

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MODELIZACIÓN DE LA RESPUESTA CLIMÁTICA DE *FAGUS SYLVATICA* EN EL PARQUE NATURAL DEL MONCAYO

Ernesto Tejedor Vargas

Dr. Miguel Ángel Saz Sánchez
Dr. Martín de Luis Arrillaga

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Septiembre de 2012



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

*La Península Ibérica se está viendo afectada por un proceso de cambios en el clima que están provocando impactos en las distribuciones de especies vegetales. En este sentido se ha estudiado la especie *Fagus sylvatica* la cual se encuentra ampliamente distribuida en Europa teniendo en España su límite sur debido a factores climáticos limitantes. Se han analizado muestras de *Fagus sylvatica* de ese límite sur de la especie, localizado en el Parque Natural del Moncayo, integrando información climática e información geográfica en un SIG con el objetivo de obtener las funciones respuesta de *Fagus sylvatica*. Conociendo el comportamiento de la especie ante el clima actual, se puede intentar predecir cuál va a ser su respuesta ante posibles escenarios de cambio climático futuros y de este modo aplicar medidas de gestión. Finalmente se han generado cartografías analizando las funciones respuesta de *Fagus sylvatica* con respecto al clima y en gradiente altitudinal en el Parque Natural del Moncayo.*

Palabras Clave: *Fagus sylvatica, dendrocronología, cambio climático, sistemas de información geográfica, R-project.*

Abstract

*The Iberian Peninsula is being affected by a process of changes in climate that are causing impacts in the distributions of plant species. The species *Fagus sylvatica*, which is widely distributed in Europe having its southern limit in Spain due to climatic constraints, has been studied. We analyzed samples of *Fagus sylvatica* in the southern limit of the species, located in the natural park of Moncayo, integrating climate information and geographic information in a GIS, in order to obtain the response functions of *Fagus sylvatica*. Knowing the behavior of the species in the current climate, we can try to predict what will be their response to potential future climate change scenarios and thus management measures. Finally, maps have been generated by analyzing the response functions of *Fagus sylvatica* on climate and altitudinal gradient in the Moncayo Natural Park.*

Key Words: *Fagus sylvatica, dendrochronology, global change, geographic information systems, R-project.*

Mis más sinceros agradecimientos a mis directores del estudio, Miguel Ángel y Martín, por su dirección y enseñanza de nuevas metodologías y por transmitirme la motivación y necesidad de seguir investigando.

Índice

1. Introducción	7
2. Objetivos	9
3. Área de estudio	10
4. Metodología	13
4.1 <i>Contribuir en la creación de una red dendrocronológica de Fagus sylvatica en el Moncayo</i>	13
4.1.1. <i>Colaboración en muestreos de campo</i>	13
4.1.2. <i>Preparación de las muestras en el laboratorio</i>	15
4.1.3. <i>Sincronización</i>	16
4.1.4. <i>Medición del grosor de anillos (Lintab y Tsap)</i>	16
4.1.5. <i>Verificación</i>	17
4.1.6. <i>Creación de cronologías</i>	17
4.2. <i>Obtención de datos climáticos a través de grids del CRU</i>	18
4.2.1. <i>Descarga de ficheros</i>	18
4.2.2. <i>Rutina en R</i>	19
4.3. <i>Análisis dendroclimático</i>	20
4.4. <i>Creación de un SIG para el hayedo del Moncayo</i>	23
4.4.1. <i>Creación de una base de datos y su inserción en un SIG</i>	23
4.4.2. <i>Delimitación del área de distribución del hayedo en el Moncayo</i> 25	
4.4.3. <i>Descarga de modelo digital de elevaciones (MDE) y cálculo de las variables necesarias para la modelización</i>	25
4.4.5. <i>Integración de los coeficientes de correlación</i>	27
4.5. <i>Modelización de las variables espaciales de las relaciones dendroclimáticas en el conjunto del área de distribución del hayedo del Parque Natural del Moncayo</i>	27
4.5.1. <i>Análisis de regresión múltiple siguiendo el método stepwise</i> .27	
4.5.2. <i>Validación de los modelos, R², RMSE, y gráficos de dispersión y significación de los modelos</i>	29
4.6. <i>Interpolación mediante modelos de regresión y generación de cartografías dendroclimáticas</i>	29
4.6.1. <i>Mapas de correlaciones</i>	29
4.6.2. <i>Mapas de correlaciones sobre modelo digital en tres dimensiones</i>	33
5. Resultados	33
5.1. <i>Contribuir en la creación de una red dendrocronológica de Fagus sylvatica en el Moncayo</i>	33
5.2. <i>Obtención de datos climáticos a través del Grid del CRU</i>	36
5.3. <i>Análisis dendroclimático</i>	46

5.4. Creación de un SIG para el hayedo del Parque Natural del Moncayo.....	50
5.5. Modelización de las variaciones espaciales de las relaciones dendroclimáticas en el conjunto del área de distribución del hayedo en el Moncayo.....	54
5.6. Interpolación y generación de cartografías dendroclimáticas.....	58
6. Conclusiones.....	71
6.1. Conclusiones respecto a los resultados obtenidos	71
6.2. Conclusiones respecto de la metodología utilizada.....	72
7. Referencias.....	73
Weisberg, S., 1985. Applied Linear Regression, 2nd ed., John Wiley, New York, 324 pp.	74

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de localización del P.N. del Moncayo.....	10
Figura 2. Mapa de localización del P.N. del Moncayo en Aragón.	11
Figura 3. Mapa de distribución de <i>Fagus sylvatica</i> en Europa	12
Figura 4. Puntos de extracción de las muestras de hayas.....	13
Figura 5. Mediciones en bruto.....	17
Figura 6. Cronologías estandarizadas	18
Figura 7. Script de R para los datos descargados del CRU	19
Figura 8. Script para calcular las funciones respuesta y generar gráficos...21	
Figura 9. Preparación datos climáticos	22
Figura 10. Base de datos	24
Figura 11. Variables dependientes e independientes.....	28
Figura 12. Coeficientes para el modelo de regresión.....	30
Figura 13. Interpolación con máscara.....	31
Figura 14. Leyenda de valores de correlación	32
Figura 15. Gráfico del grosor de los anillos en escala logarítmica	34
Figura 16. Cronología nº29	35
Figura 17. Cronologías de <i>Fagus sylvatica</i> del Moncayo.....	35
Figura 18. Gráfico de anomalías de T ^a y precipitación.....	36
Figura 19. Serie temporal de temperatura y precipitación del área de estudio. Periodo 1940-2006	37
Figura 20. Relación entre cronología MY29 y precipitación total anual.....	38
Figura 21. Relación entre cronología MY29 y temperatura media anual	38
Figura 22. T ^a y precipitación de verano, periodo 1940-2006.....	39
Figura 23. Anomalías de T ^a en verano	40
Figura 24. Anomalías de precipitación de verano.....	40
Figura 25. T ^a y precipitación de otoño, periodo 1940-2006	41
Figura 26. Anomalías de temperatura de otoño.....	41
Figura 27. Anomalías de precipitación de otoño	42
Figura 28. T ^a y precipitación de invierno.....	42

Figura 29. Anomalías de T ^a con respecto a la media en invierno	43
Figura 30. Anomalías de precipitación respecto a la media de invierno.....	44
Figura 31. Temperatura y precipitación en primavera	44
Figura 32. Anomalías de T ^a con respecto a la media de primavera	45
Figura 33. Anomalías de precipitación con respecto a la media de primavera	45
Figura 34. Gráfico de coeficientes de correlación MY29	46
Figura 35. Gráfico de función respuesta de MY29.	47
Figura 36. Gráfico de correlaciones con ventana móvil, de MY29.....	48
Figura 38. Resumen de coeficientes de correlación significativos.....	49
Figura 37. Gráfico de coeficientes de correlación, MY1	49
Figura 39. Coeficientes de correlación en el SIG	50
Figura 40. Límites hayedo.....	51
Figura 41. Modelo digital de elevaciones	52
Figura 42. Modelo de sombreado	52
Figura 43. Radiación solar directa	53
Figura 44. Mapa de orientaciones y pendientes del bosque de hayas	54
Figura 45. Tabla de valores de coeficientes, r ² y sig.....	55
Figura 46. Gráfico de dispersión de la temperatura de abril.....	56
Figura 47. Gráfico de dispersión precipitación previa de diciembre	56
Figura 48. Gráfico dispersión precipitación de junio	57
Figura 49. Gráfico de dispersión de la temperatura de enero	57
Figura 50. Proceso de generación de cartografías.....	58
Figura 51. Mapa de correlación de temperatura en otoño del año previo ...	60
Figura 52. Mapa de correlación de temperatura de invierno.....	61
Figura 53. Mapa de correlación de temperatura de primavera.....	62
Figura 54. Mapa de correlación de temperatura de verano	63
Figura 55. Mapa de correlación de temperatura de otoño	64
Figura 56. Mapa de correlación de precipitación de septiembre del año previo	66
Figura 57. Mapa de correlación de precipitación de invierno	67
Figura 58. Mapa de correlación de precipitación de primavera	68
Figura 59. Mapa de correlación de la precipitación de verano	69
Figura 60. Mapa de correlación de la precipitación de otoño	70
Ilustración 1. Extracción de muestras con barrena pressler	14
Ilustración 2. Microtomo	15
Ilustración 3. Mesa de medición y lupa binocular	16
Ilustración 4- Extracción de la precipitación de la coordenada 41.75N, 1.75W	20
Ilustración 5. Localización de las cronologías	24

1. Introducción

Ante el inminente proceso de desertización que se está produciendo en la Península Ibérica (Puigdefábregas, 1998) y las perspectivas que los escenarios climáticos pronostican para el sur de Europa y más concretamente para España, parece fundamental conocer el comportamiento de la flora que en estos momentos se distribuye a lo largo de la Península Ibérica para tratar de minimizar en la medida de lo posible los efectos del cambio climático. En este contexto se enmarca el estudio de este trabajo sobre la especie *Fagus sylvatica* como observatorio específico del cambio climático. La especie estudiada tiene su límite altitudinal en Europa en 38°N en el volcán Etna en Sicilia, pero en la Península Ibérica, el límite de un bosque de hayas de gran extensión lo encontramos en el Parque Natural del Moncayo. Por tanto, se considera fundamental conocer y estudiar la especie dada la incertidumbre existente ante los potenciales efectos del cambio del clima en su dinámica y en su distribución. El Parque Natural del Moncayo constituye el límite sur del área de distribución de *Fagus sylvatica* y por tanto representa un ecotono climático en el que los efectos del cambio del clima se manifiestan con antelación y mayor intensidad (Dittmar, C et al, 2003). En este contexto, el estudio de su comportamiento puede ser fundamental para conocer el futuro de los bosques de hayas de Francia o Alemania a medida que los efectos del cambio climático vayan en aumento.

Para el estudio del comportamiento y desarrollo de la especie se ha utilizado la dendrocronología. Se ha manejado la dendrocronología como herramienta para determinar qué elementos del clima condicionan la dinámica de crecimiento de las especies. Además, conjuntamente con datos climáticos, tiene un gran potencial para establecer relaciones clima-crecimiento actual y por lo tanto también para predecir dinámicas de cambio en el futuro. Al mismo tiempo, se pretende realizar un análisis de la señal climática en el gradiente altitudinal (gradiente térmico) como aproximación de cómo esa señal climática puede verse modificada latitudinalmente (gradiente térmico) ante diferentes escenarios de cambio del clima.

La integración de toda la información en un sistema de información geográfica (SIG en adelante) es fundamental para comprender y analizar las características biogeográficas de la especie. En este sentido, pocos son los trabajos donde la información obtenida mediante la dendrocronología, la climática y la puramente geográfica se ha integrado en un SIG. A este respecto, la creación de un SIG va a permitir la identificación de la respuesta diferencial del haya a lo largo de los diferentes gradientes geográficos (altitud, pendiente, orientaciones, etc) del Parque Natural del Moncayo. Este

conocimiento es una herramienta básica para establecer medidas de gestión del Parque y para cuantificar el balance de carbono actual y futuro.

Para finalizar, el autor de este trabajo está cursando el doctorado de Geografía y Ordenación del Territorio y este trabajo se enmarca como un apoyo en la formación metodológica, en herramientas como la dendrocronología, la estadística aplicada con R y los sistemas de información geográfica.

2. Objetivos

El propósito final de este trabajo es la obtención de unos resultados, en forma de cartografías, a partir de la extracción de muestras y el análisis dendroclimático de las mismas. Se han establecido, por tanto, seis objetivos principales mediante los cuales se van a ir resolviendo cada uno de los pasos necesarios para obtener los resultados finales. Al mismo tiempo, cada objetivo cuenta con una serie de metodología y tareas necesarias para llevarlo a cabo, de tal forma que el trabajo está estructurado en función de los objetivos, sus métodos y finalmente los resultados para cada objetivo. Al mismo tiempo, para la realización de estos objetivos se ha tenido que llevar a cabo un proceso de formación metodológica. A continuación se muestran enumerados los objetivos y en cursiva la metodología aprendida al respecto de cada objetivo.

1. Contribuir en la creación de una red dendrocronológica de *Fagus sylvatica* en el Moncayo.
 - a. *Extracción de muestras y manejo de material específico.*
 - b. *Preparación de las muestras en el laboratorio.*
 - c. *Análisis de las muestras y creación de las cronologías.*
2. Obtención de datos climáticos a través del Grid generado por el Climate Research Unit (en adelante CRU).
 - a. *Formación en estadística aplicada con el programa estadístico de software libre R (realización del curso de R impartido en la Universidad de Zaragoza). Creación de scripts complejos.*
3. Análisis dendroclimático de las muestras de *Fagus sylvatica* y los datos climáticos.
 - a. *Formación en análisis de datos mediante software específico, Dendroclim(Biondi, 2004)*
4. Creación de un sistema de información geográfica (SIG) para el hayedo del Moncayo.
 - a. *Integración de datos dendroclimáticos en un SIG y aplicación de los conocimientos adquiridos en el Máster.*
5. Modelización de las variaciones espaciales de las relaciones dendroclimáticas en el conjunto del área de distribución del hayedo del Moncayo.
 - a. *Formación en estadística.*
6. Modelos de regresión y generación de cartografías dendroclimáticas.
 - a. *Aplicación de los conocimientos adquiridos en el Máster para la creación de cartografías de alta calidad.*

3. Área de estudio

Entre la frontera del valle del Ebro y la meseta castellana se encuentra una sierra montañosa denominada Moncayo que por su elevada altitud en mitad de una penillanura, sus variados climas y microclimas, y su riqueza tanto en flora como en fauna le confieren un carácter especial y único.

Las características tan especiales en cuanto a ambientes y paisajes provocaron que ya desde 1927, y siguiendo la estela del Parque Nacional de Ordesa, el entorno de la Dehesa del Moncayo fuera declarado Sitio Natural de Interés Nacional. Hecho que provocaría que desde entonces bosques de hayedos, robledales y pinares de repoblación quedarán protegidos dada su gran riqueza ecológica. En 1978 pasa a llamarse Parque Natural de la Dehesa del Moncayo, pero tras la aprobación del Plan de Ordenación de los Recursos Naturales, en 1998, se amplía su superficie y se reclasifica como Parque Natural del Moncayo. En la Figura 1 vemos la localización del Parque Natural en el conjunto de España. En el mapa de localización se observa cómo el Parque está localizado en el límite oeste de la provincia de Zaragoza, pero de hecho el Moncayo también se adentra en la provincia de Soria, formando así pues una barrera natural entre Aragón y Castilla y León.

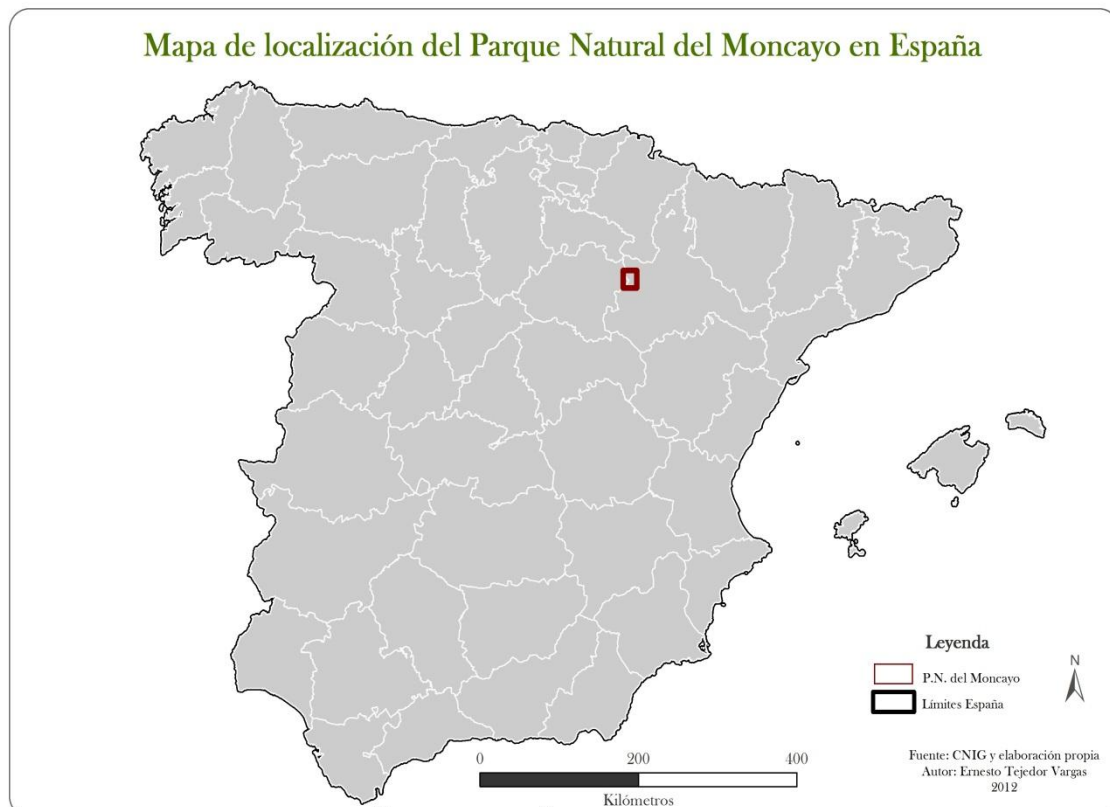


Figura 1. Mapa de localización del P.N. del Moncayo

En el Moncayo se encuentra la cumbre de la cordillera Ibérica, con los 2.315 metros del Pico San Miguel, además la sierra del Moncayo está orientada al noreste-sureste, siendo una gran barrera para el aire cargado de humedad procedente del mar Cantábrico. En la Figura 2 se muestra la localización más precisa del Parque Natural del Moncayo dentro de la provincia de Zaragoza y sobre un modelo digital de elevaciones destaca el bosque de hayas, lugar en el que se va a centrar todo el estudio.

Cómo se puede apreciar el bosque de hayas está situado en las laderas nortes, ya que son estas mismas laderas las que interceptan las masas de aire húmedas procedentes del Cantábrico produciéndose al ascender y disminuir la temperatura fenómenos de condensación del vapor de agua y precipitación dando lugar a frecuentes nieblas y

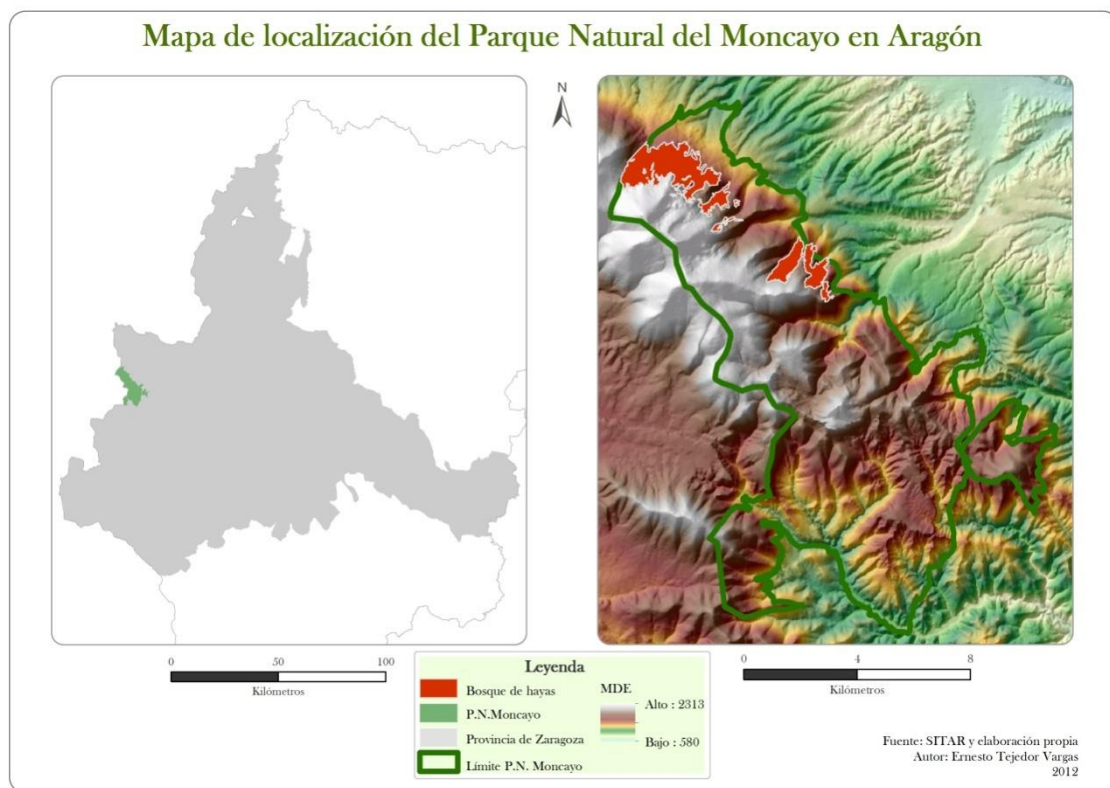


Figura 2. Mapa de localización del P.N. del Moncayo en Aragón.

lluvias. Este fenómeno permite la presencia de bosques húmedos como las hayas ligados también a la humedad edáfica y a la frecuencia de manantiales y turberas.

La importancia del bosque de hayas del P.N. del Moncayo radica en que está localizado al sur de Europa, al límite de lo que podría considerarse su ecotono, por tanto, ante los futuros cambios del clima, podría ser el primer lugar en presentar cambios importantes que afectaran de manera directa al bosque de hayas. Por este hecho, se considera crucial el estudio de esta especie tan peculiar y en esta localización en concreto como observatorio del cambio climático. Al

mismo tiempo, los cambios que aquí se produzcan podrán servir como ejemplo de lo que en un futuro ocurrirá en los bosques de hayas situados más al norte como los de Francia o Alemania.

Como se muestra en la Figura 3, el haya se encuentra distribuida en el hemisferio norte, entre los 60°N y los 38°N. De este a oeste se encuentra desde Inglaterra hasta Crimea. Tras la última glaciación, hace 9000 años, los hayedos quedaron reducidos a bosques en los Cárpatos, los Pirineos y la Cordillera Cantábrica. Desde entonces se han ido expandiendo hasta su distribución actual, que mantiene desde hace alrededor de 3000 años. Se calcula que su velocidad de expansión fue de 4 km al año (Menéndez Valderrey, 2006).

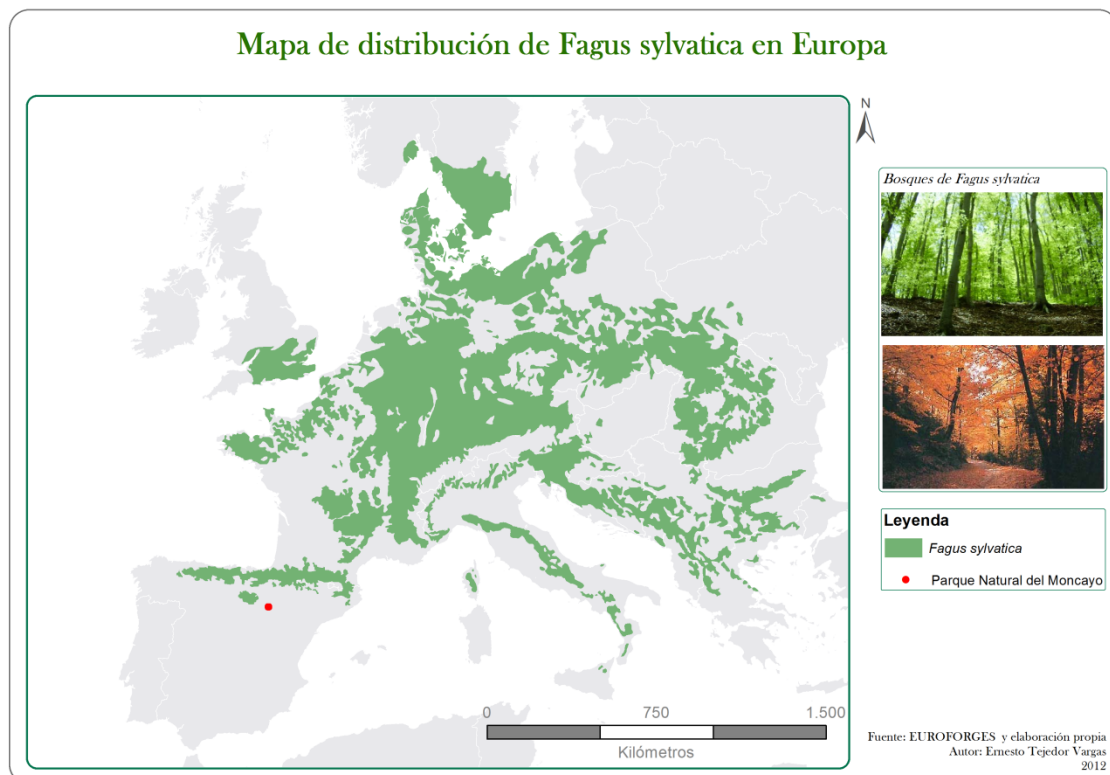


Figura 3. Mapa de distribución de *Fagus sylvatica* en Europa

4. Metodología

La metodología que se ha llevado a cabo sigue los objetivos marcados desde el comienzo y para resolverlos satisfactoriamente se han realizado diferentes tareas.

4.1 Contribuir en la creación de una red dendrocronológica de *Fagus sylvatica* en el Moncayo

Para acometer el primer objetivo, contribuir en la creación de una red dendrocronológica de *Fagus sylvatica* en el Moncayo, se han realizado los siguientes trabajos:

4.1.1. Colaboración en muestreos de campo

El trabajo de campo es el primer paso en un trabajo de características dendrocronológicas. Previamente a la salida de campo, se ha realizado un análisis del área de estudio con el objetivo de elegir las localizaciones más óptimas para el objetivo marcado. En este caso se pretende estudiar el gradiente altitudinal de las hayas en el Moncayo, por tanto se va a tratar de muestrear siguiendo la estratificación del bosque de hayas. En la Figura 4 se observa el

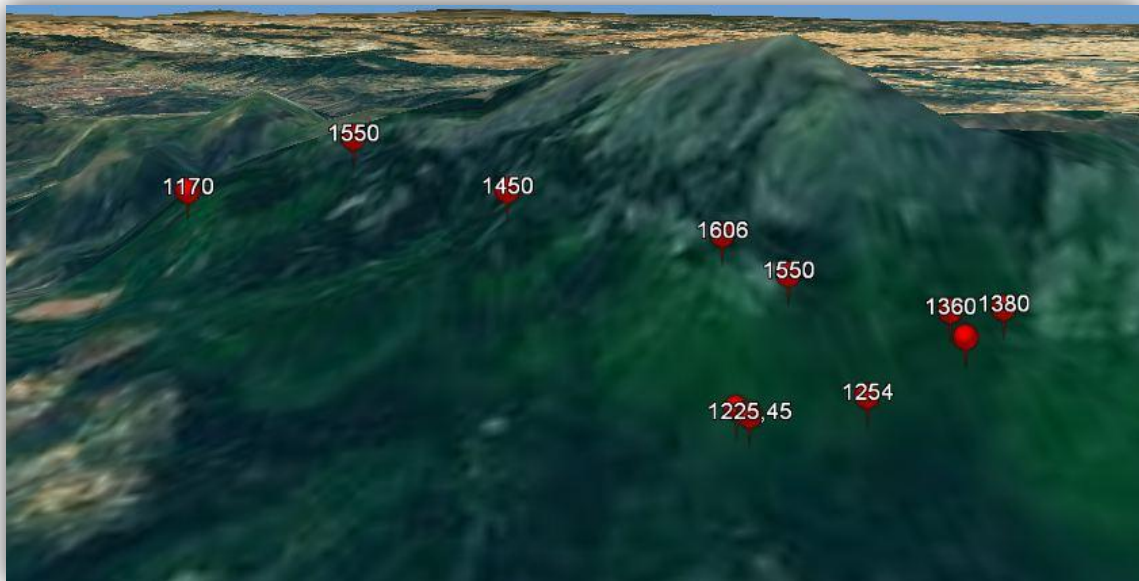


Figura 4. Puntos de extracción de las muestras de hayas.

muestreo realizado sobre una base del modelo digital de elevaciones en 3D, indicando así mismo las diferentes altitudes en las que se iba muestreando, variando en todo el rango de crecimiento del bosque de hayas, desde 1.170 a 1.606 metros, intercalando muestras cada 50 o 100 metros en altitud.

