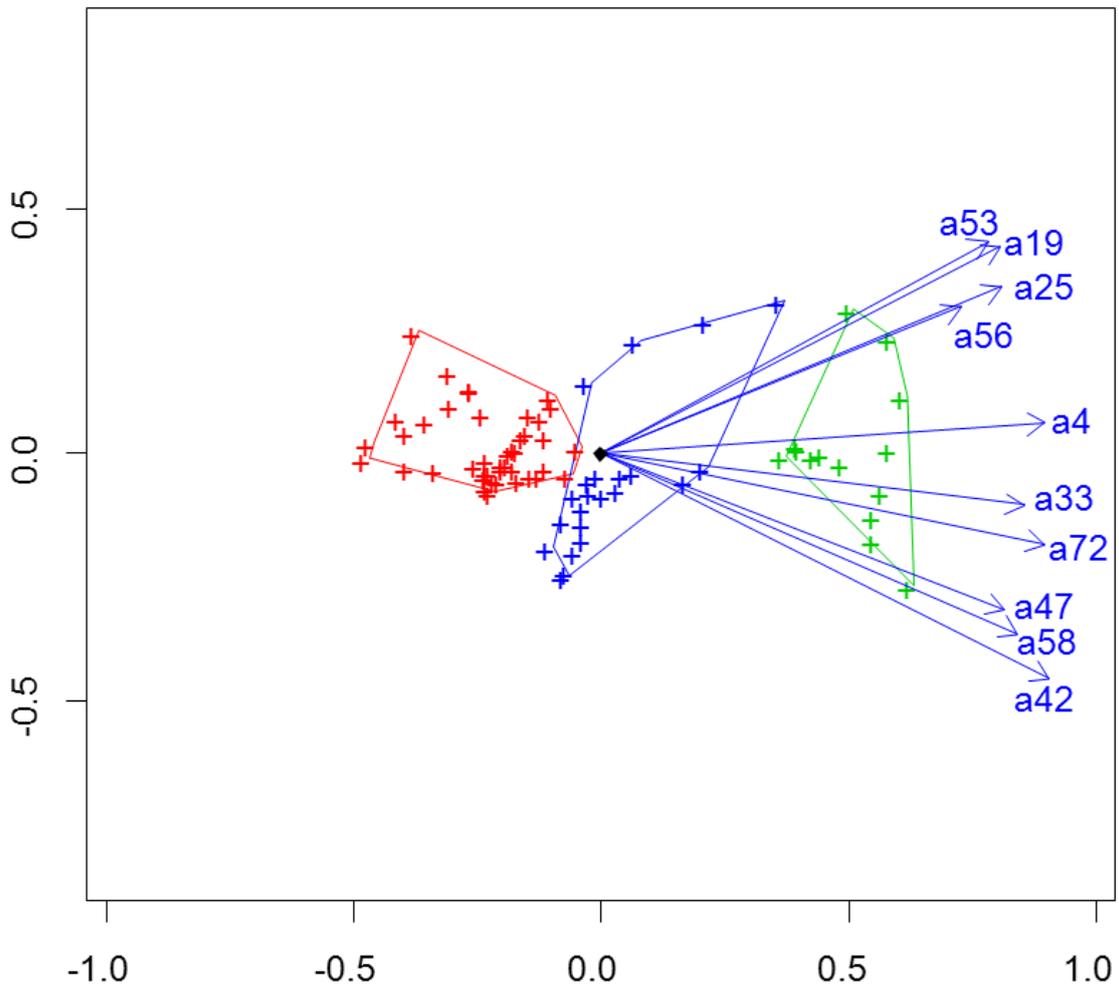


Figura 29. Biplot Múltiple con clúster jerárquico. Los vectores representan a los 10 árboles muestreados (los árboles 4, 19, 25, 33, 42, 47, 53, 56, 58 y 72). Los sujetos que pertenecen a cada grupo se muestran en la Tabla 15.

Fuente: Elaboración propia a partir del paquete de R multibiplotGUI (Nieto *et al.*, 2015).

Tabla 15. Crecimientos que se agrupan dentro de cada clúster según la matriz de datos (cada matriz se corresponde con la media de cinco años al hacer medias móviles) y la altitud a la que se produce el crecimiento.