Se ha colaborado en la extracción de 262 muestras de *Fagus sylvatica* las cuales conformarán 15 cronologías. Hay que remarcar que de cada árbol se extraen dos muestras, la A y la B con diferentes orientaciones para poder contrastar la información obtenida. En la Ilustración 1 se observa al autor realizando una extracción de una muestra.



Ilustración 1. Extracción de muestras con barrena pressler

Las muestras se extraen a una altura de 1,30 metros mediante barrenas *pressler*. Es una barrena de acero con una longitud que varía de 150 a 800 mm en incrementos de 50 mm, la longitud de la barrena a utilizar viene dada por el radio del árbol y unos diámetros normalizados, en el caso de las barrenas *pressler* de HAGLOF de 4,35 mm- 5,15 mm y 12,00 mm. El diámetro utilizado normalmente es el de 5,15 mm. El instrumento se completa con una empuñadura para ayudar a la perforación y con un saca muestras o extractor para obtener la muestra. Una vez extraídas, las muestras se codifican y se envuelven en papel de aluminio para su traslado al laboratorio. Luego

las muestras se dejan en el laboratorio de manera tal que lleguen a un equilibrio con las condiciones higrotérmicas del ambiente. Las muestras, en un segundo momento, se ponen en una porta-muestra con los anillos perpendiculares al plano de soporte y luego se lijan, de manera tal que se puedan evidenciar los anillos. La lectura de los anillos se efectúa siempre en dirección radial, desde el cámbium hacia el interior. Las lecturas de las muestras se definen como "cronología elementales".

4.1.2. Preparación de las muestras en el laboratorio

El siguiente paso dentro del proceso es la preparación de cada muestra para ser capaces de medir el grosor de los anillos. Para ello se realizan varias tareas. La primera tarea es dejar secar las muestras recién extraídas, ya que normalmente contienen bastante humedad y es más difícil pegarlas si se realiza inmediatamente, por ello se deja que lleguen a un equilibrio con las condiciones higrotérmicas del ambiente. En un segundo paso, se ponen en un porta-core con los anillos perpendiculares al plano de soporte. A su vez, se indica el código que se había dado en el campo, por ejemplo MY_FS01A (Moncayo, *Fagus sylvatica*, muestra A) y se prensa la muestra con cinta de pintor. Posteriormente se realiza un recuento y verificación del estado de las muestras y se introduce todo en una base de datos.

Tras pasar dos semanas, se retira la cinta de pintor y se limpia la muestra de posibles restos de cola blanca. El siguiente paso es el lijado de la muestra, para dejar la muestra limpia de impurezas. Posteriormente, se procede a cortar la muestra mediante el micrótopo (Ilustración 2) hasta dejar la superficie de la muestra limpia de impurezas para poder ver los anillos en las mejores condiciones.



Ilustración 2. Microtopo

4.1.3. Sincronización

Una vez que todas las muestras han quedado debidamente lijadas y cortadas, es el momento de llevar a cabo la sincronización. Este proceso consiste en la datación de la muestra contando el número de anillos de cada muestra. La sincronización se puede realizar siguiendo varios métodos, pero en este caso se ha optado por la digitalización de cada una de las muestras. La mayor parte se han escaneado con alta resolución y en alguna muestra con gran cantidad de anillos se han tomado fotografías con mayor resolución que el escáner. De este modo, se tiene una base de datos digital con todas las muestras debidamente codificadas.

Se procede al datado de los anillos, mediante un programa de edición fotográfica, en este caso SerifPhotoPlus, el cual permite otorgar etiquetas individualizadas a cada anillo. Teniendo en cuenta que la muestra 01A deberá estar sincronizada con la 01B, y al mismo tiempo si se aprecia algún anillo de crecimiento característico, deberá aparecer en todas las muestras de la zona, y habrá que sincronizarlo como el mismo año para todas ellas. Es un proceso complejo y duradero, ya que el árbol puede producir anillos dobles en un mismo año de crecimiento o no generar anillo, y por tanto tener *missing rings* y generar confusión.

4.1.4. Medición del grosor de anillos (Lintab y Tsap).

Tras sincronizar las muestras y tenerlas correctamente datadas, se lleva cada una de las muestras a la mesa de mediciones y ayudados en otra pantalla con las dataciones digitales, se procede a la medición del grosor de los anillos de crecimiento. Es un proceso laborioso y complejo en el que la concentración tiene que ser máxima para no omitir la medición de ningún anillo.



Ilustración 3. Mesa de medición y lupa binocular

4.1.5. Verificación

Como apoyo a la sincronización de las mediciones se utiliza el programa COFECHA (Holmes, 1983) que compara cada una de las series medidas con una cronología de referencia, construida esta con el promedio de todas las series ya estandarizadas. De esta forma se obtienen unos coeficientes de correlación, si los mismos son mayores de 0,3281 se puede considerar la medición como correcta. COFECHA por tanto, es un programa para el control de la calidad y exactitud del datado de mediciones o muestras que son sometidas al procedimiento de cros-datado.

4.1.6. Creación de cronologías

El siguiente proceso tras la obtención de los datos y su verificación es el tratamiento estadístico de los mismos para la creación de cronologías. Esto se realiza mediante el programa ARSTAN (Holmes, 1992) bien en la versión ejecutable en formate de programa o bien en R ejecutando el paquete dplR (Bunn, 2012). Con el tratamiento de datos estadístico se consigue una estandarización de cada muestra, intentando eliminar o evitar los efectos de la edad, perturbaciones o competencias entre los individuos, ya que en ese caso lo que interesa es ver cómo afecta el clima al crecimiento de los mismos.

Como se muestra en el siguiente ejemplo (Figura5) las mediciones en un primer momento muestran la influencia de diferentes factores como el clima, la polución, o el efecto de la edad.

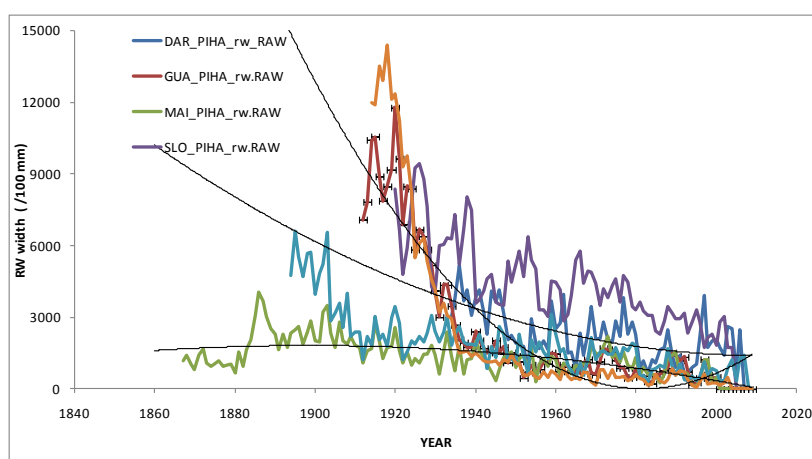


Figura 5. Mediciones en bruto

Mediante los procesos de estandarización se van eliminando las diferentes tendencias (*detrending*) para dejar únicamente las climática (Figura6).

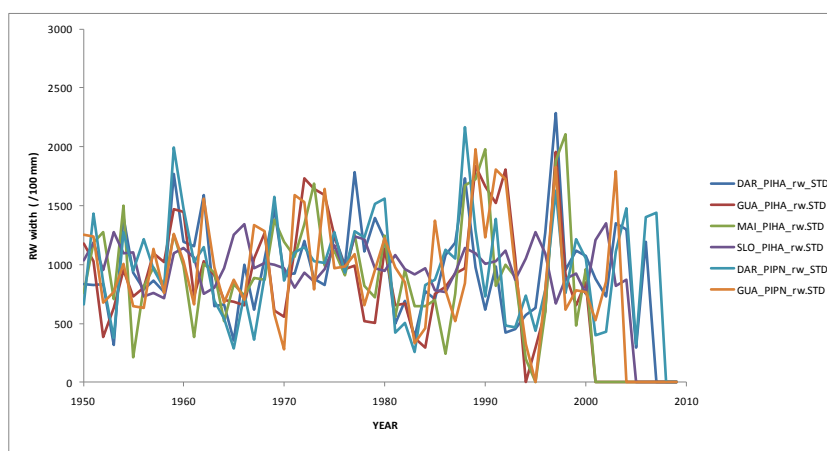


Figura 6. Cronologías estandarizadas

4.2. Obtención de datos climáticos a través de grids del CRU

El segundo objetivo, la obtención de datos climáticos a través del grid del Climate Research Unit (CRU), se enmarca en la necesidad de obtener una base de datos homogénea y comparable de un periodo largo de tiempo. En este caso desde 1901 a 2006 para poder sincronizarlo con las muestras de hayas. Este proceso se ha realizado en dos fases.

4.2.1. Descarga de ficheros

El proceso de descarga de ficheros se realiza desde la página web del CRU (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>) y para proceder a la descarga de ficheros hay que registrarse previamente indicando el propósito del trabajo y el director del mismo. Una vez obtenidas las claves que dan acceso a la web de descargas, se procedió a la descarga de todos los archivos climáticos del grid CRU 3.0 (Harris et al, bajo revisión); temperatura máxima, mínima y media, precipitación, vapor de agua, nubosidad y humedad. La resolución temporal es mensual y la resolución espacial es de 0,5°. Cada fichero tiene un tamaño de más de 2 gigas, por lo que resultaba imposible abrirlo con editores de texto o Excel. Para poder utilizarlo y convertirlo en ficheros más pequeños se creó una rutina de programación con R.

4.2.2. Rutina en R

R es un programa de estadística de código abierto que además de permitir realizar análisis complejos estadísticos y generar gráficos de alta calidad, permite programar rutinas para realizar procesos complejos iterativamente. Al descargar los ficheros surgió el problema de la imposibilidad de abrirlas, por tanto no se podía tratar con los datos. Para solucionarlo se creó un *script* que genera a partir del archivo principal, ficheros individuales cada uno de una latitud, comenzando en -89.75° hasta 89.75° , con intervalos de 0.5° . Cada fichero de latitud contiene todas las longitudes, de -179.75° a 179.5° . Este proceso se realiza con bucles o *loops* que ejecutan el proceso iterativamente para cada latitud. Una vez realizado este proceso, el cual tarda aproximadamente una hora y media para cada archivo general, se buscó la coordenada más próxima a la zona de muestreo en el Moncayo.

En la Figura 7 se muestra el script que se creó y a partir del cual se han podido utilizar los datos climáticos generados por el CRU. En la Ilustración 4 se muestra un ejemplo de cómo se han obtenido los datos una vez han sido extraídos con R.

```
dir.datos="C:/my_R_scripts/manejo_datos_CRU/cru_ts_3_10.1901.2009.pre.dat"
dir_output="C:/my_R_scripts/manejo_datos_CRU/output/prec_cru_lat_"
n.pixel.lat=360
n.pixel.lon=720
year.begin=1901
year.end=2006

#####

n.years<-year.end-year.begin+1
n.filas<-n.pixel.lat*n.years*12

a<-read.table("C:/my_R_scripts/manejo_datos_CRU/cru_ts_3_10.1901.2009.pre.dat")
#a<-a[seq,] non funziona perche' non c'e' piu' abbastanza memoria libera

seq.lat<-seq(-89.75,89.75,0.5)

b<-array(NA,c(n.years*12,n.pixel.lon))
for(i in 1:n.pixel.lat){
  seq<-seq(i,n.filas,n.pixel.lat)
  k<-1
  for(j in seq){
    b[k,]<-as.integer(a[j,])
    k<-k+1
  }

  year<-rep(year.begin:year.end,each=12)
  month<-rep(1:12,n.years)
  c<-cbind(year,month,b)

  seq.lon<-seq(-179.75,179.75,0.5)
  dimnames(c)<-list(NULL,c("year","month",seq.lon))

  write.table(c,paste(dir_output,seq.lat[i],".txt",sep=""),quote=FALSE,row.names=FALSE)
}
```

Figura 7. Script de R para los datos descargados del CRU

year	MO	MP	MQ	MR	MS	MT	MU	MV	MW
1901	198	223	296	483	658	713	640	500	473
1901	429	360	308	369	448	433	299	182	228
1901	527	560	595	562	504	442	351	225	280
1901	359	420	494	561	601	641	668	564	616
1901	328	440	562	651	734	682	464	197	118
1901	165	374	616	771	941	999	798	506	384
1901	134	139	158	207	283	306	252	150	124
1901	175	182	218	261	308	358	328	243	217
1901	409	301	146	337	604	762	683	573	581
1901	475	498	582	690	810	815	682	526	434
1901	530	436	371	516	650	673	562	451	413
1901	550	460	401	478	563	551	453	322	269
1902	8	43	95	163	226	224	155	83	42
1902	539	524	426	285	383	399	301	320	501
1902	104	99	115	218	324	354	262	147	125
1902	440	485	547	679	782	825	770	584	642
1902	413	370	295	283	263	354	614	719	966
1902	684	640	570	591	608	650	678	589	669
1902	269	231	185	185	197	223	257	216	257
1902	116	124	154	184	221	281	326	314	352
1902	234	234	261	480	681	748	531	299	257
1902	552	522	512	411	320	270	293	302	352
1902	1102	1045	1056	1219	1348	1362	1225	1071	1022
1902	464	468	489	492	504	506	524	474	514
1903	249	264	326	472	605	611	488	332	273
1903	15	38	73	75	72	72	74	66	89
1903	178	242	322	325	320	329	332	276	308
1903	364	459	561	556	521	478	421	298	272
1903	867	953	964	970	962	903	795	557	473
1903	708	680	622	606	591	586	561	450	471
1903	233	226	231	252	293	304	270	178	169
1903	107	110	133	141	147	161	157	125	126
1903	362	345	302	230	153	145	190	222	308
1903	629	477	320	256	199	162	159	149	159
1903	49	94	152	165	174	163	142	122	122
1904	797	837	906	893	888	820	695	514	452
1904	587	673	788	673	548	456	417	331	330

Ilustración 4- Extracción de la precipitación de la coordenada 41.75N, 1.75W

4.3. Análisis dendroclimático

De acuerdo al tercer objetivo se explica a continuación cómo se ha realizado el análisis dendroclimático.

Una vez se han descargado y homogeneizado los datos climáticos y se ha finalizado el proceso de medición y verificación del grosor de los anillos, es decir, se han generado las cronologías, el siguiente paso es realizar el análisis dendroclimático. Este análisis tiene como propósito establecer las relaciones entre crecimiento radial y clima. Estas relaciones se evaluaron usando, por un lado las cronologías residuales de índices de crecimiento y por otro las series climáticas de temperatura media y precipitación total mensual. Para este caso se determinó un periodo común a analizar, de 1940 a 2006, ya que los datos climáticos del CRU de comienzos del sXX pueden estar sesgados. Al mismo tiempo, se determinaba un periodo común en las cronologías, las cuales no tienen la misma extensión.

La relación crecimiento-clima se cuantificó utilizando funciones de correlación, basadas en coeficientes de correlación de Pearson, entre los índices de crecimiento y los datos climáticos mensuales del periodo comprendido entre 1940 y 2006. Así mismo, se utilizaron funciones respuesta. Una función respuesta es una representación de una regresión lineal múltiple que relaciona los componentes principales de los datos climáticos mensuales, para una serie de años,

y los índices de grosos de los anillos formados en esos años (Fritts, 1976).

El crecimiento radial suele estar también determinado por el clima del año anterior al de la formación del anillo, por lo que la ventana de correlación clima-crecimiento incluyó desde septiembre del año anterior al crecimiento hasta diciembre del año de formación del anillo.

Los coeficientes de correlación y de respuesta se calcularon utilizando dos métodos. Por un lado el programa Dendroclim (Biondi, 2004), en el cual introduces los datos climáticos y las cronologías por separado, cada una con un formato en fichero de texto específico, y te devuelve los coeficientes. Pero este proceso hay que realizarlo tantas veces como cronologías tengas.

Por otro lado, para realizar esta acción más rápida y de manera iterativa se utilizó el paquete de datos para R denominado dplR (Bunn, 2008), el cual contiene módulos que permiten desde tratar con las cronologías en bruto, hasta generar gráficos de significación de las funciones respuesta. En la Figura7 se observa el script creado para realizar las funciones respuesta y las funciones de correlación.

```
#leer archivos rw1 y guardarlo en txt.
library(bootRes)
library(dplR)
require(bootRes)

fagus <- read.rwl('MY01.rwl')
write.table(fagus, file="fagus1.txt",quote=FALSE ,sep = '\t',row.names=TRUE,col.names=FALSE)

#bootRes, funciones respuesta y correlaciones
#dcc(chrono, clim, method = "response", start = -6, end = 9, timespan =
#NULL, vnames = NULL, sb = TRUE, boot = TRUE, ci = 0.05)

#dir.datos="F:/TFM/Dendroclim/Datos_xra_declim"
a <- read.table('MY29FS_RES.txt', header=FALSE,row.names='v1')#para que ponga los años como columnas
#a
#row.names(a)='v1'
#names(a)
#row.names(a)
ttclim <- read.table('Datos_clima_1940_2006.txt',header=TRUE)
dc.corr <- dcc(a, ttclim, method = "correlation",start = -9, end=12, timespan=NULL, vnames=NULL,
sb=TRUE,boot =TRUE,ci=0.05)
#png(file = "myplot.png")
#dcpplot(dc.corr)
dcpplot(dc.corr, ci = FALSE, sig = TRUE, labels = NULL, vertical = FALSE)
#dev.off()

write.table(dc.corr, file = "MY29FS_RES_corr.txt", append = FALSE, quote = FALSE, sep = "\t",
eol = "\n", na = "NA", dec = ".", row.names = TRUE,
col.names = TRUE, qmethod = c("escape", "double"),
fileEncoding = "")

dc.mov <- mdcc(a,ttclim,method="correlation",start=-9, end=12,timespan=NULL,vnames = NULL,
sb = TRUE, win.size = 43, win.offset =1,startlast = TRUE, boot = FALSE, ci = 0.05)

mdcplot(dc.mov)
#pdf(file="move_corr_MY3FS.pdf")
#mdcplot(dc.mov)
#dev.off()

write.table(dc.mov, file = "MY29FS_RES_cor_mov.txt", append = FALSE, quote = FALSE, sep = "\t",
eol = "\n", na = "NA", dec = ".", row.names = TRUE,
col.names = TRUE, qmethod = c("escape", "double"),
fileEncoding = "")

#mdcc(chrono, clim, method = "response", start = 4, end = 9, timespan =
#NULL, vnames = NULL, sb = TRUE, win.size = 25, win.offset =
```

Figura 8. Script para calcular las funciones respuesta y generar gráficos.

Además, se generaban gráficos de los valores de los coeficientes de correlación y función respuesta e indicando los valores significativos. La significación de los coeficientes de respuesta se calculó mediante una función denominada *bootstrap* dentro del

year	month	Tmp	Pre
1940	1	1.4	46
1940	2	5.4	33.3
1940	3	8.2	17.7
1940	4	9.5	36.9
1940	5	13	60.4
1940	6	16.6	98.8
1940	7	19.2	17.1
1940	8	19.9	30.9
1940	9	16.6	38.3
1940	10	10.3	75.9
1940	11	6.2	43
1940	12	1.4	14.1
1941	1	1.5	56.7
1941	2	4.7	58.6
1941	3	6.8	50.5
1941	4	7.9	85.6
1941	5	10.1	81.8
1941	6	16.9	54.2
1941	7	20.4	25.6
1941	8	19	39.9
1941	9	16.6	52.5
1941	10	11.4	10.1
1941	11	5.5	52
1941	12	2.1	20.9
1942	1	1.9	23.8
1942	2	1.3	16.3
1942	3	7.5	29.2
1942	4	9.7	70.6
1942	5	13.1	31.5
1942	6	18.1	47.2
1942	7	19.8	21.9
1942	8	19.8	31
1942	9	16.9	38.2
1942	10	13.1	76.5
1942	11	5.5	49.5
1942	12	3.2	36
1943	1	2.7	39.1
1943	2	4.1	9.6
1943	3	6.6	46.1
1943	4	10.9	69.9
1943	5	14.7	20.5
1943	6	18.8	25.8
1943	7	20.5	35.5
1943	8	21.1	33.9
1943	9	16.6	56.5
1943	10	11.6	37.1
1943	11	5.4	16.4
1943	12	2.8	61.1
1944	1	2	0.8
1944	2	1.6	20.8
1944	3	5.6	7.7
1944	4	10.4	39
1944	5	13.4	85.8
1944	6	17	56.2
1944	7	20.1	12.7

Figura 9. Preparación datos climáticos

paquete `dpLR`. En el caso de análisis de la función respuesta, se toman 1000 muestras de la distribución original y realiza una descomposición eigen de la matriz. Se eliminan los eigenvectores no relevantes utilizando el criterio de PVP (Guiot, 1990). A continuación se calculan los valores de los componentes principales de las matrices a partir de las matrices reducidas de eigenvectores y la homogeneización de los predictores climáticos. Los coeficientes de respuesta se encuentran tras la descomposición del valor singular, y se realiza la prueba de significación utilizando el método de rango percentil del 95% (Dixon, 2001). Como ya se ha remarcado, en el caso de análisis de la función de correlación, los coeficientes son coeficientes de correlación de Pearson.

Para introducir los datos a las funciones en R tienen que tener un formato específico, ya que de otro modo no funciona. En este caso, las cronologías, son dos columnas en un fichero de texto, indicando en la primera el año y en la segunda el grosor de los anillos estandarizado. En el caso de los datos climáticos, es indispensable poner en la primera columna el año, en la segunda los meses del 1 al 12, en la tercera los valores de temperatura media, y en la cuarta los de precipitación como se observa en la Figura9.

Una vez introducidos los datos como matriz, con la función `dcc` sacamos los valores de los coeficientes tanto de correlación como de función respuesta. Añadiendo la función `dcplot` graficamos los resultados también resaltando los valores significativos.

Por último, se utiliza la función `write.table` para guardar en un fichero `.txt`, los valores de los coeficientes para cada cronología. Una vez determinadas las variables climáticas mensuales que más influían sobre el crecimiento radial, se realizaron correlaciones móviles entre crecimiento y variables climáticas mensuales para contrastar si la relación crecimiento-clima era estable en el tiempo, y en el caso de ser inestable, describir qué variables han cambiado y en qué sentido su influencia sobre el crecimiento. Para ello, se utilizó la función `mcc` introduciendo una ventana de tiempo móvil de 43 años (1941-1984, 1942-1985, ..., 1963-2006). Los resultados también son

graficados mediante la función *mdcplot* y guardados en ficheros .txt usando la función *write.table*.

4.4. Creación de un SIG para el hayedo del Moncayo.

La integración de la dendrocronología con los sistemas de información geográfica (en adelante SIG) se antoja tan fundamental en la era de las tecnologías de la información geográfica como novedoso. Pocos trabajos se han dedicado a tratar de gestionar la información obtenida a partir de muestras extraídas en el campo e integrarlas en un SIG una vez analizadas. Al tener la información georreferenciada, y sobre un modelo digital de elevaciones, la capacidad de análisis aumenta de manera considerable. Por este motivo, también se ha realizado un modelo digital de elevaciones en tres dimensiones sobre el cual se han analizado las cronologías y su gradiente altitudinal/térmico, además de posibles lugares de muestreo.

4.4.1. Creación de una base de datos y su inserción en un SIG

La creación del SIG se comienza en este tipo de trabajo desde el día en el que se extraen las muestras. Se han tomado los puntos de las zonas donde se extraen las cronologías con un receptor GPS Trimble, con el cual se obtienen los datos con precisión submétrica una vez se han corregido los datos en postproceso con corrección diferencial.

Una vez se tienen todas las coordenadas X e Y de los puntos donde se han extraído las cronologías, se añaden más datos que enriquezcan la geodatabase, y funcionen de atributos de las cronologías. Se añade un número de ID que será identificativo de esa cronología. Al mismo tiempo se marca el código dendrocronológico, en este caso MY01_FASY, por ejemplo. También se indica la zona de localización de las muestras, la fecha en la que han sido extraídas, el número de árboles sobre los que se han extraído muestras en cada cronología, la especie y la altitud, en este caso derivada del punto tomado con el GPS. En la Figura10 se puede observar el estado de la base de datos, el cual puede modificarse en cualquier momento si se realizaran nuevos muestreos.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Cod_Dendro	Id	Loc_muestr	Fecha	N_trees	Especie	Altitud
2	MY01_FASY	7	Hayedo Fuente la Teja	26/05/2010	12	Fagus sylvatica	1225,45
3	MY02_FASY	19	Penarroja	23/11/2010	7	Fagus sylvatica	1360,00
4	MY03_FASY	8	Pena Nariz	26/05/2010	13	Fagus sylvatica	1550,00
5	MY04_FASY	29	Canchal Barranco del Apio	21/06/2011	10	Fagus sylvatica	1450,00
6	MY05_FASY	32	Valdemanzano-Dehesa del Raso	21/06/2011	15	Fagus sylvatica	1550,00
7	MY06_FASY	15	Hoyo el Cerezo	17/11/2010	5	Fagus sylvatica	1170,00
8	MY10_FASY	25	Haya Seca	20/06/2011	10	Fagus sylvatica	1606,00
9	MY11_FASY	26	Fuente la Teja	20/06/2011	10	Fagus sylvatica	1220,00
10	MY14_FASY	33	Collado la Lona	21/06/2011	5	Fagus sylvatica	1442,00
11	MY16_FASY	37	Arroyo de Castilla	22/06/2011	10	Fagus sylvatica	1150,00
12	MY17_FASY	38	Arroyo de los Cejos	22/06/2011	10	Fagus sylvatica	1520,00
13	MY26_FASY	56	Barranco Castilla	17/11/2011	6	Fagus sylvatica	1380,00
14	MY27_FASY	57	Sendero Barranco Castilla	17/11/2011	6	Fagus sylvatica	1319,00
15	MY28_FASY	58	Sendero Barranco Castilla	17/11/2011	6	Fagus sylvatica	1254,00
16	MY29_FASY	59	Sendero Barranco Castilla	17/11/2011	6	Fagus sylvatica	1177,00

Figura 10. Base de datos

Tras generar la base de datos de las cronologías, el siguiente paso es insertarla en un SIG, en este caso, con el programa de la compañía ESRI, ArcGIS10. Mediante la función agregar X e Y, se introducen las coordenadas con toda la información de los atributos de las cronologías. Se han introducido en un espacio de trabajo previamente creado para no tener conflictos de sistemas de coordenadas. En este caso todo el SIG tendrá un sistema de coordenadas *WGS 1984 UTM Zone 30N* y proyección *Transverse Mercator*. Además, se han convertido a formato *shapefile* mediante la herramienta *Convert featureclass to shapefile*. En la Ilustración 5 se aprecia la localización de las muestras sobre la ortofoto del vuelo del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (en adelante PNOA) del año 2009, con una resolución espacial de 0,5 metros.

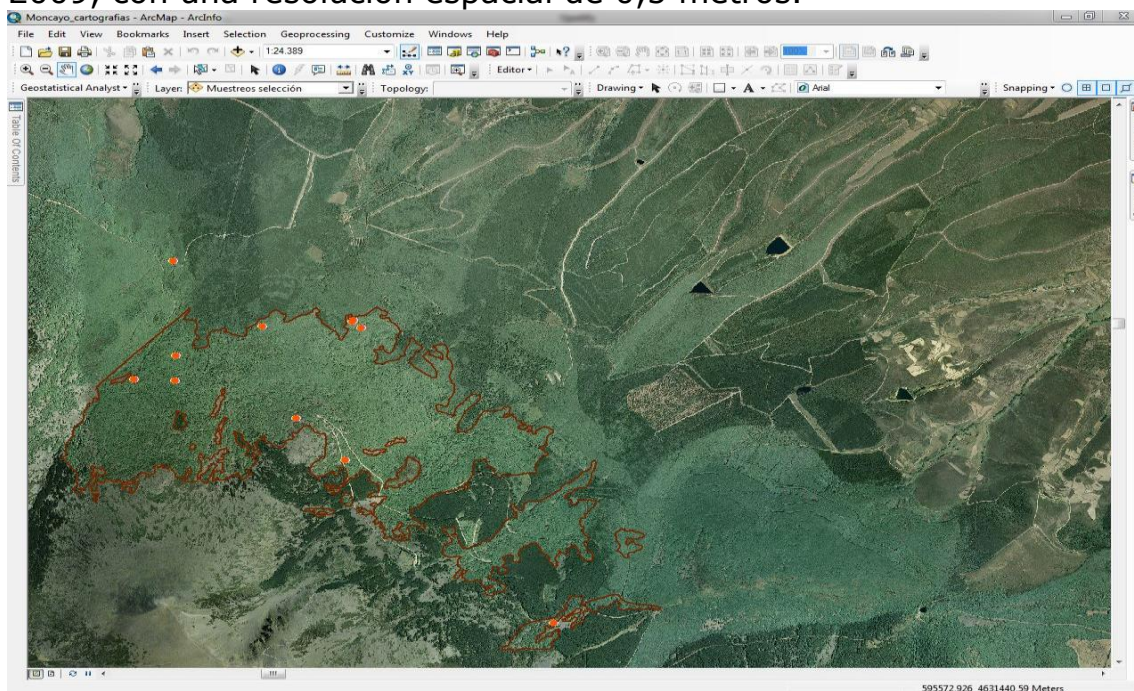


Ilustración 5. Localización de las cronologías

4.4.2. Delimitación del área de distribución del hayedo en el Moncayo

El área de distribución del hayedo en el Moncayo excede los límites de la Comunidad Autónoma de Aragón, cubriendo gran parte de la sierra en la provincia de Soria. Para este trabajo únicamente se ha delimitado la zona de hayedo enmarcada dentro del Parque Natural del Moncayo, por tanto únicamente en Aragón.

Para definir el área de hayedo se han utilizado varias fuentes de información:

- Ortofoto del PNOA de 2009, a 05 metros de resolución espacial. Aplicación del Sistema Territorial de Información de Aragón (SITAR). Se ha conectado en el SIG mediante el Servicio Web de Mapas (WMS), con la dirección [http://sitarimagenes.aragon.es/ecwp/ecw_wms.dll?service=wms&ServiceName=AragonFotos&].
- Mapa forestal de España a escala 1:50000, año 2007.
- Mapa de vegetación (Martínez del Castillo, 2011).

Tras la recopilación de la información necesaria, se han digitalizado las diferentes manchas de hayedo, siempre con la ayuda de la ortofoto, mapas de vegetación e inventario forestal. Obteniendo una capa final con el límite del hayedo, de la cual al mismo tiempo podemos extraer información, como por ejemplo de su extensión, en este caso 608 hectáreas de hayedo dentro del límite del Parque Natural del Moncayo.

4.4.3. Descarga de modelo digital de elevaciones (MDE) y cálculo de las variables necesarias para la modelización

Tras delimitar el área de distribución del hayedo, era necesario conseguir un modelo digital de elevaciones, ya que se va a tratar de modelizar el gradiente altitudinal/térmico. Por tanto, se descargó el MDE desde el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) desde el siguiente enlace [<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscar.do>].

El MDE descargado constituía toda la provincia de Zaragoza con una resolución espacial de 25 metros. Por tanto, se realizó una operación de *Clip* mediante la herramienta de ArcGIS de *Geoprocessing*. De esta forma se delimitó el MDE al Parque Natural del Moncayo y su entorno más cercano.

A partir del MDE se utilizó la herramienta *Surface* dentro del paquete *SpatialAnalyst Tools* para generar los siguientes mapas:

- Mapa de orientaciones.
- Mapa de pendientes.
- Mapa de sombreado.
- Mapa de radiación solar directa.

- Mapa del coseno de las orientaciones.
- Mapa del coseno de las pendientes.
- Mapa del coseno de la radiación solar directa.
- Mapa del coseno de las orientaciones dividido por la altitud.

El mapa de orientaciones está expresado en grados según la rosa de los vientos. El mapa de pendientes viene expresado en porcentajes, de tal forma que el 100% de pendiente equivale a 45°. El mapa de sombreado se generó con el objetivo final de mejorar la cartografía utilizando efectos de transparencia sobre el MDE para ofrecer sensación de relieve al lector. Básicamente resalta las laderas a partir del MDE.

Con el objetivo de establecer un modelo más preciso a la hora de realizar las regresiones múltiples se generaron los mapas con los cosenos de las variables. De esta forma los valores de esas cartografías variarían de -1 a 1 y podría tener más significación en el modelo de regresión. Estos mapas se generan mediante operaciones de álgebra de mapas con la herramienta *Raster calculator*.

Por otro lado, también se generó el modelo de radiación solar directa a partir del MDE. Dentro del paquete *SpatialAnalyst Tools* se encuentra la opción de *Solar radiation* dentro de la cual se elige *Area Solar Radiation*. Esta herramienta es un modelo que tiene predeterminados datos de radiación solar mundial. Por tanto hay que introducir parámetros como la latitud y la altitud, en este caso el modelo digital de elevaciones, o el intervalo de tiempo para el que queremos la radiación. Se ha elegido como espacio de tiempo todo el año 2011 con intervalos mensuales. El resto de parámetros son modificables pero el modelo te marca los más adecuados tras introducir la latitud de la zona de estudio.

4.4.4. Integración de los valores de las variables geográficas en las cronologías

Toda la información que se ha generado a partir del MDE no sería significativa para el propósito del trabajo si no la integramos en la información existente, es decir, en las cronologías. Para ello se ha utilizado la herramienta *Extract multivalued to points* dentro de *Extraction* en el paquete de *SpatialAnalyst Tools*. De esta forma, la información tanto de orientaciones, como de pendientes, etc, queda añadida como atributos a la tabla de datos de cada una de las 15 cronologías.

4.4.5. Integración de los coeficientes de correlación.

Para generar una base de datos completa de las cronologías se integran los valores de correlación que se habían obtenido en el análisis dendroclimático. Esta acción se realiza modificando el archivo .dbf que va asociado a cada cobertura *shapefile*. Simplemente, se abre el archivo .dbf en una hoja de Excel y se le añaden los datos, en este caso los valores de correlación. Al mismo tiempo, esta hoja de Excel va a servir para realizar la regresión múltiple, ya que contiene los valores de las variables geográficas más las correlaciones.

Una vez se han introducido los datos en Excel, se vuelve a añadir el archivo .xls como puntos X e Y mediante la opción *Add Data, Add XY Data*. Posteriormente se realiza la conversión a formato *shapefile* para ser capaces de modificar los atributos.

4.5. Modelización de las variables espaciales de las relaciones dendroclimáticas en el conjunto del área de distribución del hayedo del Parque Natural del Moncayo

4.5.1. Análisis de regresión múltiple siguiendo el método *stepwise*.

El objetivo final más importante es generar cartografías modelizando las variables espaciales dendroclimáticas que afectan al hayedo del Moncayo, para ello, es necesario realizar un análisis de regresión múltiple. El análisis de regresión múltiple es una técnica de análisis multivariable en la que se establece una relación funcional entre una variable dependiente a explicar y una serie de variables independientes o explicativas, en la que se estiman los coeficientes de regresión que determinan el efecto que las variaciones de las variables independientes tienen sobre el comportamiento de la variable dependiente (Weisberg, S. 1985).

En primer lugar se han preparado los datos para introducirlos en el programa de paquetes estadísticos SPSSv15. Los datos que se han introducido se han extraído de las cronologías que se habían implementado en el SIG y a las que se les habían añadido la información de las variables geográficas junto con los valores de correlación del análisis dendroclimático.

En la Figura11 se muestran tanto las variables dependientes como las independientes que han sido introducidas para determinar los modelos. El análisis de regresión múltiple se ha realizado mediante el método de *stepwise*, o regresión por pasos (Draper, N. and Smith, H, 1981), el cual es una versión modificada del proceso de regresión hacia adelante en la que en cada nuevo paso, cuando se incluye una nueva variable, además se reconsidera el mantener las que ya se habían añadido previamente, es decir que no sólo puede entrar una nueva variable en cada paso sino que puede salir alguna de las que ya estaban en la ecuación. El proceso finaliza cuando ninguna

variable de las que no están en la ecuación cumple la condición para entrar y de las incorporadas a la ecuación ninguna cumple la condición para salir.

Posteriormente, dentro del apartado de resultados, se mostrarán los coeficientes obtenidos para cada modelo y cómo se han utilizado para generar las cartografías.

Variables dependientes	Variables independientes
Tmp,prev,sep	Altitud
Tmp,prev,oct	Orientacion(Cos)
Tmp,prev,nov	Pendiente(cos)
Tmp,prev,dec	Rad_directa(Cos)
Tmp,curr,jan	Orientacio(cos)/altura
Tmp,curr,feb	
Tmp,curr,mar	
Tmp,curr,apr	
Tmp,curr,may	
Tmp,curr,jun	
Tmp,curr,jul	
Tmp,curr,aug	
Tmp,curr,sep	
Tmp,curr,oct	
Tmp,curr,nov	
Tmp,curr,dec	
Pre,prev,sep	
Pre,prev,oct	
Pre,prev,nov	
Pre,prev,dec	
Pre,curr,jan	
Pre,curr,feb	
Pre,curr,mar	
Pre,curr,apr	
Pre,curr,may	
Pre,curr,jun	
Pre,curr,jul	
Pre,curr,aug	
Pre,curr,sep	
Pre,curr,oct	
Pre,curr,nov	
Pre,curr,dec	

Figura 11. Variables dependientes e independientes

4.5.2. *Validación de los modelos, R^2 , RMSE, y gráficos de dispersión y significación de los modelos*

Los modelos de regresión se basan en hacer unas determinadas suposiciones sobre los datos y que éstas no siempre se cumplen, por lo que es preciso comprobar si las hipótesis básicas del modelo se dan en nuestros datos. Es lo que se conoce como diagnóstico del modelo (Rojo, 2007). En el caso de los modelos de regresión se utiliza el concepto de residuo, entendido como la diferencia entre el valor observado y el valor estimado por la ecuación de regresión, es decir lo que la ecuación de regresión no explica para cada unidad de observación.

En un modelo de regresión que sea adecuado los residuos deben seguir una distribución normal con media 0 y varianza constante, por lo que un posible diagnóstico puede ser comprobar esa situación. En este caso la comprobación se ha realizado mediante gráficos de dispersión que serán mostrados en el apartado de resultados.

De la misma forma también se ha comprobado la existencia de valores anómalos. Los valores extraños (outliers) son aquellos datos extremos, que parecen anómalos, y que unas veces son debidos a errores de registro al introducir los datos, pero en otras son valores correctos realmente observados. En el caso de la regresión su presencia puede alterar de forma notable los resultados. Se mostrarán los resultados posteriormente.

Por último, se realizaron gráficos de dispersión y significación de los modelos relacionándolos con la altitud de cada cronología. De esta forma se aprecia de manera eficaz si existe tendencia bien positiva o negativa, si no hay ningún tipo de tendencia, y si hay valores anómalos.

4.6. *Interpolación mediante modelos de regresión y generación de cartografías dendroclimáticas*

4.6.1. *Mapas de correlaciones*

Tras la realización de los modelos mediante el paquete estadístico SPSS, el último paso y necesario es la generación de cartografías. Son pocos los trabajos donde se ha conseguido integrar con éxito los análisis dendroclimáticos realizados con muestras y finalizarlos realizando modelos plasmados en cartografías. En este sentido, para conseguirlo se ha realizado un proceso de interpolación mediante modelo de regresión. El proceso de interpolación consiste en la estimación de los valores que alcanza la variable Z en un conjunto de puntos definidos por un par de coordenadas (X,Y) partiendo de los

valores medidos en una muestra de puntos situados en el mismo área de estudio (Vicente-Serrano, 2003).

En la Figura12 se muestran los coeficientes resultantes para el modelo de temperatura del año previo del mes de septiembre.

Coeficientes(a)					
Modelo	Coeficientes no estandarizados			Coeficientes t	
	B	Error típ.	Beta	B	Error típ.
1 (Constante)	-0,5369018	0,138826		-3,86744422	0,00194225
Altitud	0,00038272	0,00010159	0,72243567	3,76719	0,00234937
a Variable dependiente: Tmp,prev,sep					

Figura 12. Coeficientes para el modelo de regresión

Para insertar estos coeficientes en el SIG, debemos utilizar nuevamente el paquete de ArcMap *SpatialAnalyst Tools* dentro del cual se elige la herramienta *Map Algebra* y *Raster calculator*. El software ofrece una herramienta que permite realizar operaciones algebraicas con capas ráster. En este caso, a los coeficientes se multiplica el modelo digital de elevaciones de la zona de estudio siguiendo la ecuación *Coeficientes de correlación = a + bx* en este caso x es la altitud expresada en metros. No todas las variables presentaban significación con la altitud en el modelo. Es decir, esas variables influyen en el desarrollo de los hayedos pero se comportan igual independientemente de la altitud. Para estas variables se hace una media del conjunto de coeficientes de esa variable y se multiplica por 0 la altitud. Obtendremos un mapa con un único valor, pero igualmente importante en términos ecológicos.

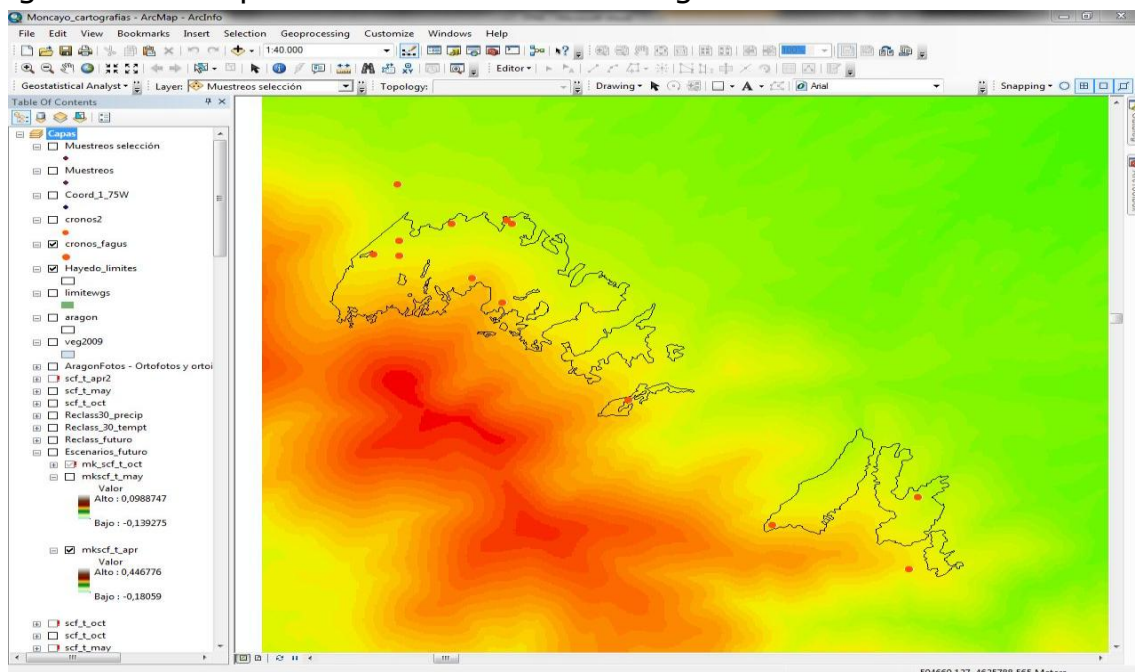


Ilustración 6. Interpolación con todo el MDE

Al realizar la operación, se genera un nuevo mapa con los valores de correlación interpolados para toda el área con el que contaba el MDE. Lógicamente los valores que se representan más allá de los límites de distribución del hayedo son insignificantes ya que no hay hayedo en esas localizaciones cómo vemos en la Ilustración 6. Por tanto, hay que realizar una operación de extracción para obtener únicamente los resultados para el límite del hayedo.

Esta operación se puede realizar de varias maneras, en este trabajo se ha optado por utilizar los límites del hayedo a modo de máscara y así extraer la información. Esta operación se realiza con el paquete para trabajar con capas raster *Spatial Analyst Tools*, dentro del cual existen herramientas de extracción, en este caso se ha escogido la herramienta de *Extract by mask*, utilizando como máscara los límites del hayedo, y como capa raster cada uno de los modelos que se iban generando con la calculadora raster a partir de los coeficientes de los modelos generados en SPSS.

El resultado de la extracción mediante máscara es el que observamos en la Figura 13. Únicamente obtenemos la interpolación para donde tiene significación, es decir, dentro del área de distribución actual del hayedo.

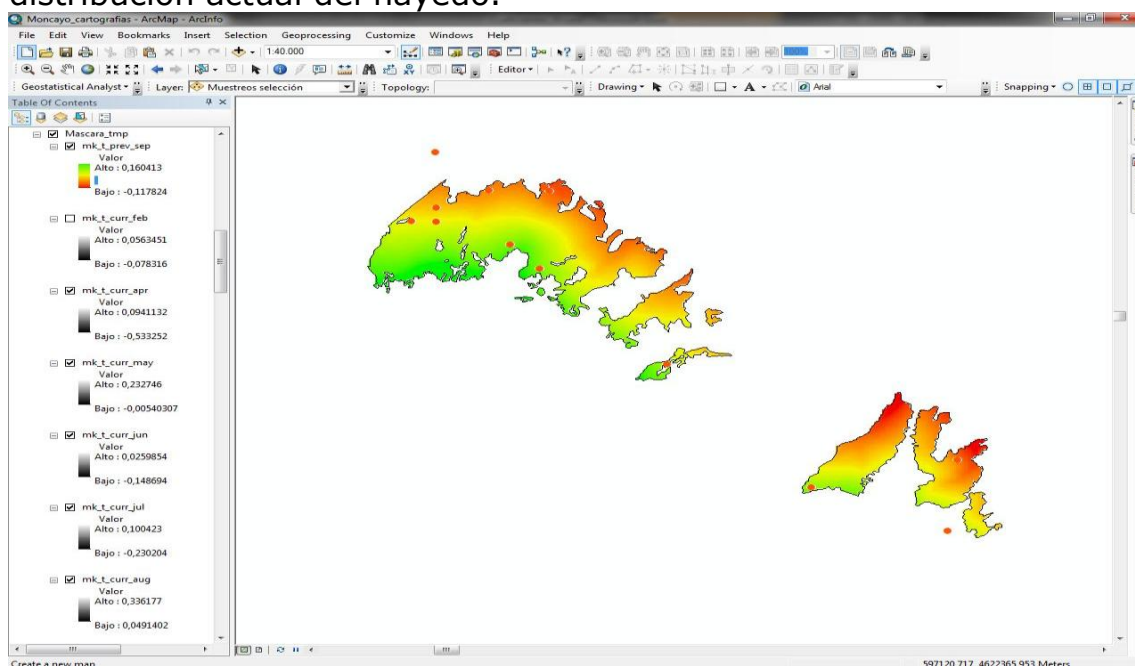


Figura 13. Interpolación con máscara

Una vez que se ha realizado esta operación para las 32 variables climáticas, el siguiente objetivo era efectuar una leyenda común para todas las cartografías, con el propósito de que fueran comparables entre sí. Las soluciones que ofrece ArcGIS para leyendas raster todavía no satisfacen las necesidades cartográficas más exigentes. Por tanto se ha tenido que optar por reclasificar todos los valores para poder hacer una leyenda común a todas las cartografías. Las leyendas con valores únicos no deberían tener más de 10 valores

ya que a partir de 11 el ojo humano tiene dificultades para diferenciar. Al reclasificar las leyendas con 10 valores, las transiciones entre valores se hacían muy acusadas y por tanto para un modelo ecológico irreal. Por tanto, se efectuó una leyenda intentando asemejarla lo máximo posible a una gradación, reclasificándola en 30 valores, con mínimo en -0,65 y máximo en 0,37 con intervalos de 0,04. A cada valor se le asocia un código en este caso números del 1 al 30. De esta forma cada vez que reclasifiquemos obtendremos los valores del 1 al 30. A la hora de la elección de los tonos de la leyenda, se ha escogido una leyenda de gradación de tonos cálidos a fríos, representando estos últimos los valores positivos y los cálidos los negativos (Figura14).

Valores de correlación

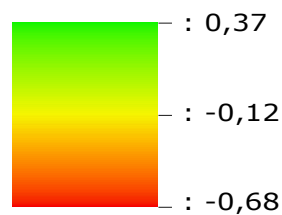


Figura 14. Leyenda de valores de correlación

La maquetación inicial de las cartografías se ha realizado mediante la opción *layout* que ofrece ArcMap. Las cartografías finales no sólo han sido concernientes a los modelos de correlación, si no que también se han realizado cartografías denominadas de localización. En un estudio biogeográfico es indispensable en todo momento conocer la localización exacta de la zona de estudio, ya que de este modo podemos llegar a entender cómo afectan diferentes factores de un modo global.

Los mapas finales han sido retocados y editados con un programa de edición profesional como es Adobe Illustrator v6. Las opciones de maquetación en ArcMap10 no permiten modificar demasiados parámetros dentro de los elementos necesarios para generar una cartografía de detalle. Si permite, sin embargo, insertar todos los elementos necesarios para que la cartografía final sea considerada un mapa y sea legible por cualquier lector. Estos elementos son el norte, la leyenda, la escala, el título, las fuentes, y el autor. En este caso además, las cartografías se han mejorado añadiendo mapas de localización, no sólo en dos dimensiones si no que también se han realizado mapas en tres dimensiones utilizando los programas ArcScene10, y ArcGlobe10.

4.6.2. *Mapas de correlaciones sobre modelo digital en tres dimensiones*

El trabajo realizado pretendía demostrar la influencia del gradiente altitudinal y consecuentemente térmico en el desarrollo de la especie arbórea *Fagus sylvatica*. En este sentido, al tratarse de una variable geográfica como la altitud se creía necesario mostrar, con las herramientas existentes, de una manera más precisa cómo influye la altitud. Para ello se ha trabajado con los programas ArcScene y ArcGlobe. En el primero se trabajan los modelos 3D sobre un espacio en blanco, mientras que en ArcGlobe el usuario trabaja los modelos 3D directamente sobre el globo terráqueo.

Al presentar los resultados con el efecto en tres dimensiones del relieve se aprecia de una manera más evidente la distribución del bosque de hayas. Al superponer los modelos de correlaciones se pueden ver las diferentes relaciones que tanto la precipitación como la temperatura tienen en los diferentes meses del año.

Del mismo modo, se pueden superponer las zonas de extracción de las cronologías, de tal forma que se pone en evidencia la estratificación en altura que se ha llevado a cabo en los diferentes muestreos.

5. Resultados

Dentro de este apartado se van a ir mostrando cada uno de los resultados logrados para cada objetivo concreto. Con el propósito final de integrar todos los resultados en un único SIG. Además, las cartografías finales no hubieran sido posibles si en cada uno de los objetivos anteriores no se hubieran conseguido resultados satisfactorios.

5.1. Contribuir en la creación de una red dendrocronológica de Fagus sylvatica en el Moncayo

El objetivo de aumentar la red dendrocronológica del hayedo en España se ha llevado a cabo satisfactoriamente. En este caso se ha aumentado para el Parque Natural del Moncayo, donde las hayas tienen gran importancia como indicadores de futuros cambios en las tendencias generales del clima.

Tras el laborioso trabajo de preparación, sincronización, medición y verificación de las mediciones, finalmente se consigue crear unas cronologías con las cuales ya se pueden realizar otro tipo de operaciones.

Un primer resultado obtenido con las muestras son las mediciones de cada una de las muestras en forma de gráfico. Para este trabajo, el autor ha realizado la medición de la zona de extracción con código

29, compuesta por 6 árboles, cada uno de los cuales tiene la muestra A y la B, por tanto 12 muestras. Esta zona de hayedo se encuentra junto al Sendero de Barranco Castilla. En la Figura 15 vemos un gráfico de las mediciones en bruto de las muestras.

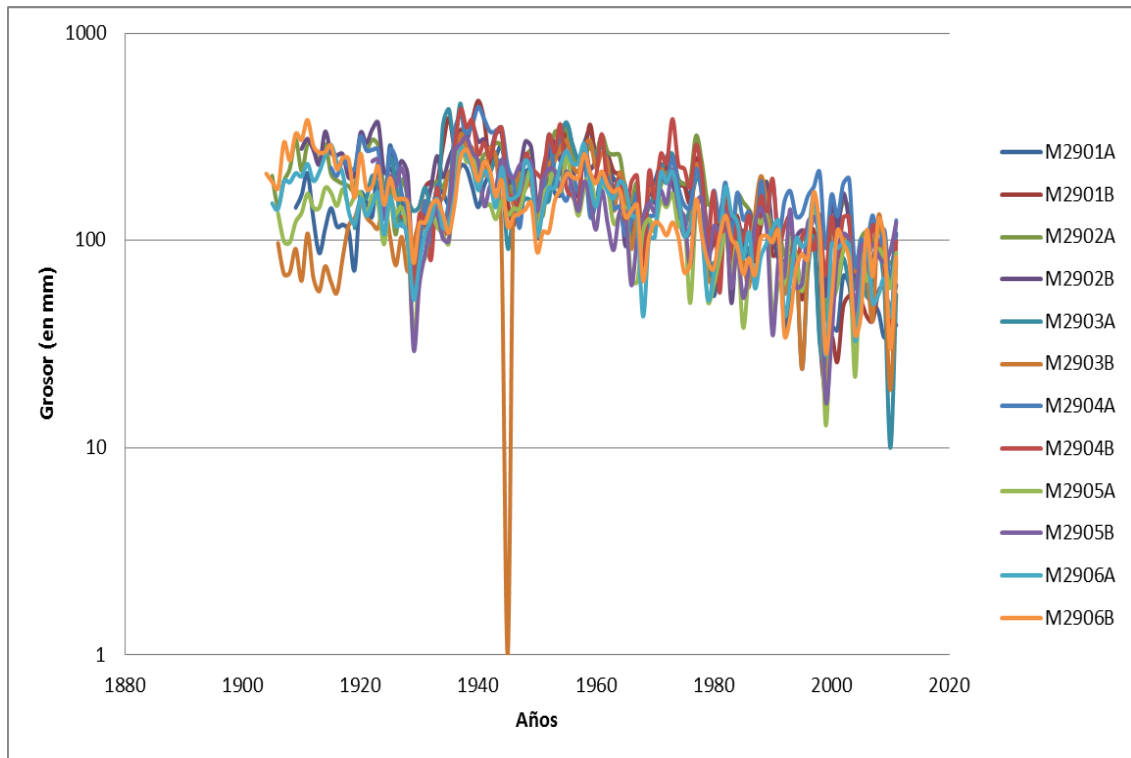


Figura 15. Gráfico del grosor de los anillos en escala logarítmica

Una vez realizado el trabajo de medición, se verifican con el programa COFECHaya mencionado en la metodología. El siguiente paso es la creación de las cronologías mediante los programas ARSTAN y el paquete estadístico para R denominado dplR. A continuación se muestra en la Figura 16 la cronología 29 de las mediciones de las muestras del mismo número. Los valores están normalizados con media 1000, por tanto los que superan esa media significa que crecen más de la media y los que están por debajo menos. En el gráfico vemos cómo los árboles crecen de manera más estable los primeros años de desarrollo mientras que una vez va desarrollándose las fluctuaciones son mucho mayores. Estas fluctuaciones se pueden deber a la propia dinámica de crecimiento de los árboles, pero el clima tiene mucha influencia ya que las heladas pueden retrasar el crecimiento, así como las precipitaciones en el momento adecuado acelerarlo.

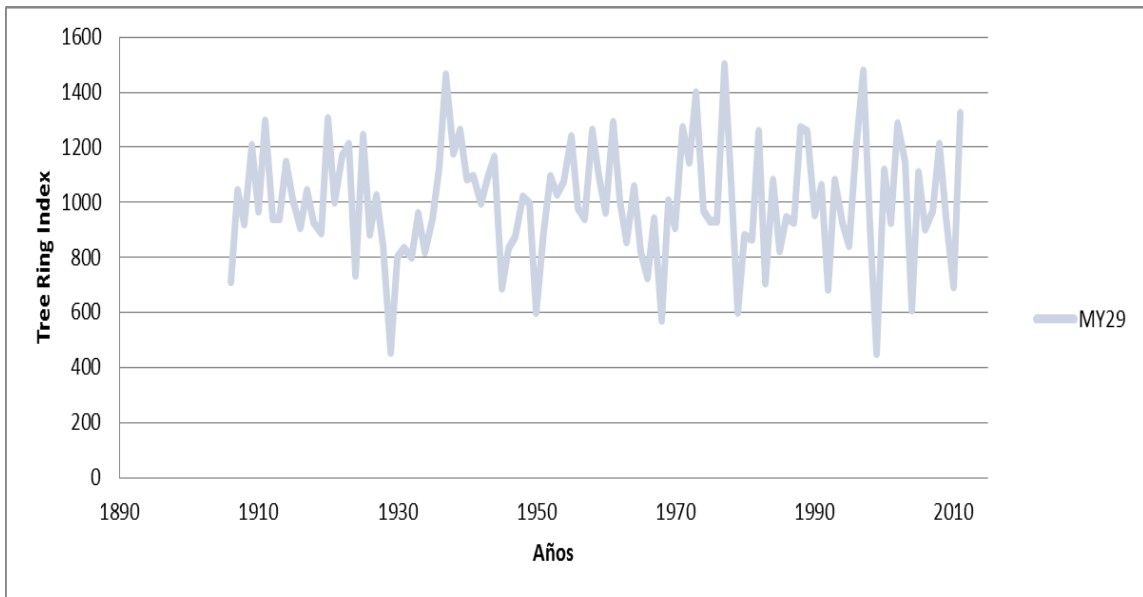


Figura 16. Cronología n°29

En la Figura17 se muestra un gráfico con las 15 cronologías. En general, las cronologías siguen los mismos patrones. Algo lógico tratándose de áreas de distribución muy cercanas entre sí, aunque tanto la altitud como la orientación en relación con la climatología pueden influir en el crecimiento de la especie objeto de estudio. De las 15 cronologías 5 superan los 170 años de antigüedad, lo cual nos está indicando la existencia de este bosque de hayas desde el siglo XIX y durante el s.XX, aún con la explotación de los recursos forestales que se llevó a cabo, el bosque de hayas permaneció intacto.

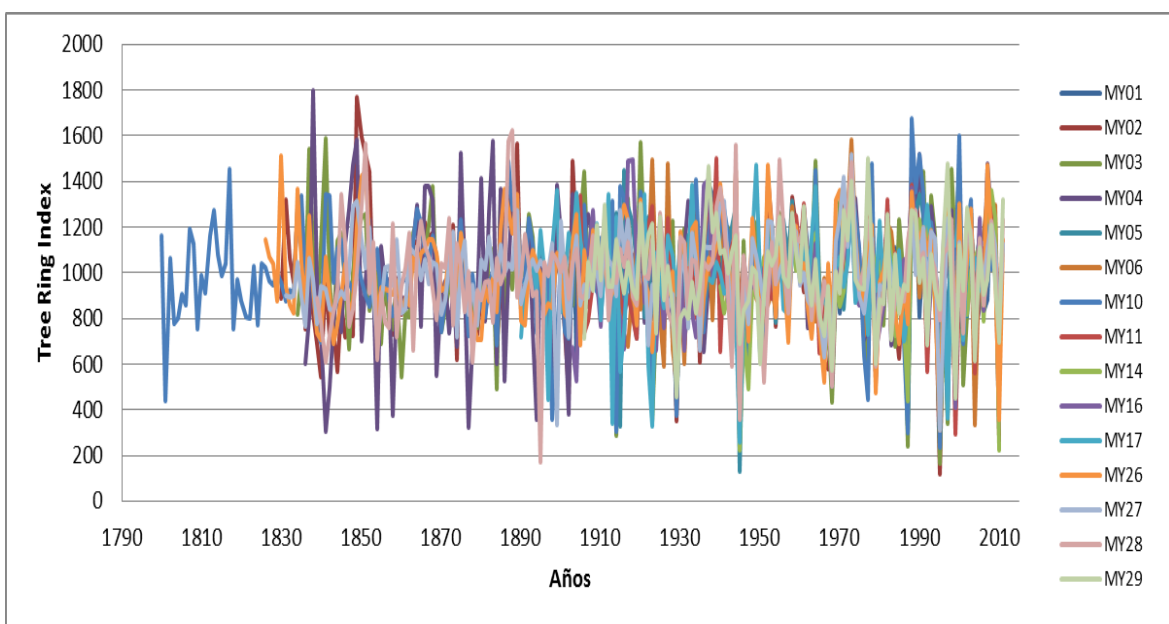


Figura 17. Cronologías de *Fagus sylvatica* del Moncayo

5.2. Obtención de datos climáticos a través del Grid del CRU.

La recopilación de series largas con dato mensual de temperatura y precipitación es siempre un proceso complejo y laborioso. En este sentido gracias a la labor del CRU y en cierta medida al script generado con R para poder leer y obtener los datos, la obtención de datos para cualquier punto del mundo desde 1901 con una resolución de $0,5^\circ$ es ahora mucho más sencilla. Los datos desde 1901 no son del todo fiables para todo el mundo, puesto que no todos los lugares contaban con estaciones para medir temperatura y precipitación de una manera empírica. Por este motivo, se ha seleccionado un periodo de tiempo de 1940 a 2006 donde los datos son mucho más fiables y contrastados y además es un periodo compatible para todas las cronologías.

En primer lugar se muestra un gráfico con las anomalías de temperatura y precipitación para el periodo comprendido entre 1940-2006. Los valores de la gráfica son anomalías respecto a la media anual, la de precipitaciones es 458,98 mm y la de temperatura es $11,43^\circ\text{C}$. En la Figura 18 se observa como la tendencia general de la temperatura sobre todo desde 1970 es positiva, aumentando de manera progresiva hasta 2006, poniendo de manifiesto un calentamiento progresivo sobre todo a partir de la segunda mitad del s.XX

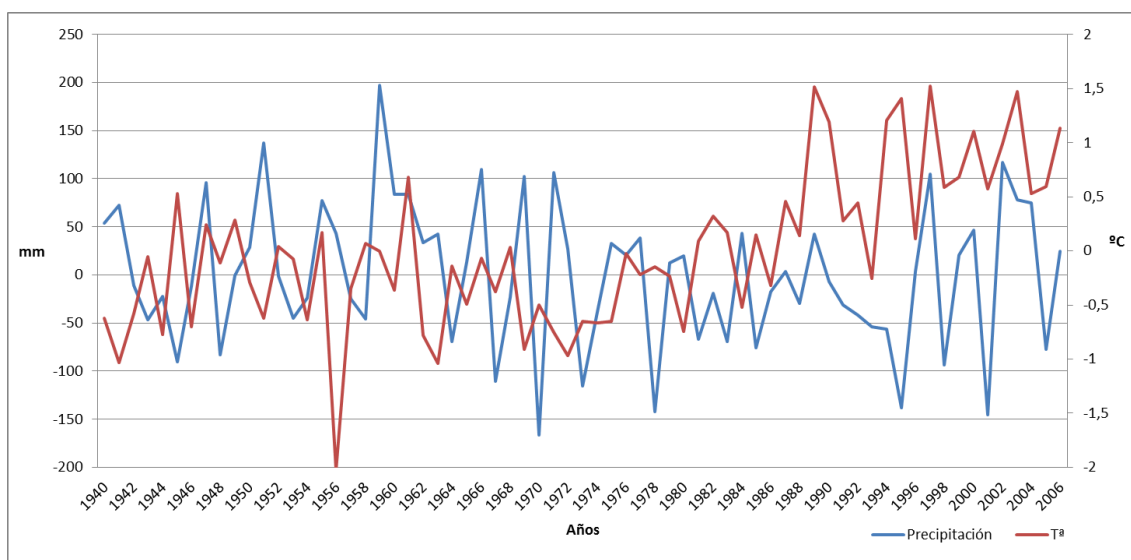


Figura 18. Gráfico de anomalías de Tª y precipitación

En cuanto a las precipitaciones, la tendencia no es tan evidente como en las temperaturas, pero si se observa que hay un ligero descenso de las precipitaciones. Tanto el aumento de las temperaturas como el descenso de las precipitaciones tienen consecuencia en el crecimiento y desarrollo de las hayas. Por este

motivo se ha puesto en relación clima con cronologías y se ha realizado el estudio dendroclimático. En el la Figura19 se muestra un serie climática del área de estudio, donde se aprecia que es una zona con un clima mediterráneo continentalizado húmedo, con años que puede superar los 500 mm de precipitación, debido a que se trata de una zona montañosa que recoge los vientos del norte cargados de humedad. Aunque también puede tener años de sequías acusadas con menos de 300 mm de precipitación al año. En cuanto a las temperaturas medias, se aprecia sobre todo un aumento desde finales de los años 70, destacando desde 1998 la media de t^a supera los 12°C , media que sólo se había superado durante 6 años durante el periodo 1940-2000.

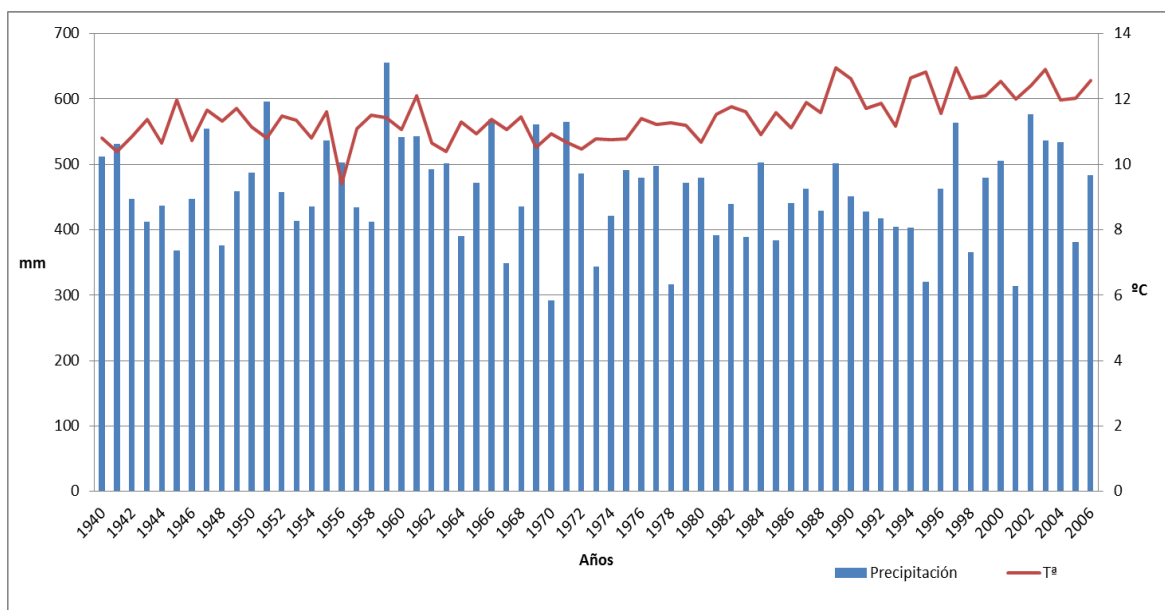


Figura 19. Serie temporal de temperatura y precipitación del área de estudio. Periodo 1940-2006

En la Figura20 se muestra mediante un gráfico la relación entre la cronología MY29 y la precipitación durante el periodo estudiado.

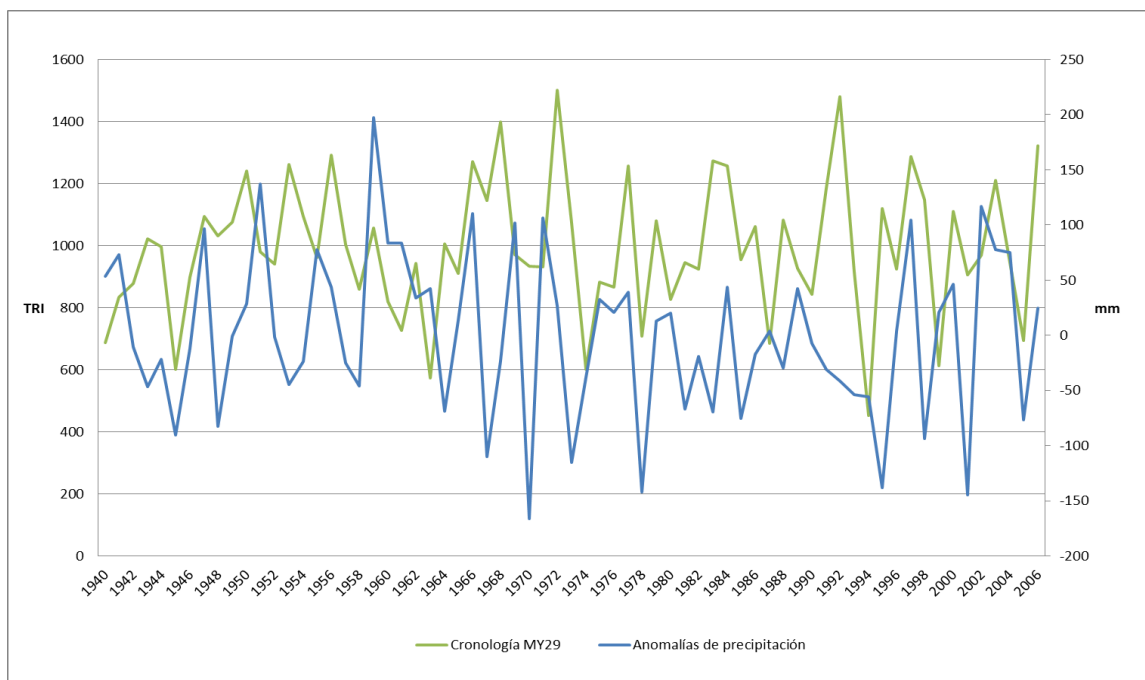


Figura 20. Relación entre cronología MY29 y precipitación total anual.

La relación entre la cronología MY29 y la temperatura se muestra en la Figura21.

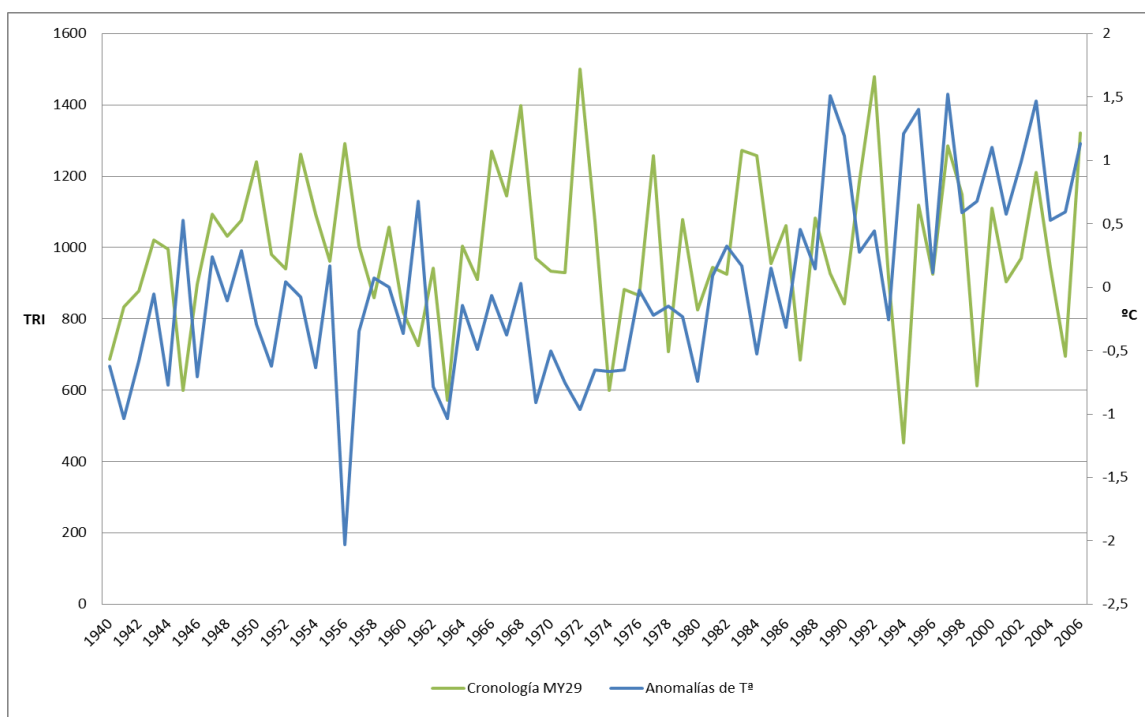


Figura 21. Relación entre cronología MY29 y temperatura media anual

A continuación se van a mostrar los gráficos de temperatura y precipitación con media de verano, otoño, invierno y primavera. En la Figura 22 se plasma en un gráfico la temperatura media de los tres meses que componen la estación de verano desde 1940 a 2006.

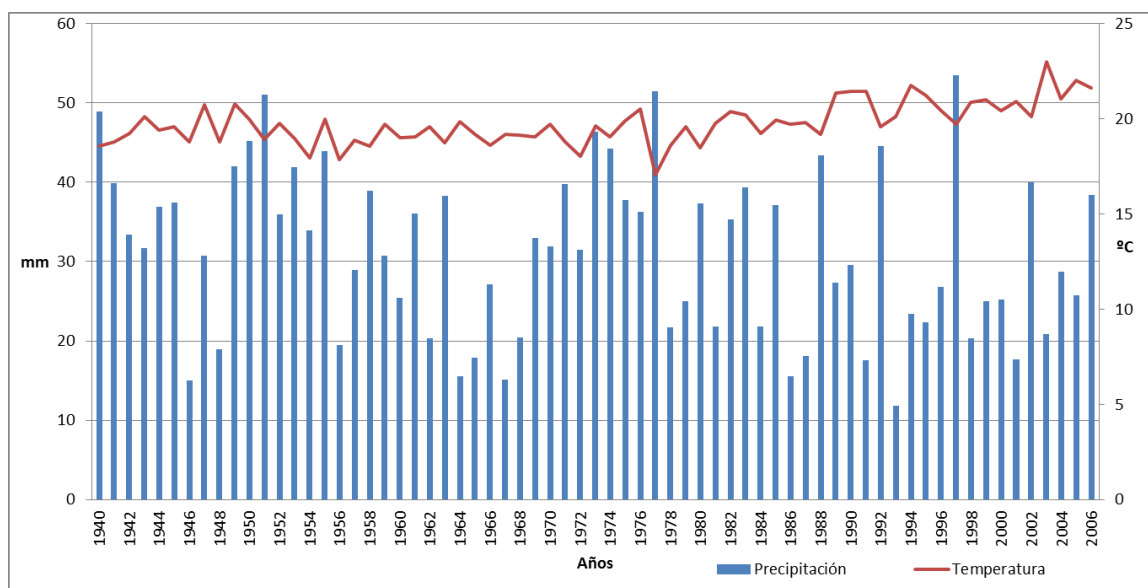


Figura 22. T^a y precipitación de verano, periodo 1940-2006

La temperatura media para este periodo es de 19,73°C mientras que las precipitaciones medias son de 31,17 mm. Por tanto estamos ante un régimen de clima típicamente mediterráneo donde los periodos de estiaje pueden ser prolongados e incluso llegar a la provocar sequías, como durante el verano de 1993 donde las precipitaciones en los tres meses no superaron los 12 mm. También hay periodos o ciclos donde las precipitaciones son más abundantes durante la estación veraniega, como consecuencia probablemente de las tormentas que se producen generalmente en el mes de agosto, provocadas por las altas temperaturas en superficie que generan nubes de evolución y provocan precipitaciones intensas en un breve espacio de tiempo. La temperatura durante estos meses es bastante regular aunque a partir de la década de los 80 parece que sufre una tendencia positiva de aumento de la media de verano entre 1 y 2°C.

Para analizar el clima de la zona de estudio de una manera más profunda, se han realizado gráficos de anomalías tanto térmicas como de precipitaciones para cada una de las cuatro estaciones del año. En el gráfico 23 vemos la anomalía de temperatura respecto a la media de verano, 19,73°C.

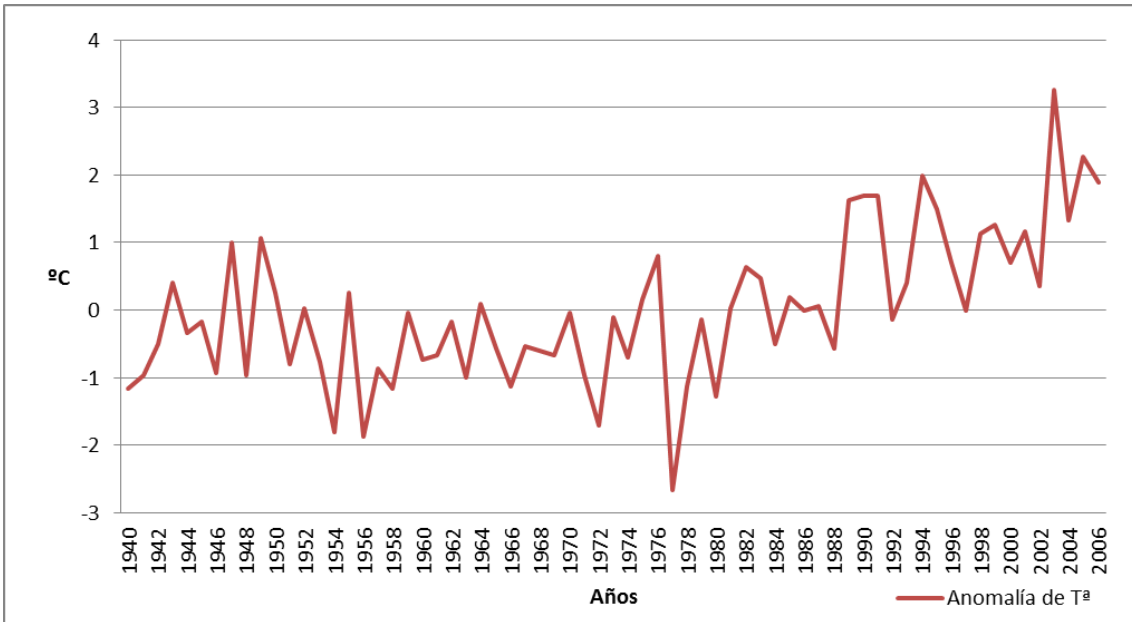


Figura 23. Anomalías de Tª en verano

Como se apuntaba en la Figura 22, estudiando las anomalías vemos más claramente el aumento paulatino de la diferencia de temperatura con la media. Es llamativo la anomalía de más de 3°C con respecto a la media del año 2003, año de intensas sequías y olas de calor en toda Europa, que también tuvo su influencia en el crecimiento de las hayas, sobre todo para el año siguiente.

Las anomalías de precipitación con respecto a la media, 31,17 mm (Figura 24) no muestran una tendencia más clara, aunque si se pueden observar ciclos de unos cinco años donde las precipitaciones son más homogéneas.

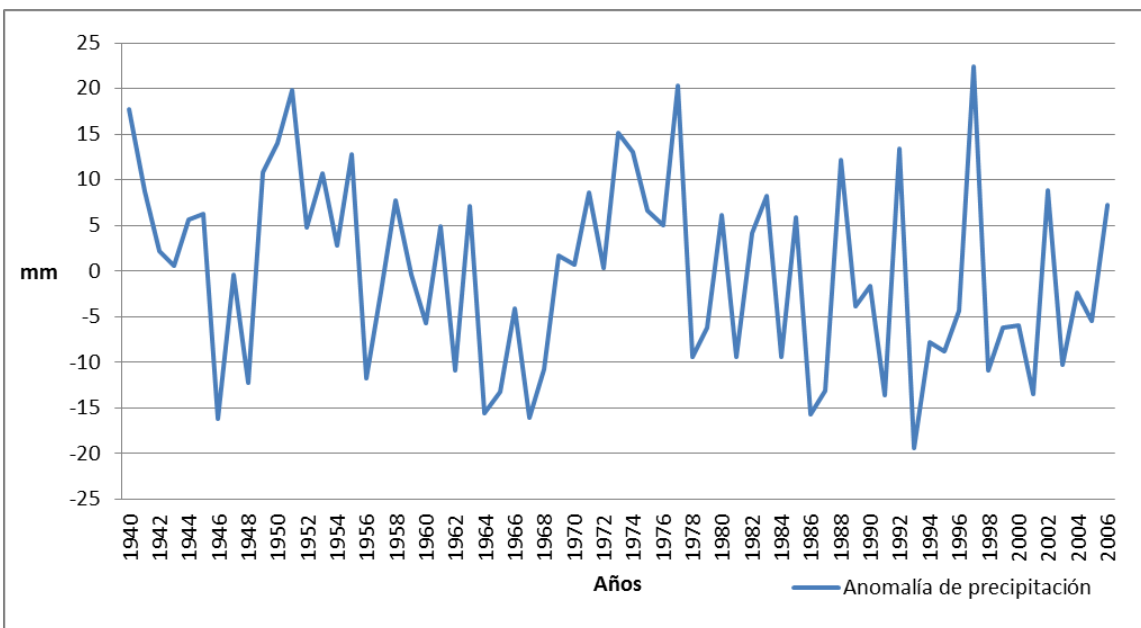


Figura 24. Anomalías de precipitación de verano

La siguiente estación es otoño, comprendiendo los meses de septiembre, octubre y noviembre. En la Figura 25 vemos una serie temporal del clima de otoño para el periodo 1940-2006.

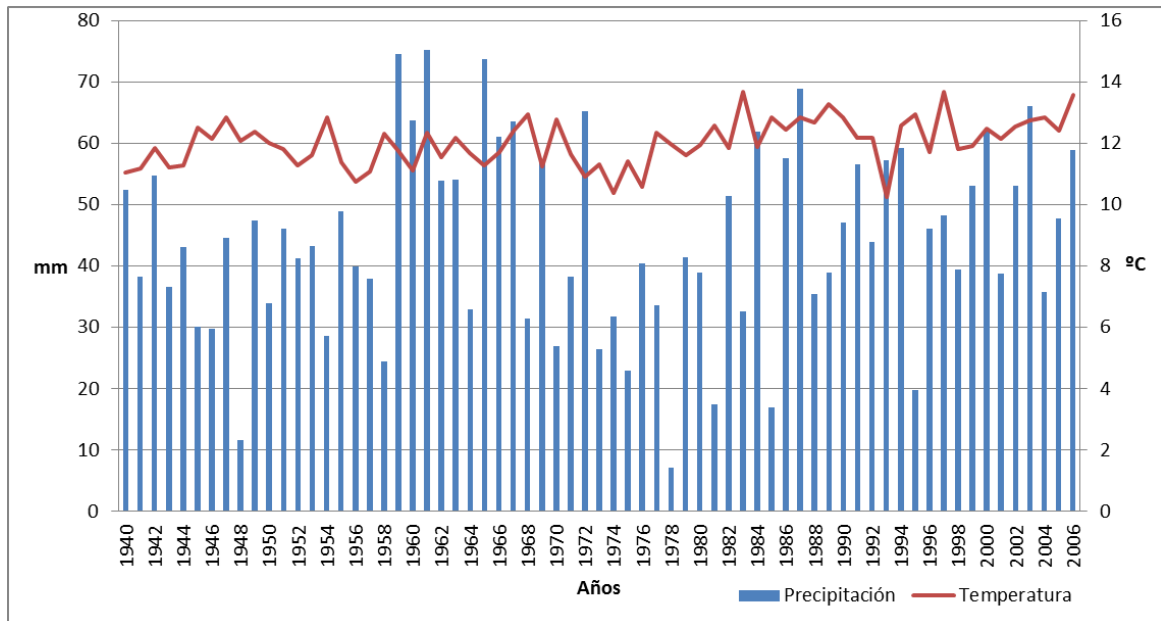


Figura 25. Tª y precipitación de otoño, periodo 1940-2006

La temperatura media es de 12,01°C y la precipitación media de 44,18 mm. Las precipitaciones son más altas que en el periodo estival, pero también ha habido años mucho más secos durante los meses de otoño que los de verano. En general mayor variabilidad tanto en precipitaciones como en temperaturas.

Las anomalías de temperatura respecto a la media (Figura 26), 12,01°C, muestran gran variabilidad de entorno a un grado entre 1940 a 1970. En cambio, a partir de 1980 la variabilidad aumenta a más de un grado y medio por encima y por debajo de la media.

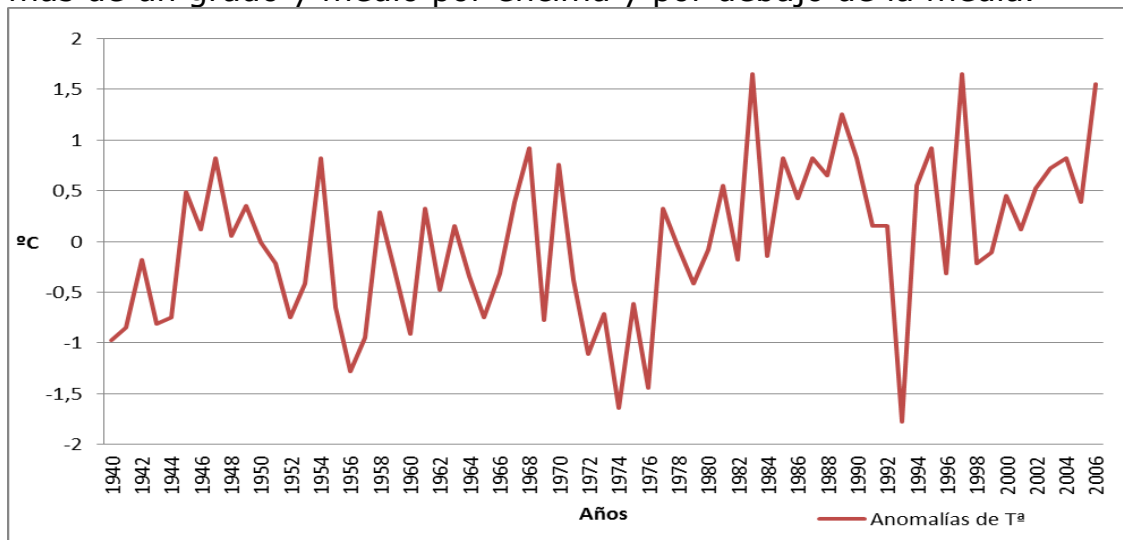


Figura 26. Anomalías de temperatura de otoño

Las anomalías de precipitación respecto a la media (Figura27), 44,18 mm, varían entre años con +30 mm y años con -40, por tanto, gran variabilidad la presentada para la estación de otoño. Puede presentar otoños bastante húmedos con cerca de 90 mm y sin embargo puede haber otoños en los que las precipitaciones sean prácticamente nulas como en el año 1978, donde en tres meses se acumularon únicamente 7 mm.

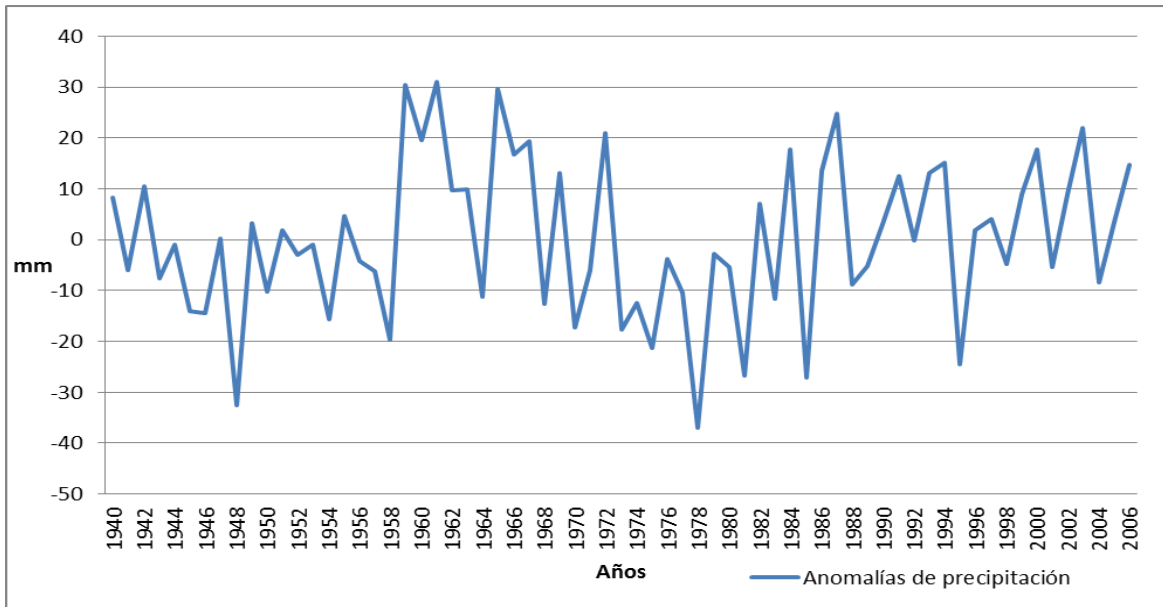


Figura 27. Anomalías de precipitación de otoño

En la Figura28 se muestra la serie de temperatura y precipitación de invierno para el periodo estudiado. La temperatura media es de 4,09°C mientras que la precipitación es de 38,12mm.

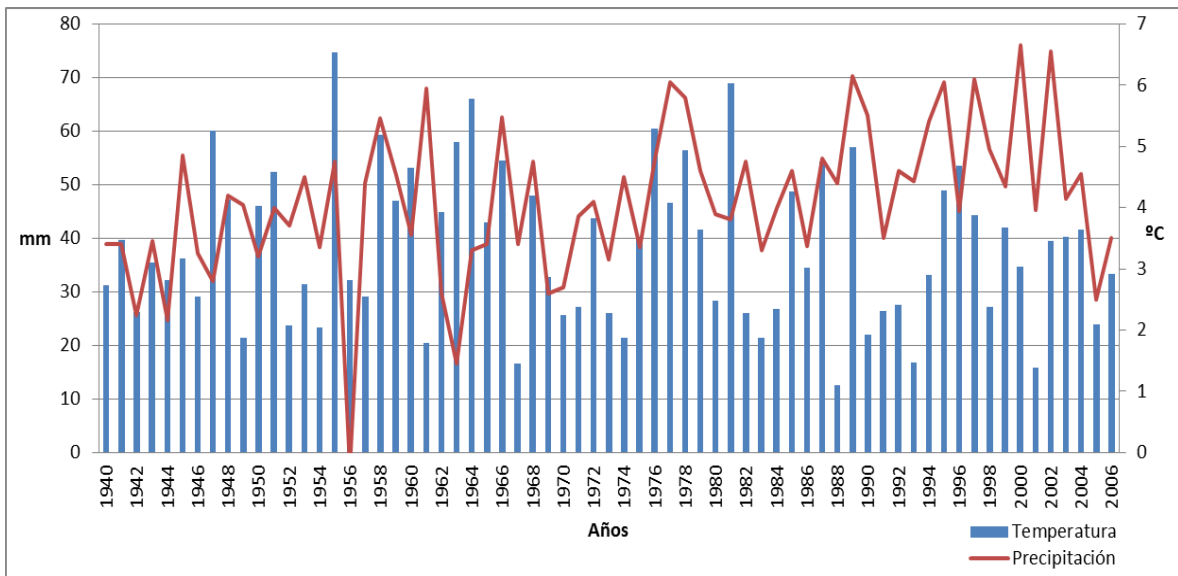


Figura 28. Tª y precipitación de invierno

Las temperaturas son bastante bajas ya que al efecto de la continentalidad se le suma el hecho de tratarse de una zona montañosa. Las precipitaciones son bajas, características de los inviernos fríos y con poca humedad de las zonas continentales. En la Figura 29 vemos las anomalías de temperatura respecto a la media de invierno. A diferencia de verano y otoño, y aunque hay una ligera tendencia positiva, las temperaturas parecen mucho más estables años puntuales especialmente fríos y otros cálidos. El año más frío de la segunda mitad del s.XX del que se tienen datos para toda Europa es 1956, lo cual queda reflejado tanto en la Figura 28 como 29. Desde el 2 de Febrero de 1956 y durante 20 días, una ola siberiana mantuvo a España y a muchos países europeos bajo cero llegando a denominarse en España 'La ola de frío que mató a los olivos' (Ricart, 2009). Fenómeno con el que se demuestra la importancia del conocimiento del clima y de los umbrales de las especies de vegetación. En concreto, en la zona de estudio, la media fue $-0,25^{\circ}\text{C}$ durante los tres meses de invierno, alrededor de $4,5^{\circ}\text{C}$ menos de la media.

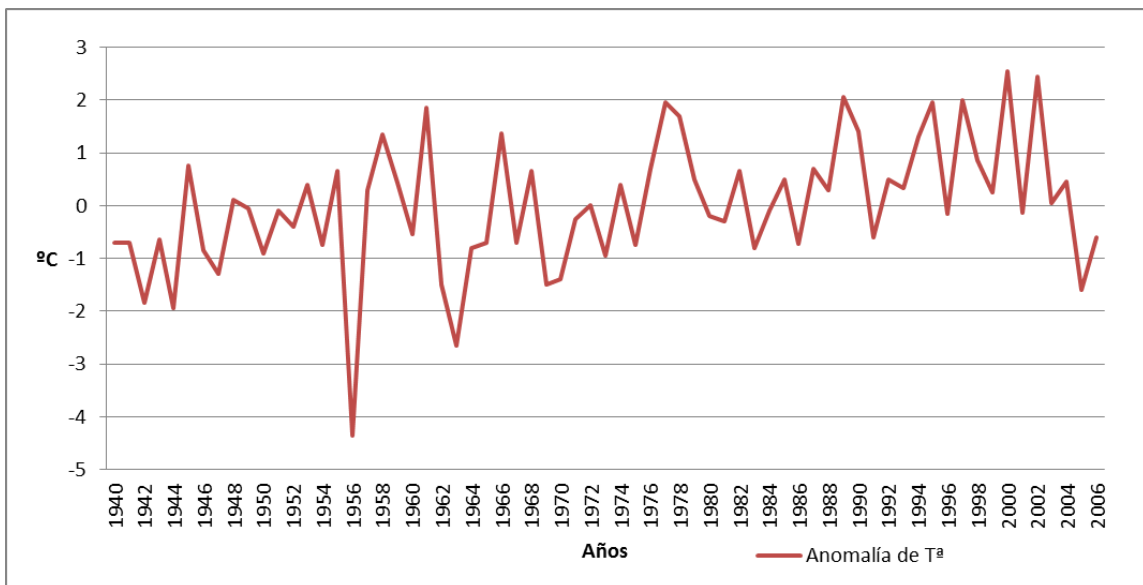


Figura 29. Anomalías de Tª con respecto a la media en invierno

En la Figura 30 se muestran las anomalías de precipitaciones respecto de la media de invierno, 38,11 mm. Se aprecia gran variabilidad y posibles ciclos donde las precipitaciones son más homogéneas tanto en abundantes como en escasas.

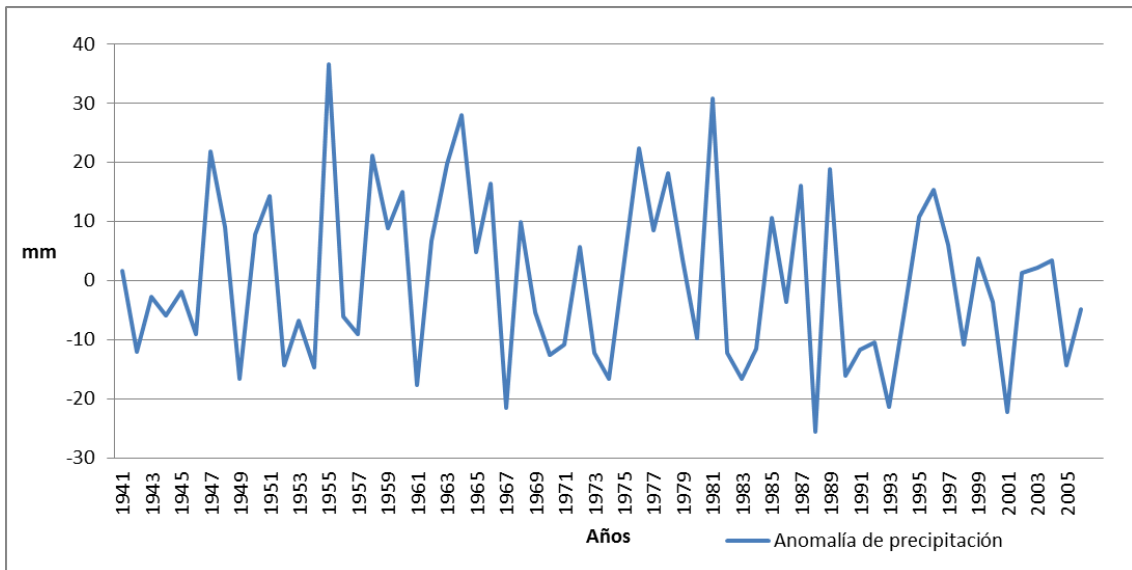


Figura 30. Anomalías de precipitación respecto a la media de invierno

Por último, se analiza la estación de primavera. Se muestra en la Figura31 el climograma de los meses de verano para el periodo en cuestión. La temperatura media es de 9,88°C y la precipitación media de 50,60 mm. Son valores propios de climas mediterráneos. En este sentido, las precipitaciones máximas siempre se producen durante los meses de primavera, favoreciendo el crecimiento el momento de floración de las especies vegetales. Por tanto, es un periodo clave en el desarrollo de las hayas como se verá en los posteriores apartados de resultados.

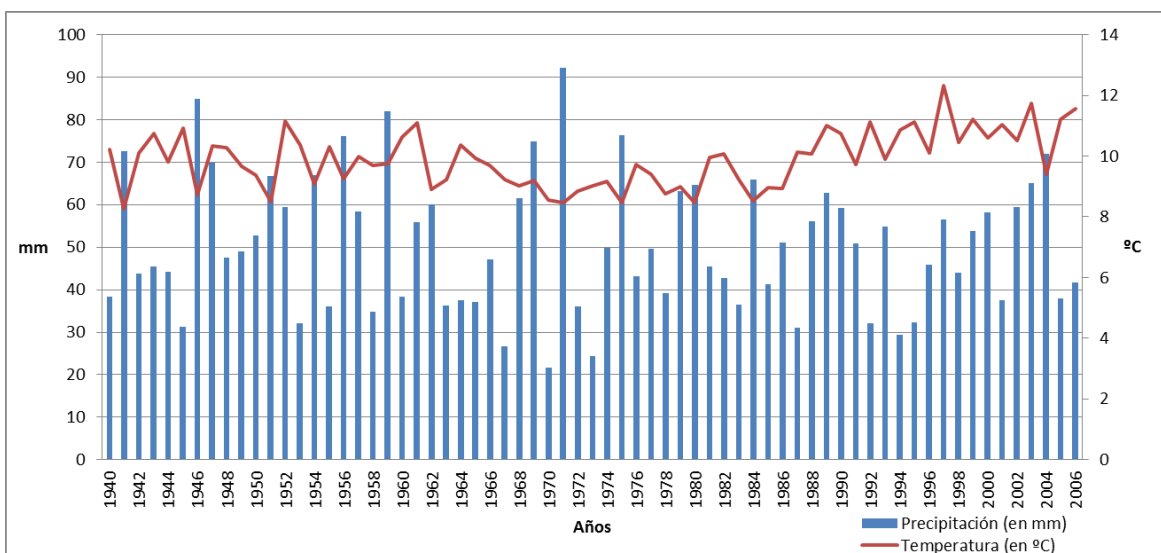


Figura 31. Temperatura y precipitación en primavera

Las anomalías de temperatura con respecto a la media (Figura32) muestran una gran diferencia entre 1940 y 1970 donde siguen ciclos pero se mantienen estables, y 1975 a 2006, donde la

tendencia es muy positiva en un claro aumento de las temperaturas medias para este periodo.

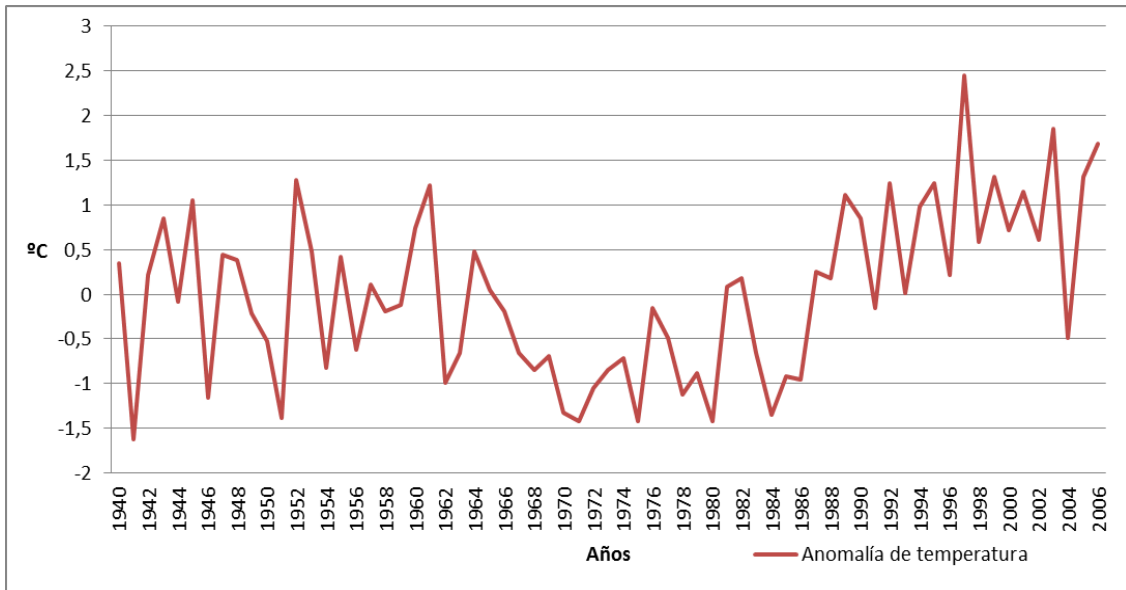


Figura 32. Anomalías de Tª con respecto a la media de primavera

Las anomalías de precipitación (Figura33) muestran mayores variaciones hasta mediados de la década de los 70, a partir de entonces para no haber grandes fluctuaciones y mantenerse bastante estable.

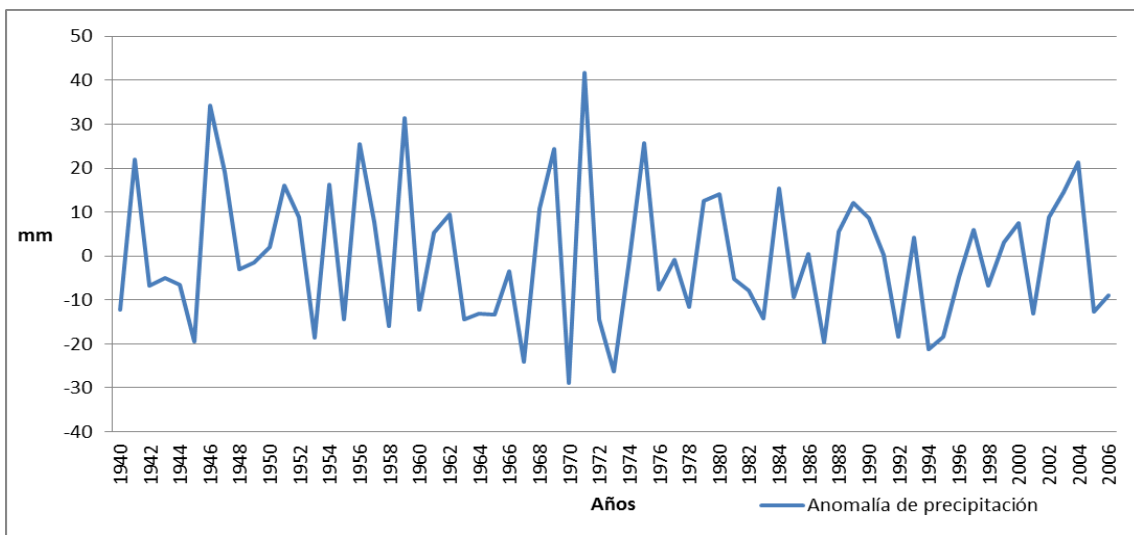


Figura 33. Anomalías de precipitación con respecto a la media de primavera

5.3. Análisis dendroclimático

Al realizar el análisis dendroclimático se estaban buscando y analizando las relaciones entre clima y crecimiento de las hayas. Como ya se ha explicado esta relación puede venir dada en forma de coeficientes de correlación o de función respuesta.

En la metodología se ha explicado el proceso llevado a cabo mediante el programa de estadística R, para generar los gráficos que relacionan el clima con las cronologías y destacan los meses donde la temperatura y la precipitación tienen más significación para el crecimiento positivo o negativo de las hayas.

A continuación se presentan los gráficos de función respuesta y coeficientes de correlación para la cronología MY29 (Figura34). Pero se han realizado para las 15 cronologías ya que es necesario para continuar con el proceso de análisis y generar los modelos.

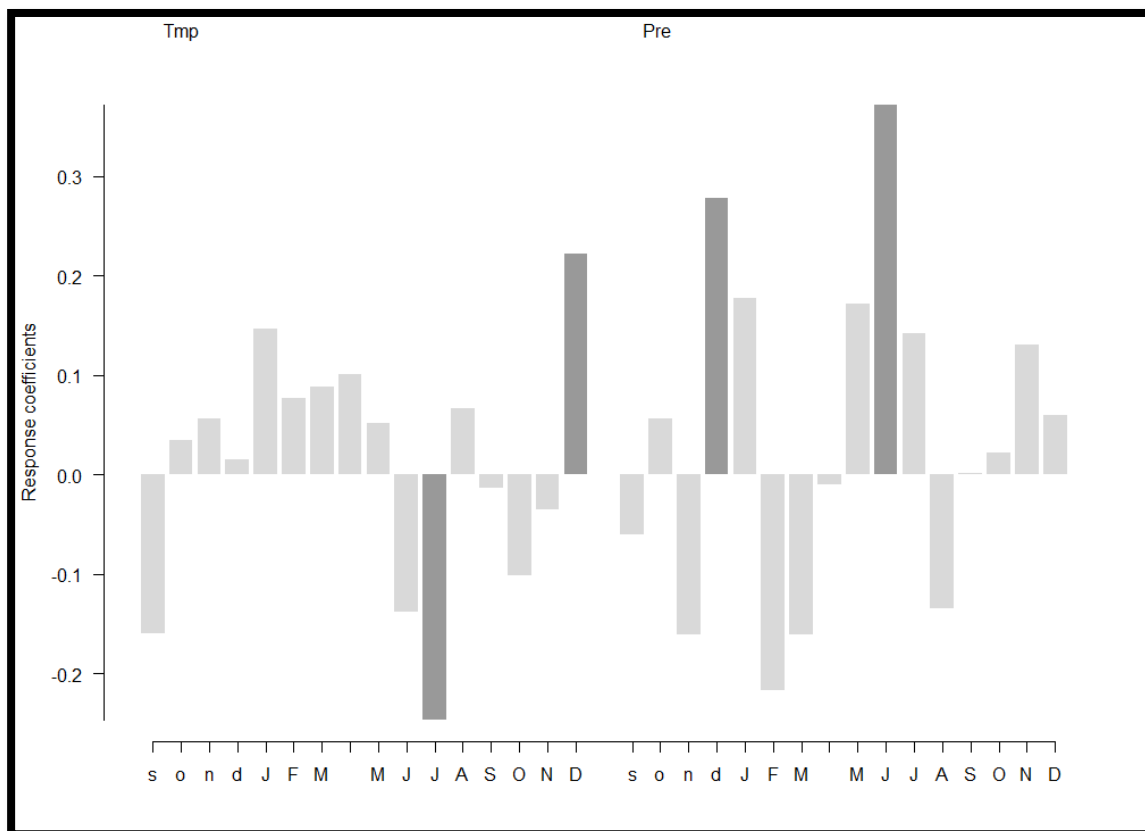


Figura 34. Gráfico de coeficientes de correlación MY29

En la Figura 34, se aprecia cómo la temperatura de julio tiene una correlación negativa. Las correlaciones negativas significan que a mayor temperatura media en junio el crecimiento va a ser menor y al contrario, menor temperatura media propiciará un crecimiento mayor del anillo. Al mismo tiempo, vemos como por ejemplo la precipitación de diciembre del año previo, tiene una correlación positiva. Es decir, a mayor precipitación en este mes mayor crecimiento se producirá y al contrario.

Al mismo tiempo, se ha generado el gráfico de función respuesta, explicado en la metodología, con el resultado mostrado en la Figura35. Indicando influencia significativa positiva del mes de junio en el crecimiento del haya.

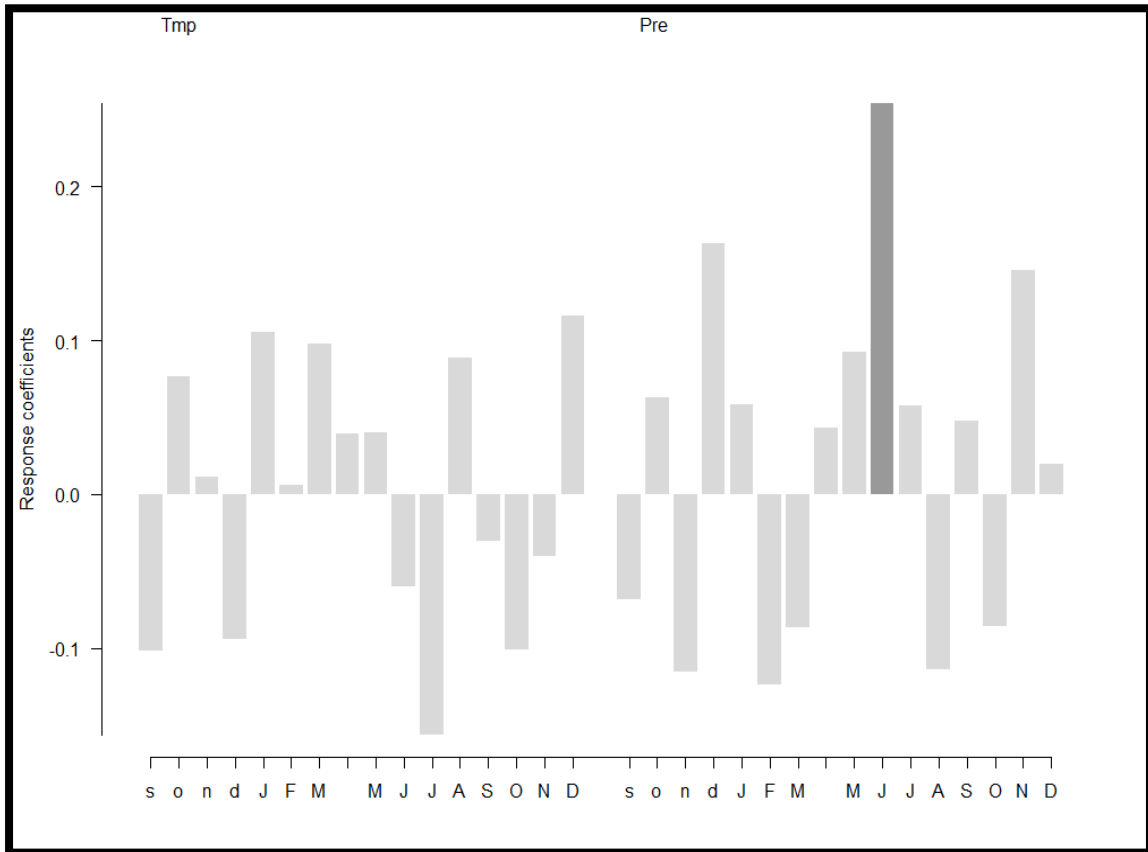


Figura 35. Gráfico de función respuesta de MY29.

Así como estos gráficos indican significación, los gráficos con ventanas móviles, donde se realiza esta operación para un periodo móvil de 43 años, expresan la estabilidad o inestabilidad de la cronología. En la Figura36 se muestra el de MY29.

Se aprecia de manera destacada la importancia que desde 1940 hasta 2006 ha tenido la precipitación de junio. Al mismo tiempo, se observa como hay variables que durante el periodo estudiado no muestran tener ningún tipo de significación, lo cual también es de gran valor ecológico, ya que está permitiendo conocer mejor el comportamiento de una especie ante posibles cambios del clima.