Clúster verde		Clúster azul		Clúster rojo	
Altitud	Matriz	Altitud	Matriz	Altitud	Matriz
Basal	de 9 a 16	Basal	de 5 a 8	Basal	de 1 a 4
1'3 metros	de 1 a 8	1'3 metros	9	1'3 metros	de 11 a 16
		8 metros	Todos	12 metros	Todos
				15 metros	Todos

Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

1- En el desarrollo longitudinal influye principalmente la disponibilidad de agua al inicio del periodo vegetativo del año previo al del crecimiento y que haya temperaturas suaves en el mes de julio del año del crecimiento.

2- En el desarrollo diametral influyen las precipitaciones anteriores al inicio del crecimiento y las que se dan durante el mismo hasta julio, y las temperaturas del mismo periodo más septiembre (mes en el que se puede retomar el crecimiento de la madera tardía) y noviembre. Aunque esto ocurre en general para todas las alturas hay diferencias entre las mismas, sobre todo en la influencia de las precipitaciones: las temperaturas altas en septiembre del año previo y agosto del año del crecimiento y las precipitaciones abundantes en septiembre del año previo y abril del año del crecimiento benefician el crecimiento diametral en las partes altas del tronco mientras que las precipitaciones en noviembre y diciembre del año anterior y en noviembre del año del crecimiento benefician los crecimientos diametrales en la base. Además la cronología obtenida a mayor altura es la que presenta correlaciones más altas.

3- El crecimiento radial no se produce de manera simultánea en todas las alturas del tronco ni a la vez que el crecimiento longitudinal. La parte alta del tronco es la primera en recibir la savia elaborada y también la última en dejar de recibirla lo que hace que sus relaciones con el clima sean diferentes. Además el crecimiento radial en las partes superiores del tronco es el que más dura y el que, junto con el crecimiento longitudinal, presenta mayor sensibilidad con el clima. Se abre por tanto un camino poco estudiado que permitirá conocer mejor la influencia del clima sobre el crecimiento de los árboles en todas sus dimensiones y así poder predecir mejor los crecimientos volumétricos para la obtención de madera, la adaptación de una especie a un determinado clima o la adaptación de una masa a un posible cambio del mismo.

4- Los métodos multivariantes pueden ser complementarios o sustitutivos de los tradicionalmente empleados en la dendrocronología presentando ambos sus ventajas e inconvenientes. Mientras que la información presentada siguiendo la metodología tradicional es más compacta y rápida de interpretar las técnicas multivariantes son más rápidas de realizar, permiten interpretar mayor cantidad de información y obtienen resultados adicionales como las diferencias significativas entre los valores que toman las variables para los distintos grupos que se creen.



5- Los primeros años de crecimiento diametral son muy estables en las alturas superiores del tronco, produciéndose crecimientos más pequeños cuanto más se sube en altura. Sin embargo los crecimientos en la base y a 1'3 metros evolucionan rápidamente y de manera opuesta en el tiempo: mientras que los basales aumentan cada año, a la altura normal (1'3 metros) son cada vez menores, estabilizándose ambos a partir del año 13.

6- El Biplot Múltiple obtiene los mismos resultados que el Análisis Triádico pero empleando una técnica más sencilla y un sólo gráfico. Por ello consideramos preferible esta técnica cuando se trabaje con datos similares.

7. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alía, R., y Moro, J. (1996). Comportamiento de procedencias de *Pinus pinaster* Ait. en el centro de España. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.*, 5(1), 57-75.
- Allúe, J. L. (1990). *Atlas fitoclimático de España*. Madrid: Ministerio de Agricultura.
- Amaro, R. I., Vicente-Villardón, J. L., y Galindo, M. P. (2004). Manova Biplot para arreglos de tratamientos con dos factores basado en modelos lineales generales multivariantes. *Interciencia*, 29(1), 26-32.
- Baccalá, N. (2004). *Contribuciones al análisis de matrices de datos multivía: tipología de las variables* (Tesis de Doctorado). Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Biondi, F., y Waikul., K. (2004). DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30, 303-311.
- Bogino, S. M., y Bravo Oviedo, F. (2008). Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann. For. Sci.*, 65, 506.
- Escoufier, B., y Pagès, J. (1983). Méthode pour l'analyse de plusieurs groups de variables application à la caractèrisation de vins rouges du Vial de Loire. *Reveu de statistique appliquée*, 31(2), 43-59.
- Fritts, H. C., Smith, D. G., Budelsky, C. A., y Cardis, J. W. (1965). The variability of ring characteristics within trees as shown by a reanalysis of four ponderosa pine. *Tree-ring Bulletin*, 27(1-2), 3-18.
- Gabriel, K. R. (1971). The biplot-graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika*, 58, 453-467.
- Gabriel, K. R., y Odoroff, C. L. (1986). Use of 3D biplots for diagnosing models to fit higher dimensional data. En Wegman, E., y Depriest, D. (eds.), *Statistical Image Proccesing and Graphics*. Nueva York: Dekker.
- Gabriel, K. R., y Odoroff, C. L. (1990). Biplot in biomedical research. *Statistics in Medicine*, 9, 469-485.

- Galindo, M. P. (1985). *Contribuciones a la Representación Simultánea de Datos Multidimensionales* (Tesis de Doctorado). Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Galindo, M. P. (1986). Una Alternativa de Representación: HJ Biplot. *Questiío*, 10(1), 13-23.
- Galindo, M. P. (2007). Formulación Biplot de técnicas de análisis de datos de tres modos. En *XII Reunión Científica del GAB, I Encuentro Argentino - Chileno de Biometría*. San Martín de los Andes, Patagonia Argentina: GAB.
- Galindo, M. P., y Cuadras, C. M. (1986). *Una extensión del método Biplot y su relación con otras técnicas*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Galindo, M. P., Fernández-Gómez, M. J., Ávila-Zarza, C., Río, A., y Fernández-Aláez, M. (1999). El análisis HJ-Biplot como herramienta de estudio de un ecosistema acuático. *Statistics and Environment*, 85-94.
- García González, I., García Rodríguez, L., y Díaz Vizcaíno, E. (2001). Empleo de un escáner de sobremesa para la medición manual de anillos de crecimiento. En *III Congreso Forestal Español, Montes para la Sociedad del Nuevo Milenio*. Sevilla: S.E.C.F.
- García-Talegón, J., Vicente, M. A., Molina-Ballesteros, E., y Vicente-Tavera, S. (1999). Determination of the origin and evolution of building stones as function of their chemical composition using the inertia criterion based on an HJ-biplot. *Chemical Geology*, 153, 37-51.
- Gutiérrez, E. (2008). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. En Nieto, X., y Cau, M. A. (eds.), *Arqueología náutica mediterránea* (pp. 303-315). Gerona: CASC.
- Gutiérrez, A. G., Armesto, J. J., Aravena, J. C., Carmona, M., Carrasco, N. V., Christie, D. A.,... Huth, A. (2009). Structural and environmental characterization of old-growth temperate rainforests of northern Chiloé Island, Chile: Regional and global relevance. *Forest Ecology and Management*, 258(4), 376-388.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring research*, 57(2), 205-221.

- Holmes, R. (1997). *The Dendrochronology Program Library. The International Tree Ring Data Bank Program*. Tucson: University of Arizona.
- Jaffrenou, P. A. (1978). *Sur L'Analyse des Familles Finies de Variables Vectorielles: Bases Algébriques et Applications à la Description Statistique* (Tesis de Doctorado). Universidad de Lyon, Lyon.
- Jalkanen, R., Aalto, T., Ojanen, M., y Vainio, E. (2000). *Needle trace method and crown thinning (defoliation) in pines*. Rovaniemi: Finnish Forest Research Institute.
- Kerhoulas, L. P., y Jeffrey, M. K. (2011). Sensitivity of ring growth and carbon allocation to climatic variation vary within ponderosa pine trees. *Tree Physiol.*, 32(1), 14-23.
- Larson, P. R. (1960). A physiological consideration of the springwood summerwood transition in red pine [*Pinus resinosa*]. *For. Sci.*, 6, 110-122.
- Larson, P. R. (1963). Stem Form Development of Forest Trees. *For. Sci.*, 5, 1-42.
- L'Hermier Des Plantes, H. (1976). *Structuration des tableaux à trois indices de la statistique* (Tesis de Doctorado). Univ. Sci. et Tech. Languedoc, Languedoc.
- Martín-Rodríguez, J., Galindo-Villardón, M. P., y Vicente-Villardón, J. L. (2002). Comparison and integration of subspaces from a biplot perspective. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 102, 411-423.
- Medina Hernández, E. J. (2015). *Análisis Multivariante del Uso del Tiempo de la Población Colombiana Mediante el HJ Biplot y el Análisis Triádico Parcial* (Trabajo Final de Máster). Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Mendes, S., Gómez, J. F., Pereira, M. J., Azeiteiro, U. M., y Galindo-Villardón, M. P. (2010). The efficiency of the partial triadic analysis methods: an ecological application. *Biometr Lett*, 47, 83-106.
- Mendes, S., Cotrim Marques, S., Miranda Azeiteiro, U., Fernández-Gómez, M. J., Galindo, M. P., Maranhao, P.,... Leandro S. M. (2011). Zooplankton distribution in a marine protected area: The Berlengas Natural Reserve (Western Coast of Portugal). *Fresenius Environmental Bulletin*, 20(2), 496-505.

- Miguel, I., González, S. C., Alía, R., y Gil, L. (2002). Growth phenology and mating system of maritime pine ("*Pinus pinaster*" Aiton) in central Spain. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.*, 11(1), 193-204.
- Mutke, S. (2000). *Fenología de Pinus pinea L. en un Banco Clonal (Valladolid)* (Trabajo Final de Carrera). Universidad de Valladolid, Valladolid.
- Navarro, R. M., Fernández, A., Camarero, J. J., y Sánchez, R. (Coords.) (2011). *Taller de dendrocronología aplicada a la ecología y a la gestión forestal*. Córdoba: Universidad de Córdoba. (Inédito)
- Nieto, A. B. (2015). *Versión inferencial de los métodos Biplot basada en remuestreo Bootstrap y su aplicación a tablas de tres vías* (Tesis de Doctorado). Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Nieto, A. B. (2016). *Aplicación del remuestreo Bootstrap a datos de tres vías*. Salamanca: Universidad de Salamanca. (Inédito)
- Nieto, A. B., Baccala, N., Vicente-Galindo, P., y Galindo, M. P. (2015). *Multibiplot Analysis in R*. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/multibiplotGUI/multibiplotGUI.pdf>
- Novak, K., Luis, M., Cufar, K., y Raventós, J. (2011). Frequency and variability of missing tree rings along the stems of *Pinus halepensis* and *Pinus pinea* from a semiarid site in SE Spain. *Journal of Arid Environments*, 75, 494-498.
- Park, Y., Koubaa, A., Brais, S., y Mazerolle, M. J. (2009). Effects of cambial age and stem height on wood density and growth of Jack pine grown in boreal stands. *Wood and Fiber Science*, 41(4), 346-358.
- Pensa, M., Salminen, H., y Jalkanen, R. (2005). A 250-year-long height-increment chronology for *Pinus sylvestris* at the northern coniferous timberline: A novel tool for reconstructing past summer temperatures? *Dendrochronologia*, 22, 75-81.
- Ramírez-Contreras, A., y Rodríguez-Trejo, D. A. (2004). Efecto de calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10(1), 5-11.