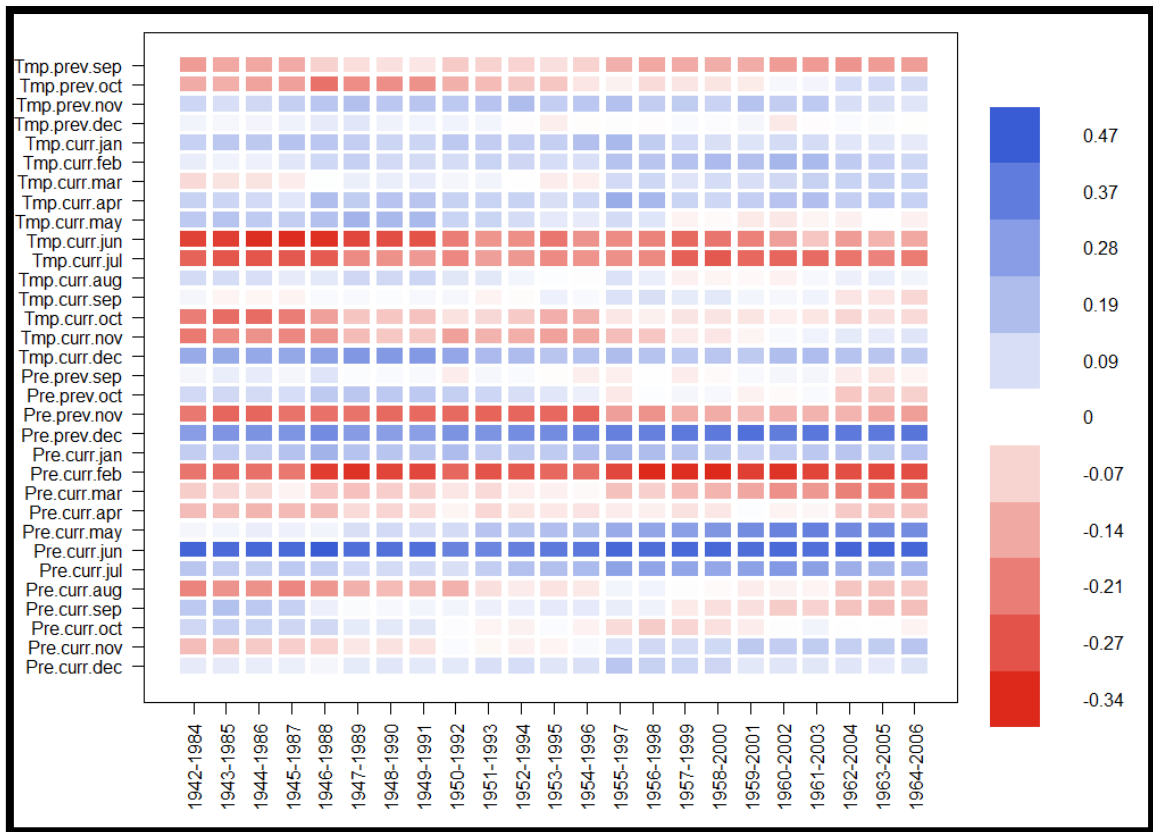


Figura 36. Gráfico de correlaciones con ventana móvil, de MY29

En el apartado de anexos se presentarán todos los resultados de las funciones respuesta y de las correlaciones, pero se quiere mostrar una de las cronologías que podía resumir las tendencias y significaciones generales del conjunto. En este sentido, se muestra la Figura 37, gráfico de correlaciones que pertenece a la cronología MY1. En el gráfico se aprecia cómo tienen una influencia significativa tanto las precipitaciones tanto de junio del año de crecimiento como de diciembre del año previo de crecimiento. Esto significa que si hay menos precipitaciones el diciembre previo afectará de manera negativa al crecimiento de los anillos, que será menor. En cambio si la precipitación aumenta, beneficiará al mayor crecimiento de los anillos.

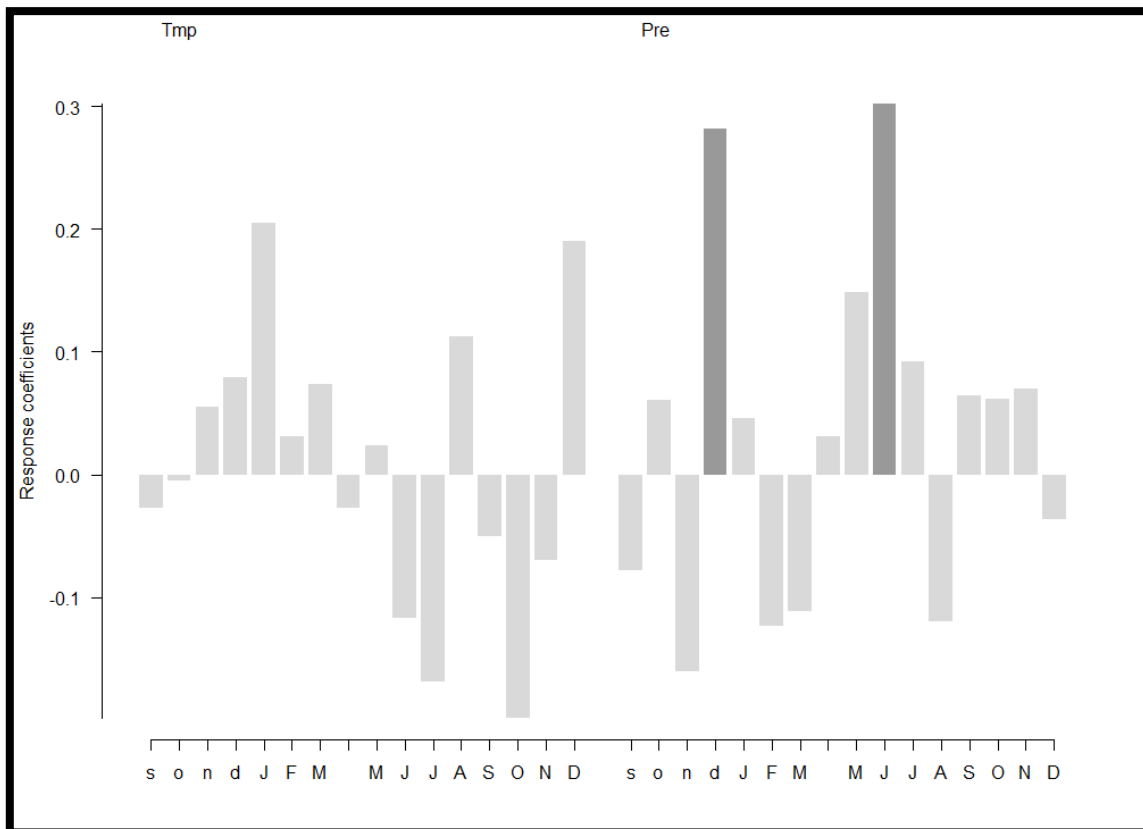


Figura 37. Gráfico de coeficientes de correlación, MY1

A continuación se muestra un resumen de los coeficientes que han resultado ser significativos en el análisis dendroclimático (Figura 38).

Cod_Dendro	Tmp,curr,apr	Tmp,curr,oct	Pre,prev,dec	Pre,curr,jun
MY01_FASY	-0.0273270209823403	-0.199564643164575	0.284659115189237	0.295714703092331
MY02_FASY	-0.233152486960431	-0.300399998058484	0.203816961674089	0.250001809745987
MY03_FASY	-0.359289722774582	-0.409771936675296	0.11303635422935	0.133744234888975
MY04_FASY	-0.211294902403539	-0.406574397694556	0.247310141028471	0.263159033429951
MY05_FASY	-0.329968937328662	-0.371673640964395	0.129664355838578	0.131986510963668
MY06_FASY	0.0769143384632216	-0.244182794246346	0.215290279037202	0.335820935098468
MY10_FASY	-0.271484870089568	-0.338343014123341	0.0750622555881349	0.159146306204283
MY11_FASY	0.0890023178814332	-0.19472337947421	0.392270088010223	0.268210916747863
MY14_FASY	-0.228353388784958	-0.37040187883348	0.319099846339559	0.366039209862877
MY16_FASY	-0.0621599510056661	-0.166422760864833	0.37479050321638	0.234899862251524
MY17_FASY	-0.18050651483431	-0.345545940705	0.00808455751628901	0.116636083610285
MY26_FASY	-0.159485531188343	-0.312162457610419	0.237027716084902	0.277019087016684
MY27_FASY	-0.166840477153116	-0.303870682667786	0.16460856743613	0.364441442495564
MY28_FASY	-0.0572979776541504	-0.294906584928857	0.246945036551916	0.287461743807156
MY29_FASY	0.125621912107698	-0.101674642735368	0.280849131145397	0.37148058870397
Significativos				

Figura 38. Resumen de coeficientes de correlación significativos

Sobre las 15 cronologías estudiadas se han estudiado 32 variables de las cuales 4 se han mostrado como las realmente importantes, las que tienen significación y más influyen en el crecimiento y desarrollo del haya. Estas son la temperatura de abril y octubre del año actual de crecimiento, la precipitación de diciembre del año anterior al crecimiento del nuevo anillo y la precipitación de junio del año de crecimiento. La temperatura de octubre del año actual es una variable a estudiar y contrastar con otras fuentes de datos climáticos, ya que en octubre el árbol, en teoría, ha dejado de crecer y por tanto el anillo también.

5.4. Creación de un SIG para el hayedo del Parque Natural del Moncayo.

La creación de un SIG se enmarca en el objetivo de integrar dendrocronología, en este caso dendroclimatología, en un sistema de información geográfica. Tras la obtención de los modelos mediante SPSS se ha realizado la integración de los coeficientes de correlación en el SIG. Como se observa en la Figura39 los índices de correlación están implementados en la capa de cronologías como atributos. Por tanto, se tiene la posibilidad de seleccionar cualquier cronología y ver su información tanto de altitud, orientaciones o pendiente como todas las variables y sus valores de correlación.

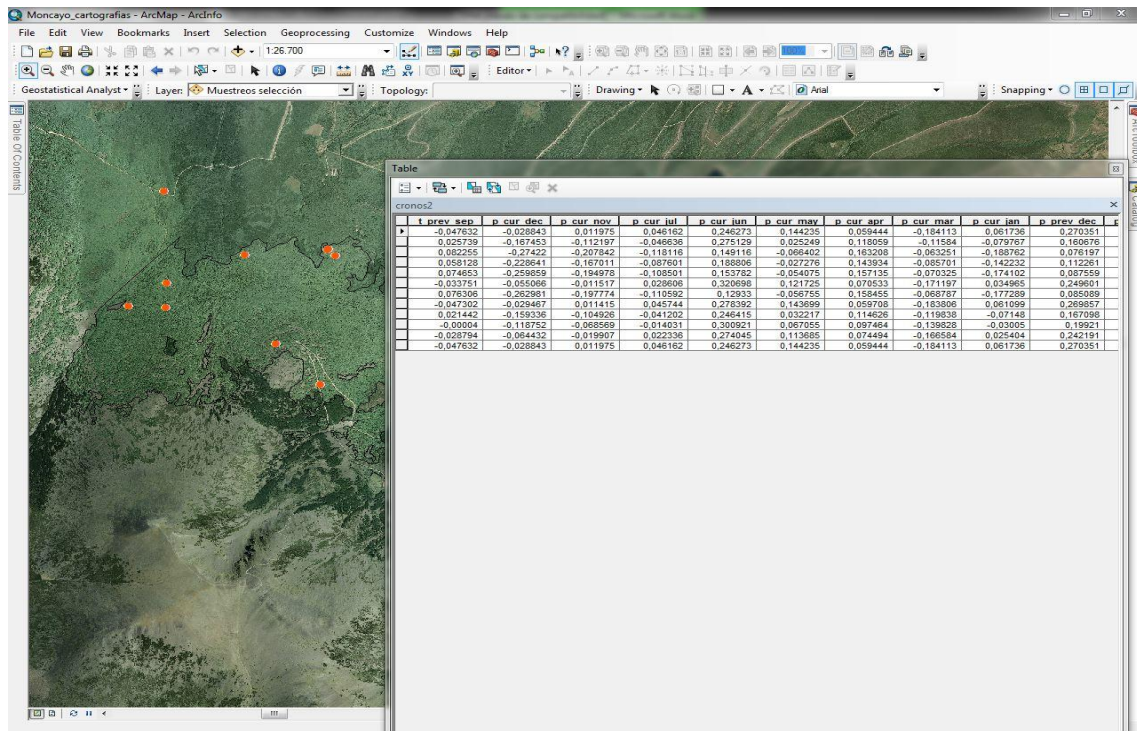


Figura 39. Coeficientes de correlación en el SIG

La delimitación del límite de distribución del hayedo en el Parque Natural del Moncayo ha supuesto un primer paso para posteriormente trabajar con esos límites como máscara. Al mismo tiempo también se ha obtenido información acerca de la superficie cubierta por las hayas en cuanto a hectáreas y perímetro. La superficie en hectáreas que cubre el hayedo dentro del Parque es de 608 hectáreas, representando un 5,52% del total de las 11.000 hectáreas de Parque Natural del Moncayo. El perímetro que cubre la distribución del hayedo es de 57 km, en la Figura40 se marcan los límites en rojo.

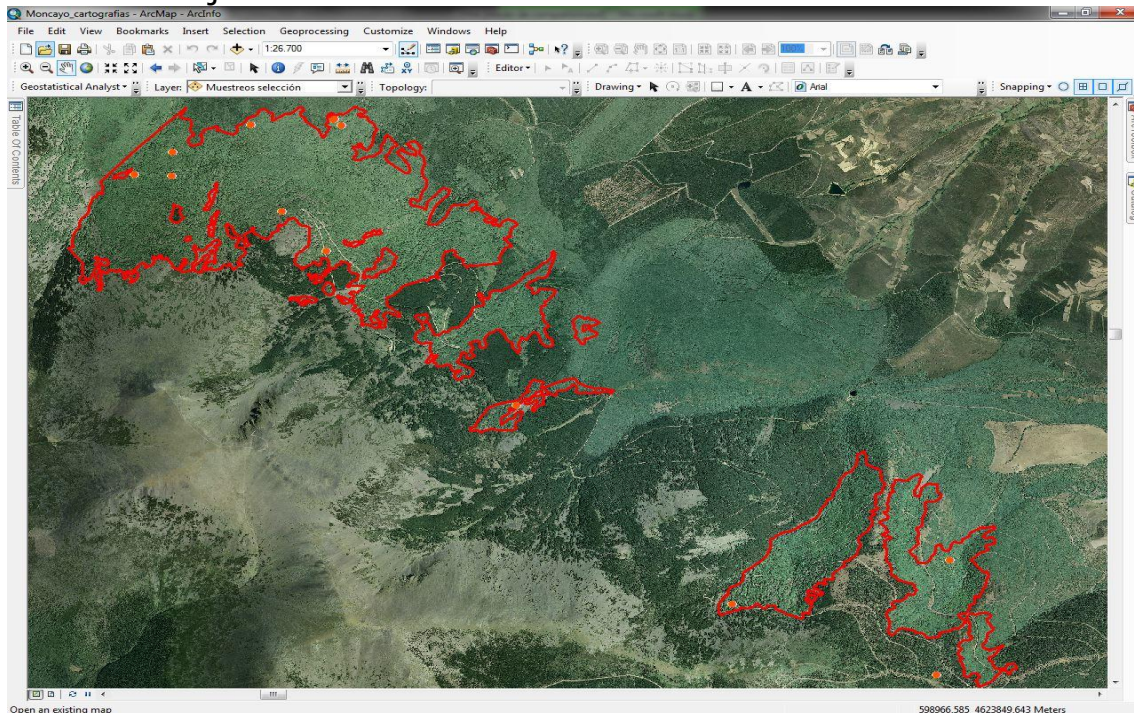


Figura 40. Límites hayedo

Un pilar fundamental en la creación de este SIG es el modelo digital de elevaciones, a partir del cual se han generado variables como la pendiente, orientación, radiación solar y sombreado. En la Figura41 observamos el modelo digital de elevaciones. Para resaltar el modelo digital de elevaciones se ha generado el modelo de sombreado el cual resalta las laderas de tal forma que da sensación de relieve (Figura42). Encima de este modelo se ha colocado el modelo digital de elevaciones pero otorgándole un 40% de transparencia de tal modo que da la sensación de relieve. Esto se ha utilizado como base para la realización de las cartografías finales.

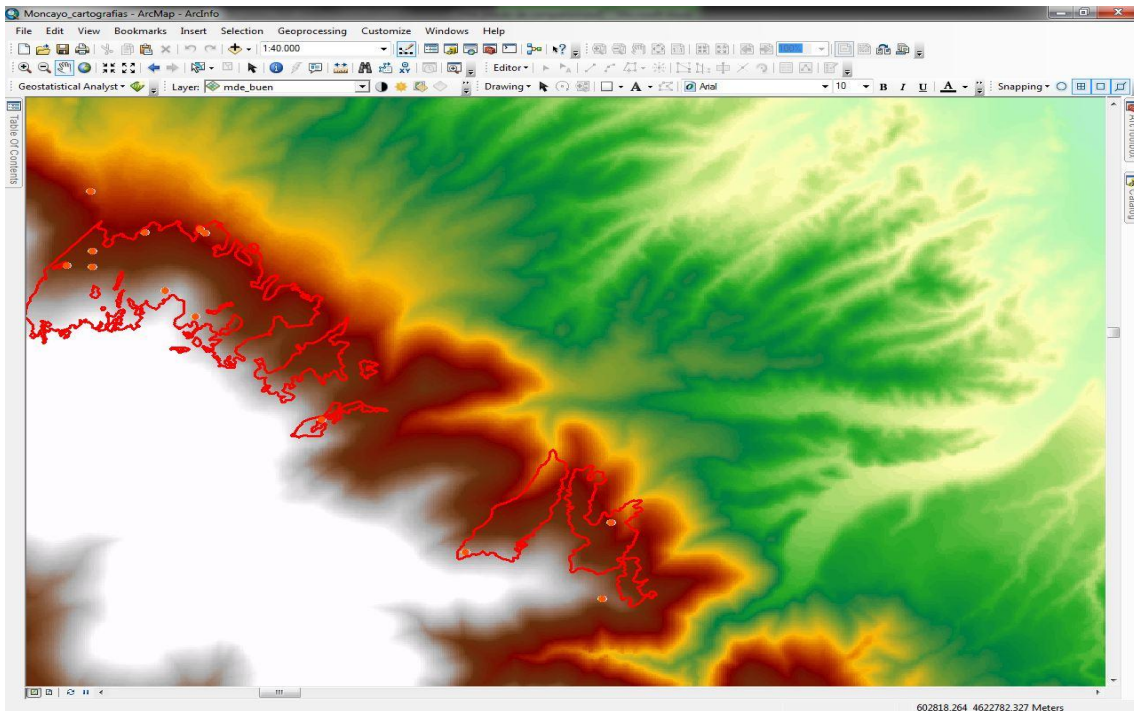


Figura 41. Modelo digital de elevaciones

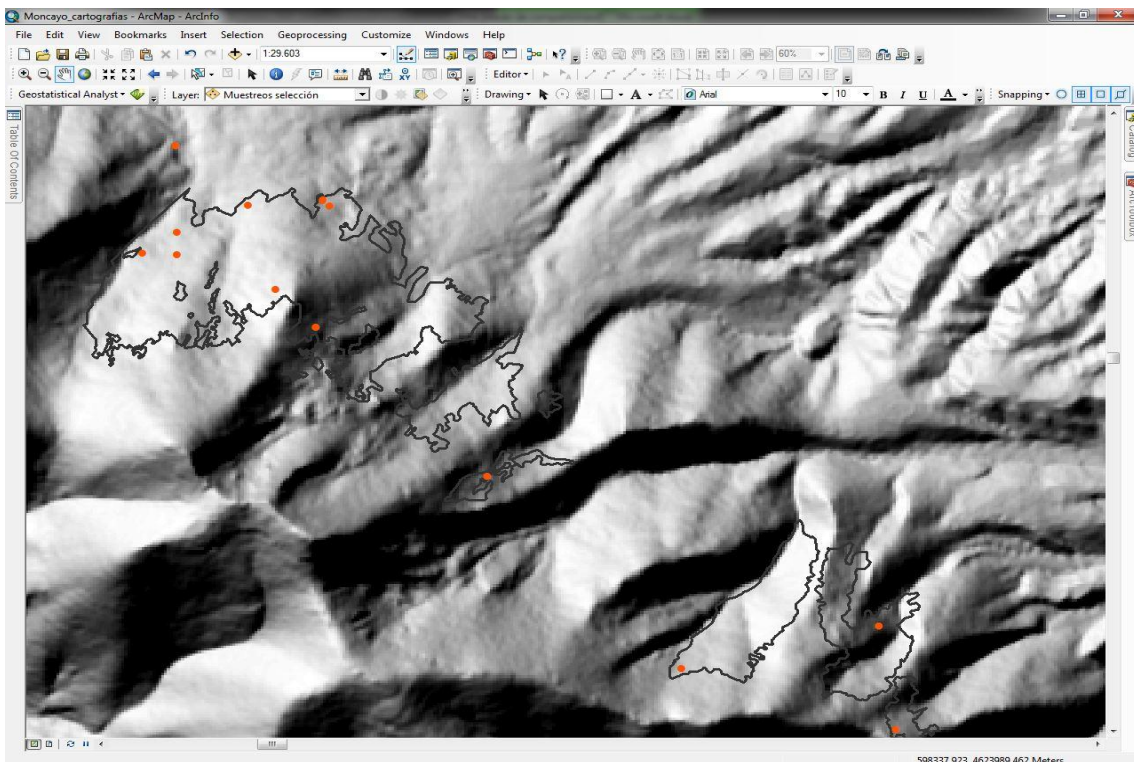


Figura 42. Modelo de sombreado

Asimismo, se ha generado el mapa de radiación solar directa (Figura43).

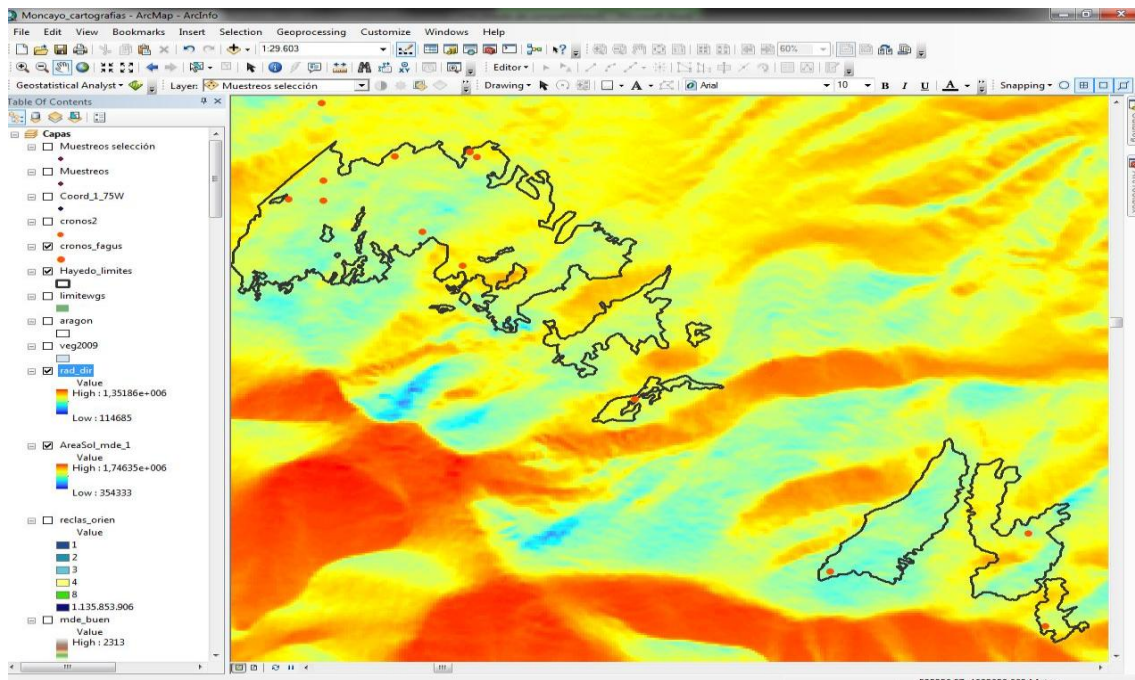


Figura 43. Radiación solar directa

Se ha realizado una maquetación final de los mapas de orientaciones y pendientes (Figura44), para conocer mejor las características biogeográficas de desarrollo de las hayas. En el caso de las orientaciones, se ha reclasificado en las ocho orientaciones principales siguiendo la rosa de los vientos. En el caso de las hayas estudiadas el 88% de las mismas están localizadas en orientaciones norte, noreste y noroeste, mientras que únicamente el 11% en orientación este. No existen hayas en las demás orientaciones, lo que indica la necesidad de humedad y umbría de la especie. En lo referente a la pendiente, también se ha reclasificado para conocer mejor a la especie. El 39,68% de los ejemplares están localizados en una pendiente del 40% o lo que es lo mismo de 18°. No hay prácticamente hayas en zonas llanas ni en pendientes inferiores al 20% ya que son zonas de pie de monte ocupadas por otras especies que se adaptan mejor a esas condiciones como *Quercus pirenaica* o *Quercus ilex*.

Mapa de orientaciones y pendientes del bosque de hayas

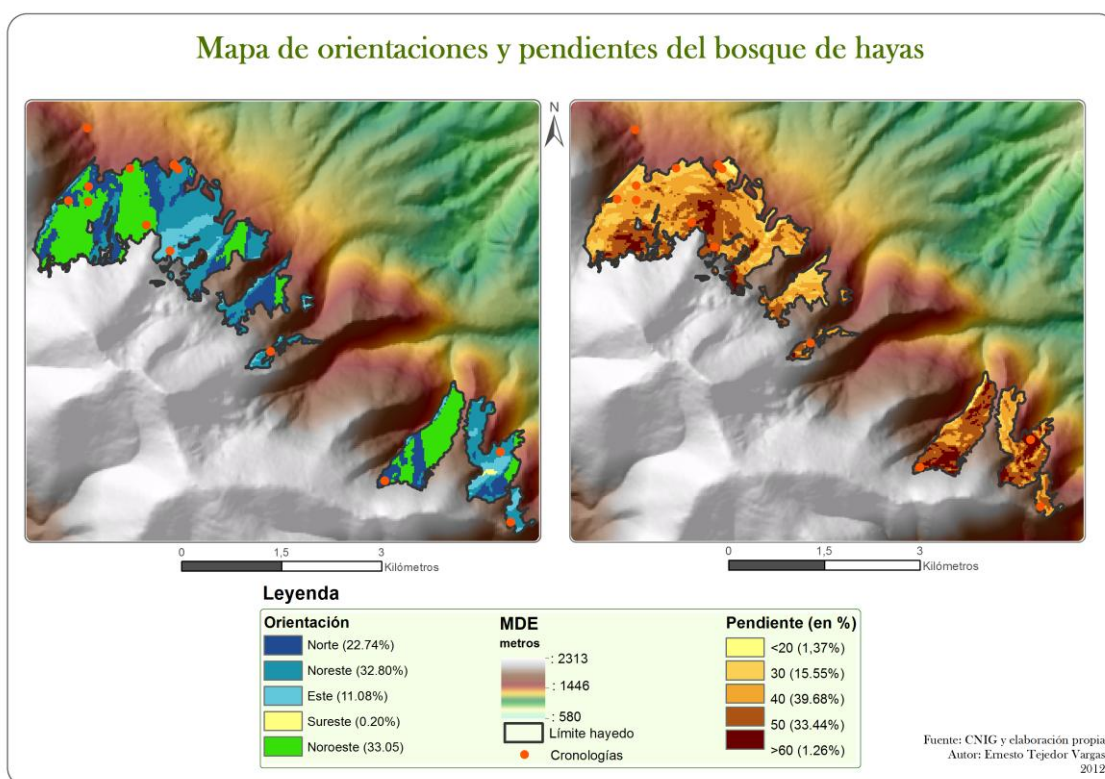


Figura 44. Mapa de orientaciones y pendientes del bosque de hayas

5.5. Modelización de las variaciones espaciales de las relaciones dendroclimáticas en el conjunto del área de distribución del hayedo en el Moncayo

Tras la obtención de los coeficientes de correlación mediante el análisis dendroclimático, el siguiente paso era realizar el modelo de regresión múltiple para obtener los coeficientes en este caso para generar los modelos y posteriormente las cartografías. La validación de estos modelos se ha determinado mediante el valor de r^2 y el valor de *significación* hallado a su vez mediante la *t de student* (Figura 45). Los modelos con *significación* menor de 0,05 son considerados válidos, mientras los que tienen una *significación* mayor no pueden ser considerados como válidos. En este caso, significa que la variable en cuestión no tiene relación con la altitud, o que no tiene variación ni gradiente en altitud. Sin embargo, esto no significa que no tenga importancia, por tanto para cartografiar las variables cuyo valor de *significación* estaba por encima de 0,05 se ha realizado el promedio de esa variable para el conjunto de cronologías. De este modo obteníamos el valor de la constante. Para generar cartografías se ha realizado la misma operación que con las demás variables con la diferencia de que el valor multiplicado por la altitud era 0.

Variable	Coefficiente a	Coefficiente b	R ²	Significación
<i>Tmp,prev,sep</i>	-0,536901798	0,000382719	0,5219133	0,002349373
<i>Tmp,prev,oct</i>	0,296696926	-0,000196845	0,25291796	0,056029353
<i>Tmp,prev,nov</i>	0,118156249	-6,89239E-05	0,06343862	0,36515555
<i>Tmp,prev,dec</i>	-0,10624865	0,000125413	0,09291412	0,26929324
<i>Tmp,curr,jan</i>	0,142261723	7,57108E-06	0,00029578	0,951491301
<i>Tmp,curr,feb</i>	0,1768597	-0,000137037	0,10536598	0,237834906
<i>Tmp,curr,mar</i>	0,270853914	-0,0001723	0,21245115	0,083773973
<i>Tmp,curr,apr</i>	1,039044937	-0,000862951	0,78442683	1,12215E-05
<i>Tmp,curr,may</i>	-0,364101223	0,000327578	0,47780636	0,004317144
<i>Tmp,curr,jun</i>	-0,411793293	0,000240274	0,31193319	0,030464571
<i>Tmp,curr,jul</i>	-0,728191244	0,000454783	0,54342437	0,001713951
<i>Tmp,curr,aug</i>	-0,38319107	0,000394823	0,73515327	4,39505E-05
<i>Tmp,curr,sep</i>	-0,001764742	2,0569E-05	0,00343066	0,83574095
<i>Tmp,curr,oct</i>	0,3934077	-0,000503662	0,72995209	5,00209E-05
<i>Tmp,curr,nov</i>	0,232630952	-0,000196265	0,23499208	0,067041555
<i>Tmp,curr,dec</i>	0,793722874	-0,000546911	0,76719436	1,86724E-05
<i>Pre,prev,sep</i>	-0,010662344	6,08542E-06	0,00020569	0,959541034
<i>Pre,prev,oct</i>	0,107330857	-6,16266E-05	0,04919745	0,426908464
<i>Pre,prev,nov</i>	-0,353724127	0,000192225	0,34910127	0,020375548
<i>Pre,prev,dec</i>	0,91222485	-0,00051002	0,54250807	0,001737605
<i>Pre,curr,jan</i>	0,934514195	-0,000689495	0,83571517	1,86827E-06
<i>Pre,curr,feb</i>	-0,504543711	0,000289436	0,21269679	0,083572027
<i>Pre,curr,mar</i>	-0,564706	0,000304178	0,42187167	0,008778388
<i>Pre,curr,apr</i>	-0,350934016	0,000317478	0,43290555	0,007668423
<i>Pre,curr,may</i>	0,785562631	-0,000516779	0,69049947	0,000124198
<i>Pre,curr,jun</i>	0,777748396	-0,000383365	0,46669795	0,004995884
<i>Pre,curr,jul</i>	0,694052291	-0,000504631	0,41152827	0,0099449
<i>Pre,curr,aug</i>	-0,09228492	-8,76315E-06	0,00040604	0,9431765
<i>Pre,curr,sep</i>	-0,117054686	0,000159115	0,23884244	0,064518605
<i>Pre,curr,oct</i>	0,048510243	1,11062E-05	0,00210553	0,871004695
<i>Pre,curr,nov</i>	0,857657612	-0,000656699	0,5548341	0,001441926
<i>Pre,curr,dec</i>	0,733003822	-0,000614488	0,72003463	6,35976E-05

Figura 45. Tabla de valores de coeficientes, r² y sig.

El nivel de significación de los modelos es un indicador suficientemente importante como para determinar si un modelo es válido o no. Pero además de este parámetro se han realizado gráficos de dispersión y significación, entre los coeficientes de relación obtenidos en el análisis climático y los valores de altitud de cada cronología. A continuación se muestran algunos de los resultados, tanto de modelos significativos como de modelos no significativos.

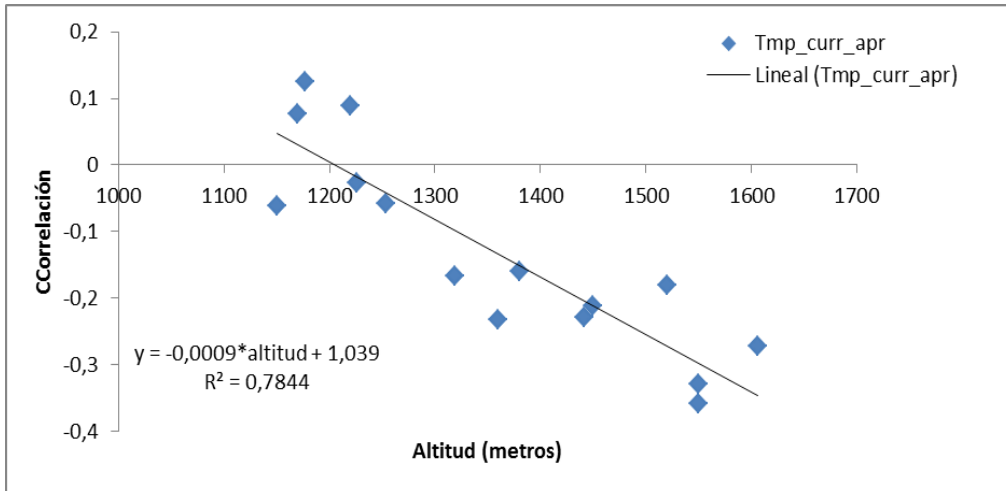


Figura 46. Gráfico de dispersión de la temperatura de abril.

En la Figura46 vemos el gráfico de dispersión del modelo de la variable temperatura de abril del año en curso. Se puede apreciar la tendencia de los coeficientes de correlación a disminuir conforme ascendemos en altitud. Este mismo patrón lo observamos en la variable precipitación de diciembre del año previo (Figura47).

Se puede interpretar en el sentido de que las precipitaciones de diciembre del año previo afectan más a las hayas de altitudes más bajas. Afectan con correlaciones positivas, es decir, si hay mayores precipitaciones el crecimiento será mayor.

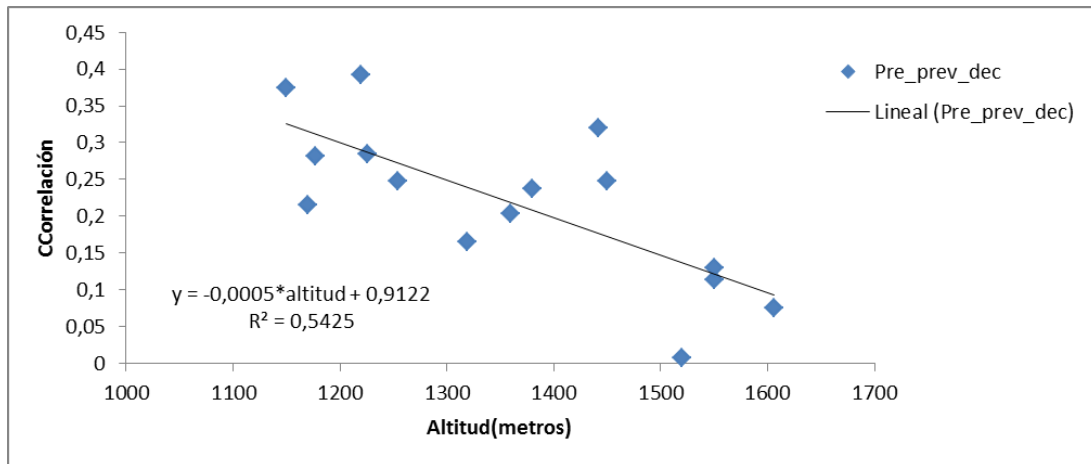


Figura 47. Gráfico de dispersión precipitación previa de diciembre

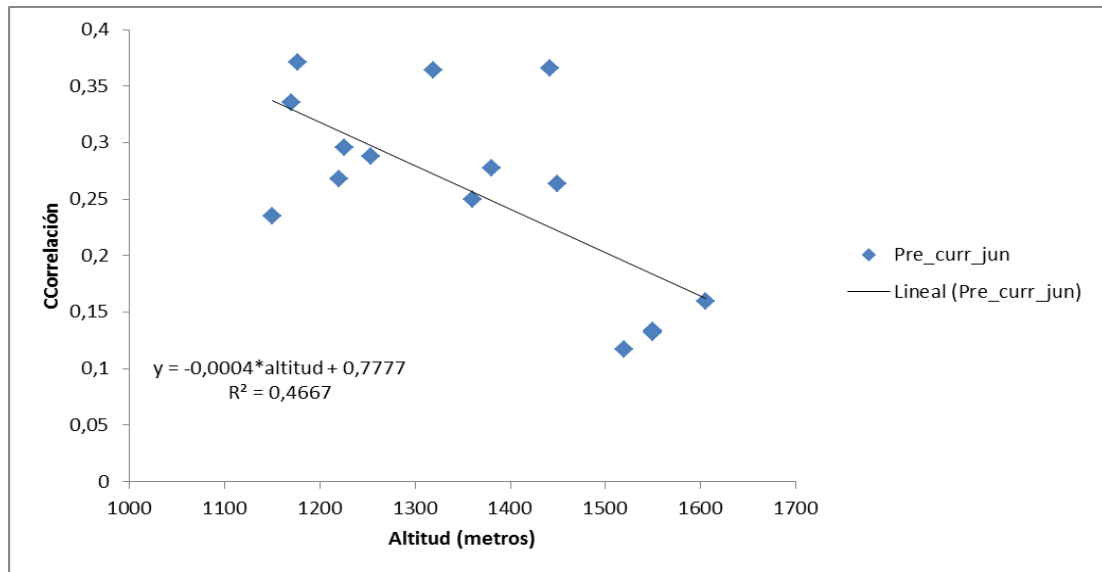


Figura 48. Gráfico dispersión precipitación de junio

En la Figura48 se muestra el gráfico de dispersión de la precipitación de junio del año en curso el cual muestra el mismo patrón, con correlaciones positivas mayores en menor altitud y descendiendo conforme se asciende en altitud.

Sin embargo, los modelos que presentan valores de significación por encima de 0,05 no ofrecen tendencias, ya que la variable tiene igual de importancia para toda el área de distribución del hayedo. Es el caso, por ejemplo, de la temperatura de enero del año en curso (Figura49). Su R^2 es muy baja y nos está indicando que en este caso la altitud no tiene relación con los coeficientes de correlación. Lo cual no significa que la temperatura de enero no sea importante ya que de hecho puedo llegar a aletargar o retrasar el comienzo de crecimiento del anillo si se producen heladas continuadas. El resto de gráficos de dispersión se ajuntan en el apartado de anexos.

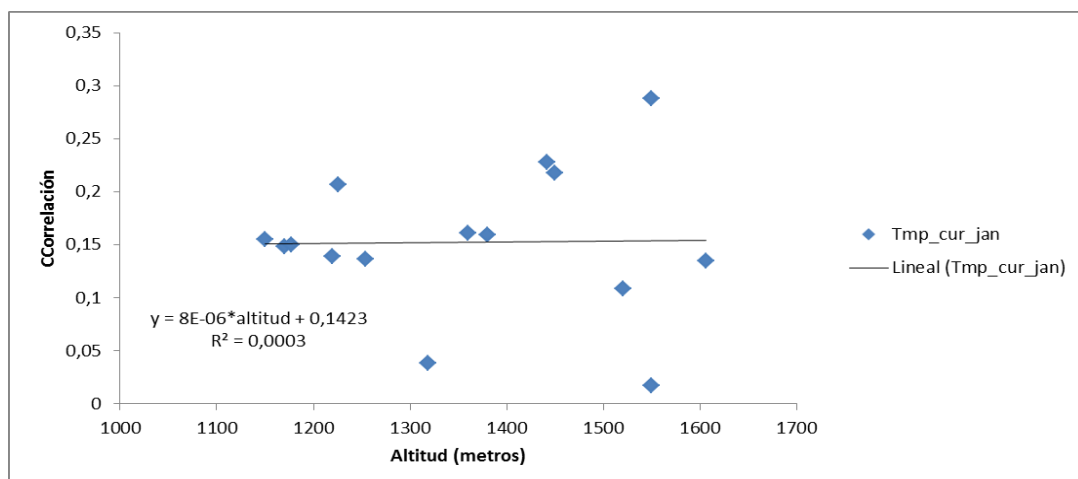


Figura 49. Gráfico de dispersión de la temperatura de enero

5.6. Interpolación y generación de cartografías dendroclimáticas

El último gran objetivo del trabajo es la culminación de todo el análisis tanto dendroclimático como de modelos en forma de cartografías que expresen todos los resultados estadísticos. Este proceso se expresa mediante la Figura 50.

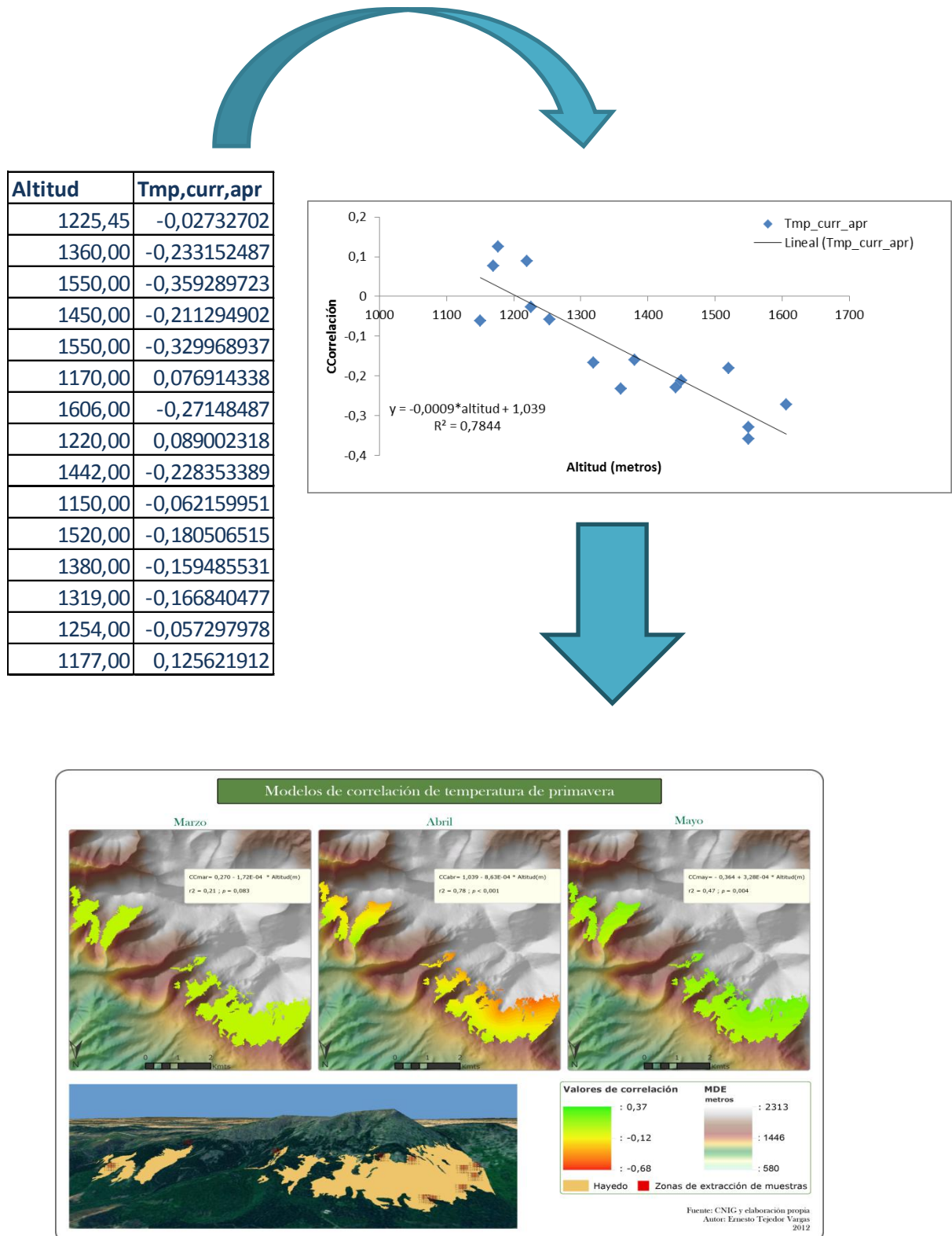


Figura 50. Proceso de generación de cartografías

Mediante este proceso se han realizado 10 cartografías finales, repartidas entre precipitación y temperatura y distribuidas por estaciones, incluyendo el otoño del año previo.

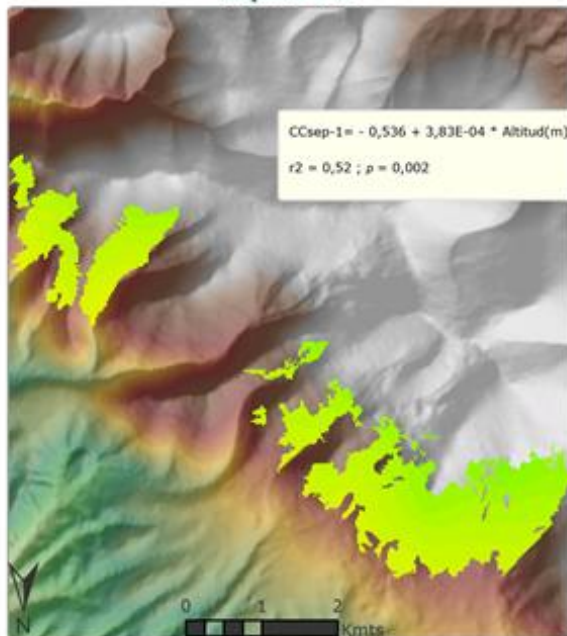
Comenzando con las temperaturas, se van a mostrar los mapas de manera sucesiva de manera que se tenga una visión de conjunto. En la Figura 51 se muestran los modelos de correlación de temperatura de otoño del año previo, donde únicamente septiembre es el mes donde el gradiente altitudinal tiene importancia, además una correlación positiva. Tanto en octubre como noviembre la temperatura tiene la misma influencia, en este caso correlación positiva, sin importar el gradiente altitudinal.

Durante estación invernal (Figura 52) tiene importancia la altitud en los meses de diciembre y febrero. El valor de significación de 0,95 de enero está indicando que la altitud no tiene correlación con las temperaturas en enero y por tanto afecta por igual a todo el conjunto de hayas.

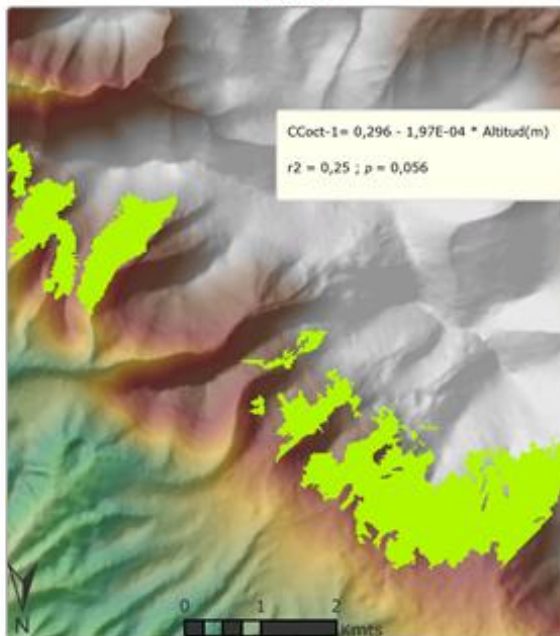
En la estación primaveral (Figura 53) es marzo el mes donde los modelos con la altitud no tienen significación. Sin embargo, mayo y sobre todo abril presentan valores de r^2 muy altos, y la gradación de colores nos está indicando como hacia la altitud de 1300 metros hay un cambio y esa correlación pasa de ser positiva a negativa. En la Figura 54 vemos los modelos para la estación de verano, donde todos los meses tienen modelos válidos con valores de significación por debajo de 0,05. Agosto presenta valores de correlación positiva y aunque no hay mucho gradiente sí son más intensos en las mayores altitudes. Por último, es en la estación de otoño del año actual (Figura 55) donde se dan mayores contrastes ya que mientras en septiembre y noviembre la gradación altitudinal no juega un papel importante en el crecimiento de la especie, en octubre se aprecia una correlación negativa que va en aumento con la altitud. El anillo del árbol en octubre ha dejado de crecer, por tanto la correlación debería ser uniforme y positiva para toda la zona, por tanto, hay que realizar más estudios contrastando los datos dendrocronológicos con otras fuentes de información climática.

Modelos de correlación de temperatura de otoño del año previo

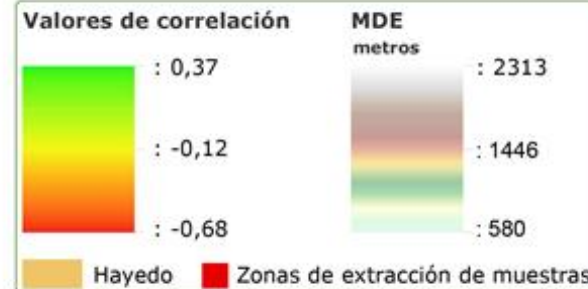
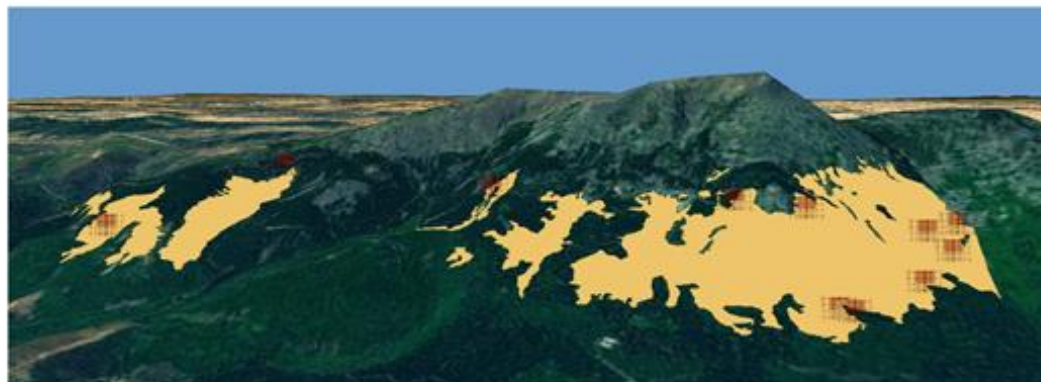
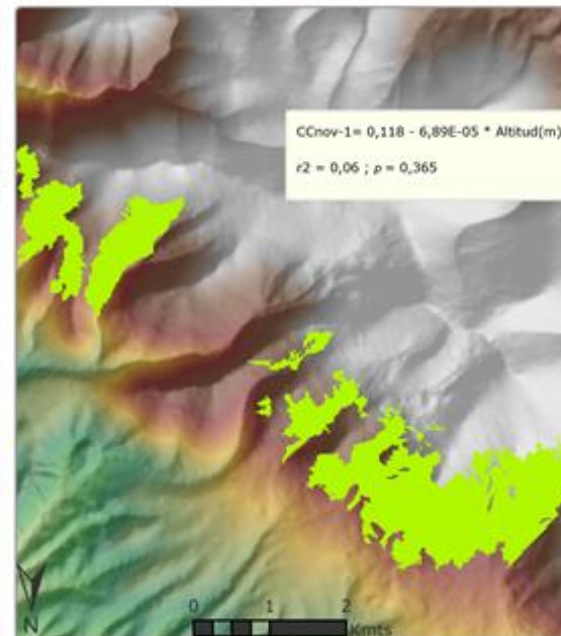
Septiembre



Octubre



Noviembre

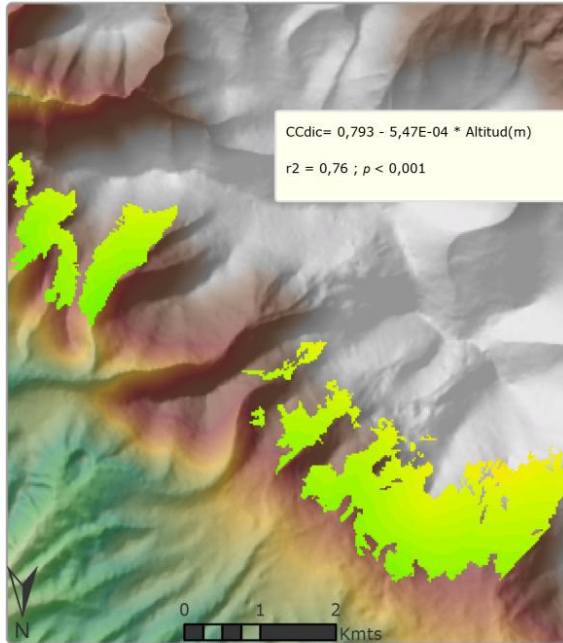


Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

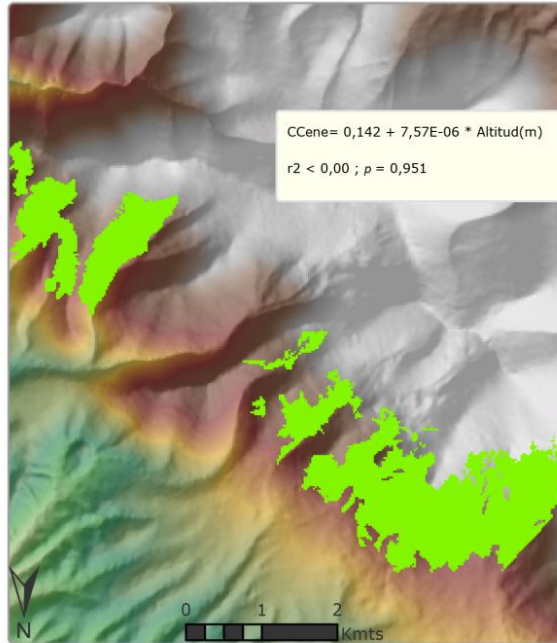
Figura 51. Mapa de correlación de temperatura en otoño del año previo

Modelos de correlación de temperatura de invierno

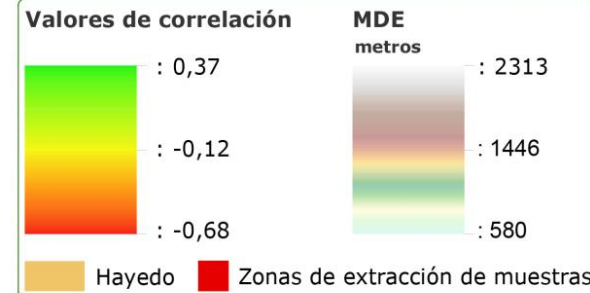
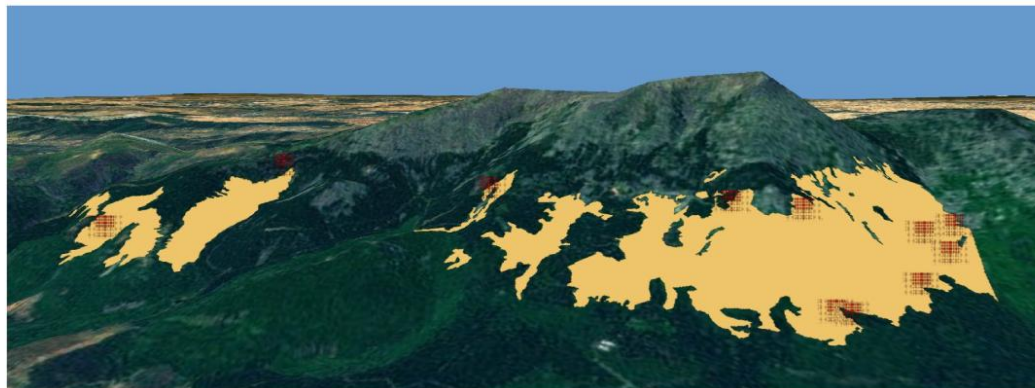
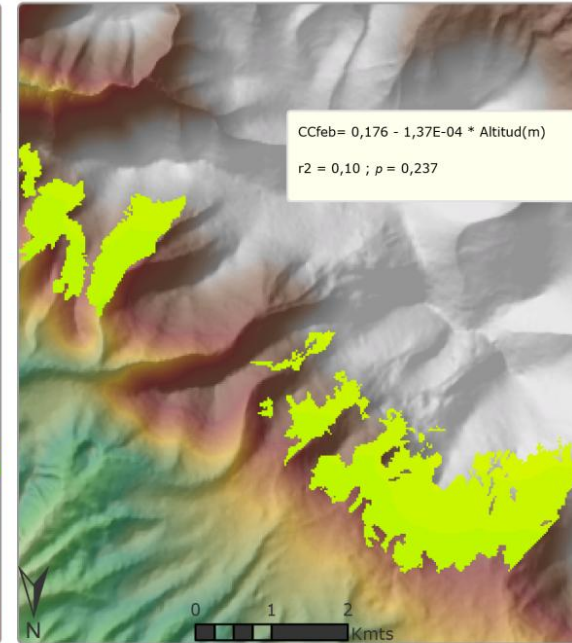
Diciembre



Enero



Febrero

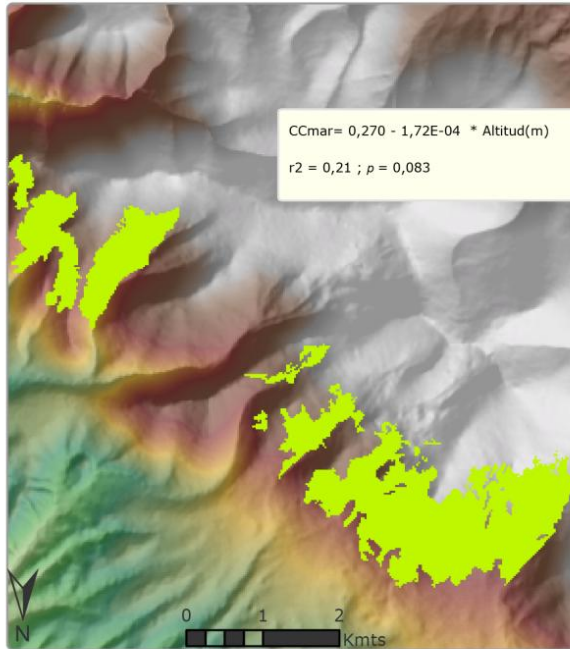


Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

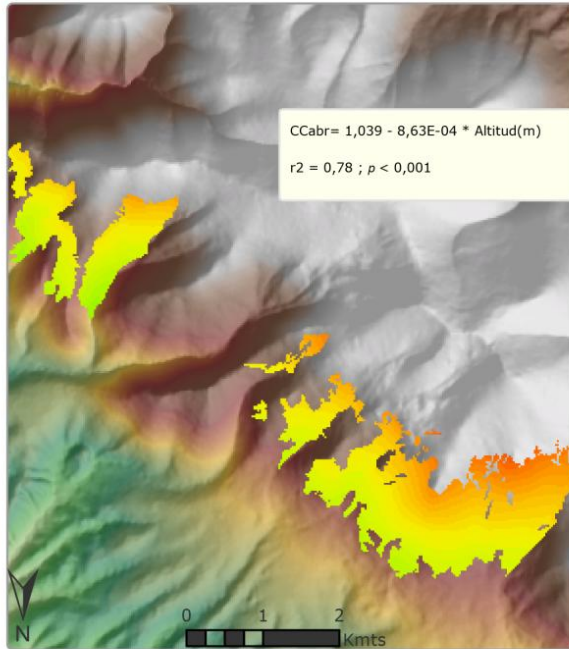
Figura 52. Mapa de correlación de temperatura de invierno

Modelos de correlación de temperatura de primavera

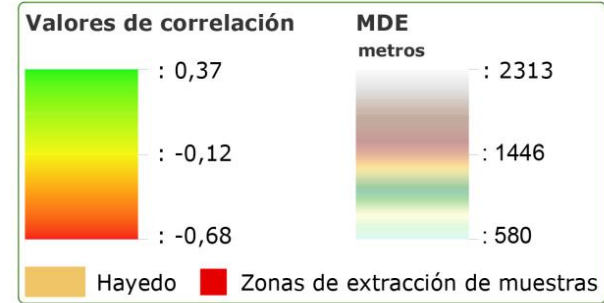
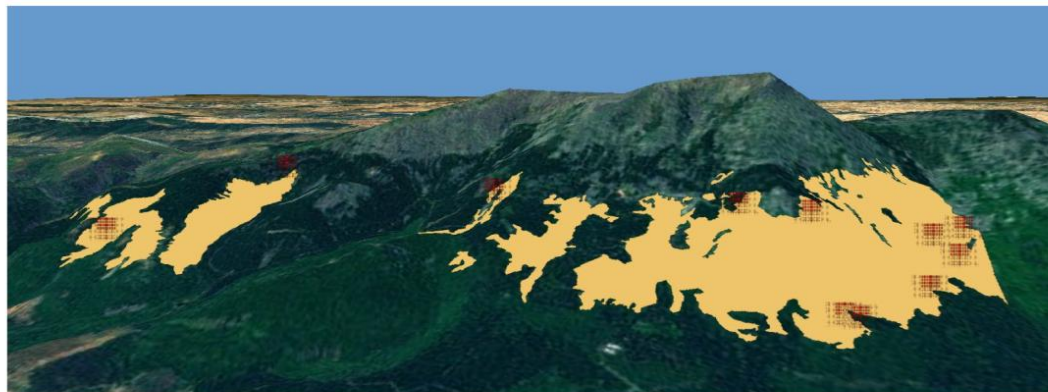
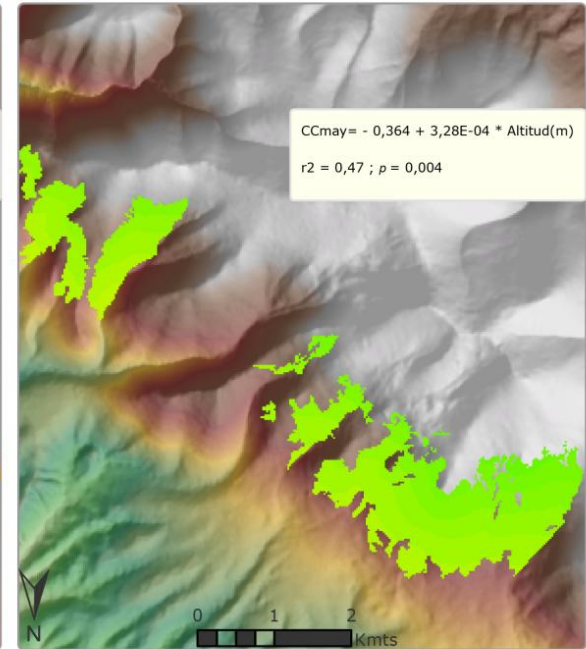
Marzo



Abril



Mayo

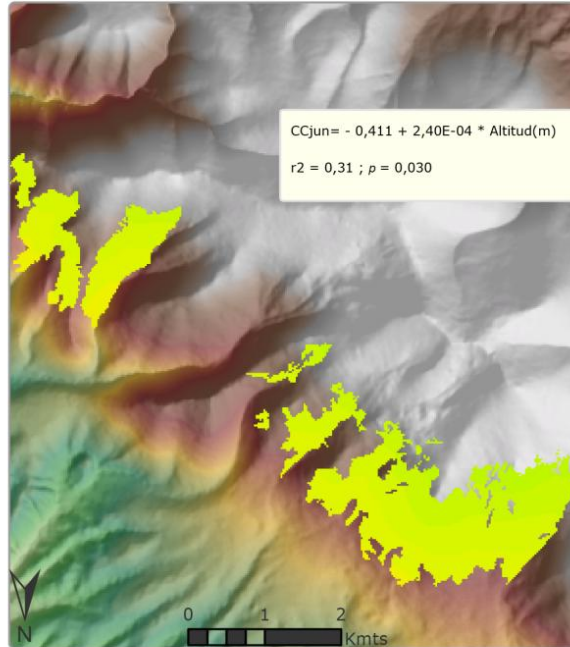


Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

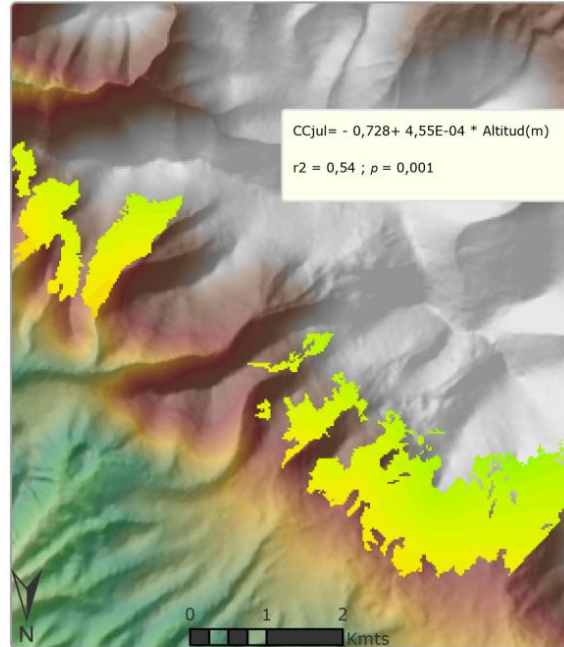
Figura 53. Mapa de correlación de temperatura de primavera

Modelos de correlación de temperatura de verano

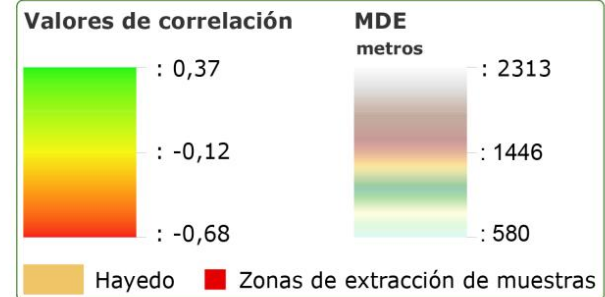
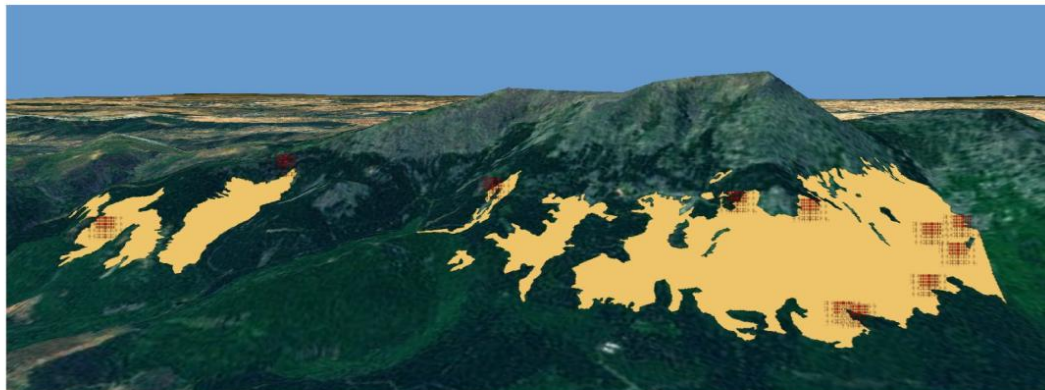
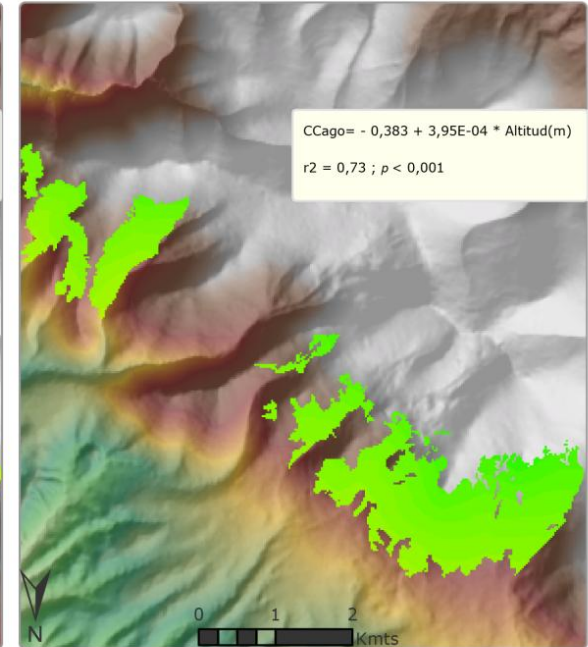
Junio



Julio



Agosto

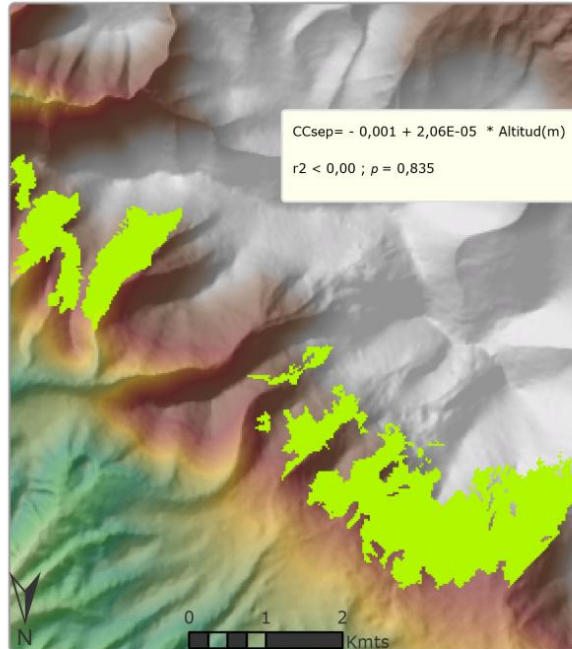


Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

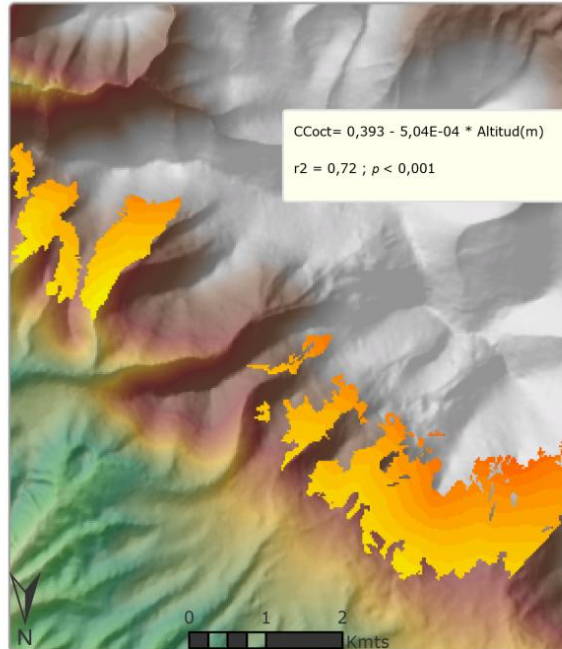
Figura 54. Mapa de correlación de temperatura de verano

Modelos de correlación de temperatura de otoño

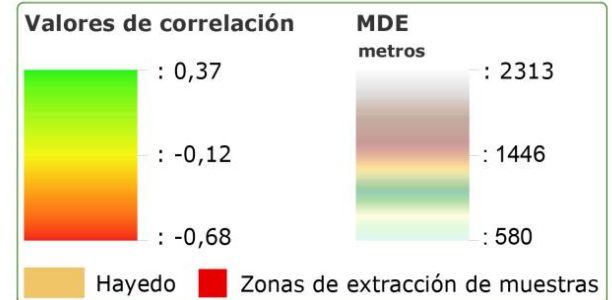
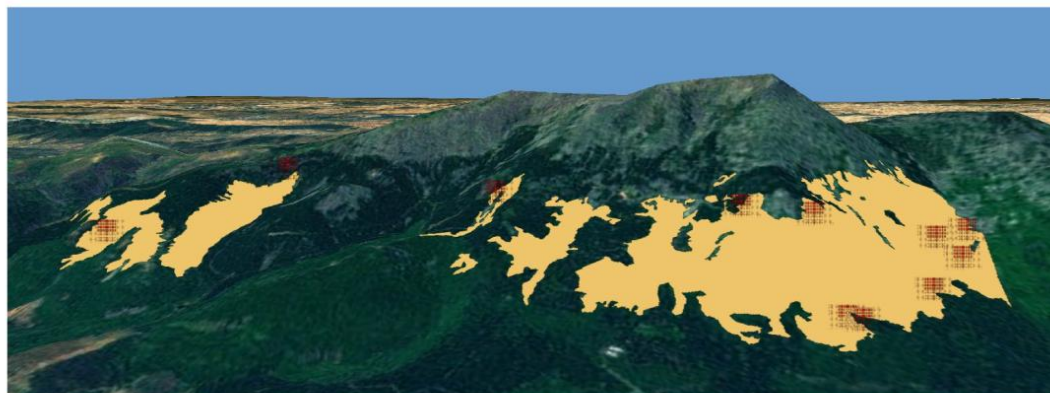
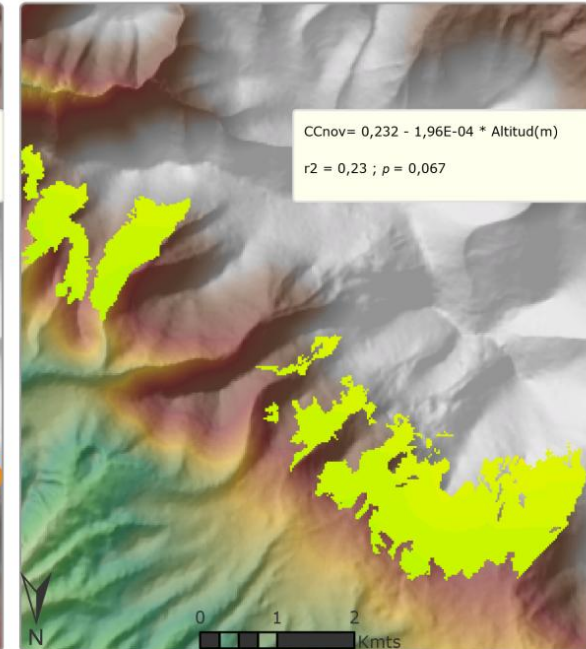
Septiembre



Octubre



Noviembre



Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

Figura 55. Mapa de correlación de temperatura de otoño

En las siguientes páginas se mostrarán los mapas de correlaciones de precipitación sucesivamente.

En cuanto a la precipitación de otoño del año previo (Figura56), tanto septiembre como octubre no presentan una respuesta positiva al gradiente altitudinal. Sin embargo, en noviembre la correlación es negativa en altitudes bajas y va aumentando conforme aumentamos en altitud hasta llegar a correlaciones positivas en cotas de 1600 metros.

La precipitación de invierno (Figura57), tanto de diciembre como de enero, se muestra con una gran relación en términos de gradiente altitudinal. Mientras que en enero los coeficientes son positivos excepto en la cota más alta, en diciembre los valores negativos llegan hasta cotas más bajas. Hasta la cota ya mencionada de alrededor de 1300 metros donde se produce la transición de coeficientes negativos a positivos.

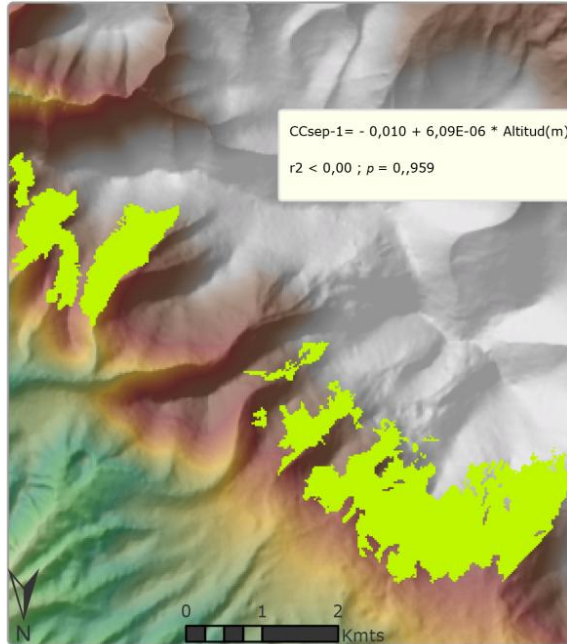
En cuanto a la precipitación de primavera (Figura58), el mes de mayo se muestra como el de mayor significación, con valores de correlación positivos. Lo que significa que a cuanto mayor sea la precipitación mayor será el crecimiento del anillo. En abril sucede lo mismo, mientras que en marzo los coeficientes son negativos excepto en las cotas altas.

Durante los meses de la estación de verano (Figura59), agosto se muestra como un mes donde la precipitación no tiene relación con la altitud y además con los valores de los coeficientes cercanos a 0. En cambio, la precipitación de junio tiene valores de correlación positivos incrementándose según se desciende en altitud. Lo mismo sucede en junio, mes en el que sin embargo en las cotas altas existen valores de correlación negativos.

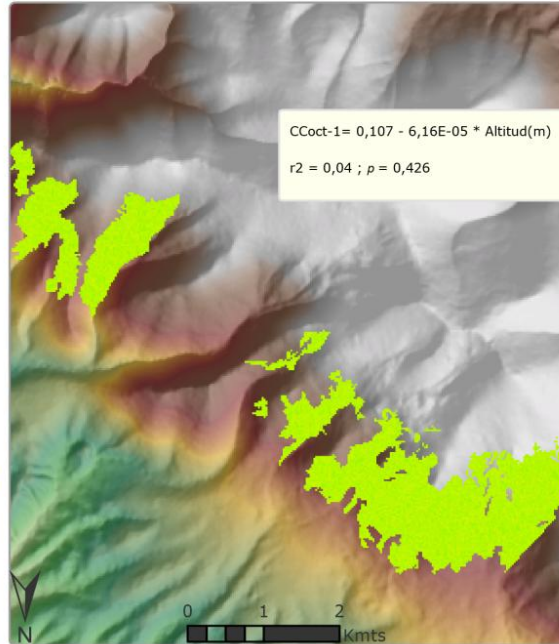
Por último, en la estación de octubre (Figura60), ni septiembre ni octubre presentan modelos válidos en relación al gradiente altitudinal. Por el contrario, en noviembre los coeficientes van disminuyendo conforme se aumenta la altitud.

Modelos de correlación de precipitación de otoño del año previo

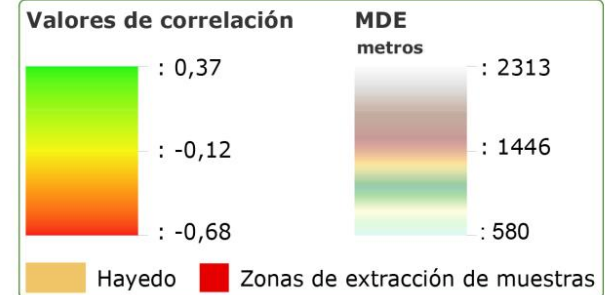
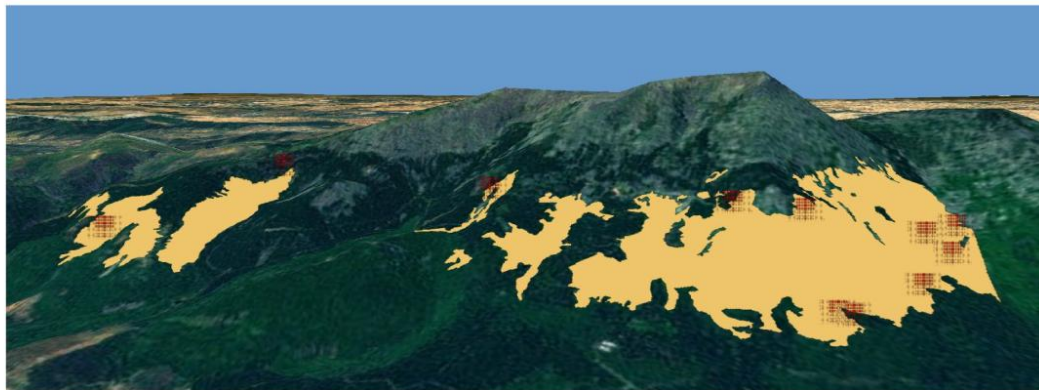
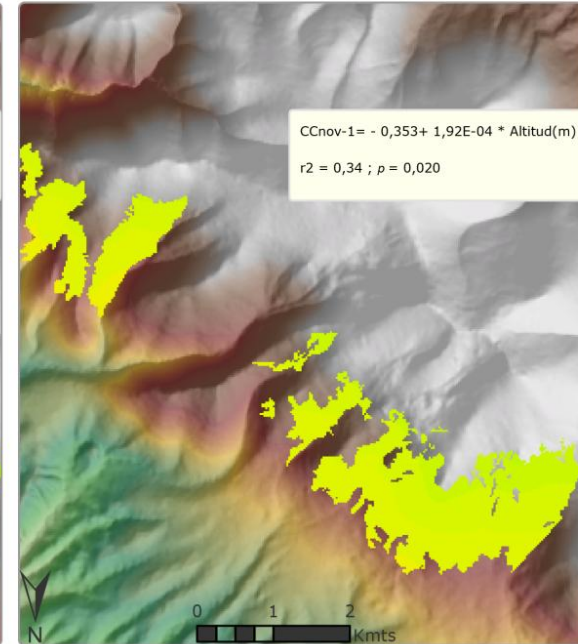
Septiembre



Octubre



Noviembre

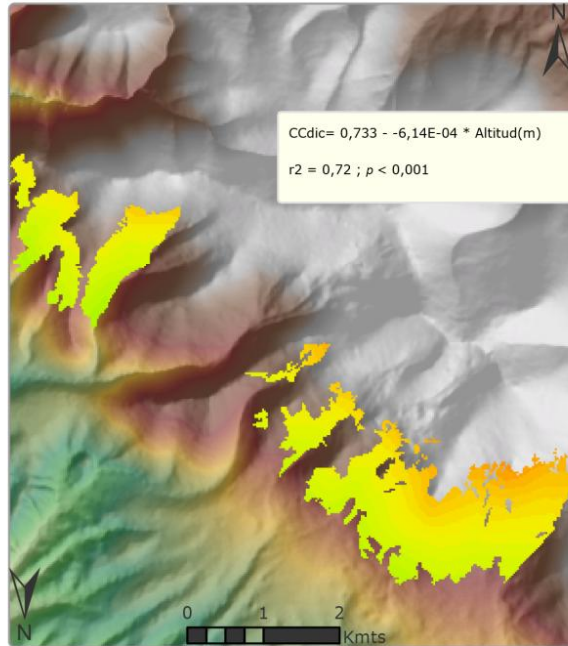


Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

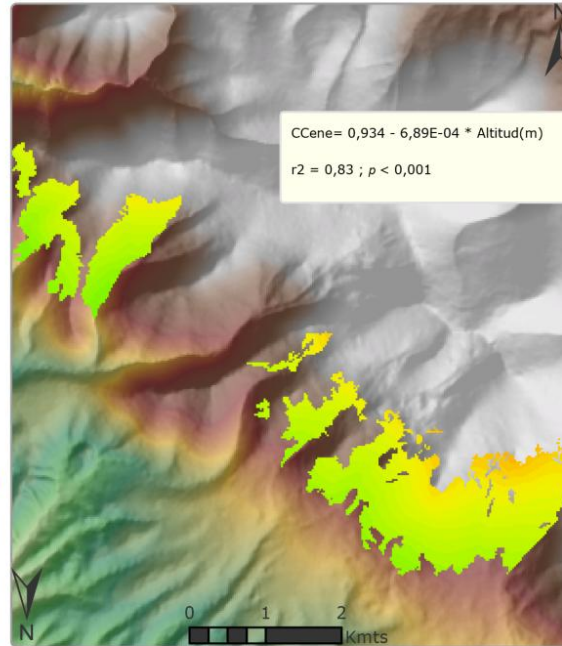
Figura 56. Mapa de correlación de precipitación de septiembre del año previo

Modelos de correlación de precipitación de invierno