- R Core Team. (2013). *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <http://www.R-project.org/>
- Richter, K., Eckstein, D., y Holmes, R. L. (1991). The dendrochronological signal of pine trees (*Pinus* spp.) in Spain. *Tree-Ring Bull*, 51, 1-13.
- Rinn, F. (1996). *TSAP. Time Series Analysis and Presentation. Users manual*. Heidelberg: Rinntech.
- Río, M., Rodríguez-Alonso, J., Bravo-Oviedo, A., Ruíz-Peinado, R., Cañellas, I., y Gutiérrez, E. (2014). Aleppo pine vulnerability to climate stress is independent of site productivity of forest stands in south-eastern Spain. *Trees - Structure and Function*, 28(4), 1209-1224.
- Rodríguez, R. J., Serrada, R., Lucas, J. A., Alejano, R., Río, M., Torres, E., y Cantero, A. (2008). Selvicultura de *Pinus pinaster* Ait. subsp. *mesogeensis* Fieschi & Gaussen. En Serrada, R., Montero, G., y Reque, J. A. (eds.), *Compendio de selvicultura aplicada en España* (pp. 399-430). Madrid: INIA.
- Rolland, A., Bertrand, F., Maumy, M., y Jacquet, S. (2009). Assessing phytoplankton structure and spatio-temporal dynamics in a freshwater ecosystem using a powerful multiway statistical analysis. *Water Research*, 43(13), 3155-3168.
- Rozas, V. (2011). Estandarización y creación de cronologías. En Navarro, R. M., Fernández, A., Camarero, J. J., y Sánchez, R. (coords.), *Taller de dendrocronología aplicada a la ecología y a la gestión forestal*. Córdoba: Universidad de Córdoba. (Inédito)
- Sarmiento, J. M., y Manrique, E. (1997). *Programa WCLIMOAL. Instrucciones de utilización*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Salminen, H., y Jalkanen, R. (2007). Intra-annual height increment of *Pinus sylvestris* at high latitudes in Finland. *Tree Physiology*, 27, 1347-1353.
- Salminen, H., Jalkanen, R., y Lindholm, M. (2009). Summer temperature affects the ratio of radial and height growth of Scots pine in northern Finland. *Ann. For. Sci.*, 66, 810.

- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F. H., y Kienast, F. (2004). *Wood anatomy of central European Species*. Recuperado de <http://www.woodanatomy.ch>
- Serrada, R. (2003). *Apuntes de Selvicultura*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. Tucson: The University of Arizona Press.
- Thioulouse, J., Chessel, D., Dolédec, S., y Olivier, J. M. (1997). ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing*, 7, 75-83.
- Thioulouse, J., Simier, M., y Chessel, D. (2004). Simultaneous Analysis of a Sequence of Paired Ecological Tables. *Ecology*, 85(1), 272-283.
- Tucker, L. (1966). Some Mathematical Notes on Three-mode Factor Analysis. *Psychometrika*, 31, 279-311.
- Urrutia, R. B. (2002). *Desarrollo de una cronología de anchos de anillos para alerce (Fitzroya cupressoides) y reconstrucción de la historia de incendios en el área de Abtao, Parque Nacional Chiloé, X Región* (Trabajo Final de Carrera). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Varas, M. J., Vicente-Tavera, S., Molina, E., y Vicente-Villardón, J. L. (2005). Role of canonical biplot method in the study of building stones: an example from Spanish monumental heritage. *Environmetrics*, 16, 405-419.
- Vicente Galindo, P., y Galindo Villardon, P. (2013). *Análisis de tablas de tres vías: recientes desarrollos del STATIS*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Vicente Tavera, S. (1992). *Las Técnicas de representación de datos multidimensionales en el estudio del Índice de Producción Industrial (IPI) en la Comunidad Económica Europea* (Tesis de Doctorado). Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Vicente Tavera, S. (2016). *Biplot Canónico*. Salamanca: Universidad de Salamanca. (Inédito)

- Vicente Villardón, J. L. (1992). *Una alternativa a los métodos factoriales clásicos basada en una generalización de los métodos biplot* (Tesis de Doctorado). Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Vicente Villardón, J. L. (2015). *MULTBILOT: A package for Multivariate Analysis using Biplots*. Departamento de Estadística, Universidad de Salamanca. Recuperado de <http://biplot.usal.es/ClassicalBiplot/index.html>.
- Wang, Y., Cufar, K., Eckstein, D., y Liang, E. (2012). Variation of Maximum Tree Height and Annual Shoot Growth of Smith Fir at Various Elevations in the Sygera Mountains, Southeastern Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 7(3), e31725.
- Zazo, J., y Jiménez, J. M. (2000). *Apuntes y notas de los caracteres culturales y otras características de interés de algunas coníferas forestales españolas*. Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal.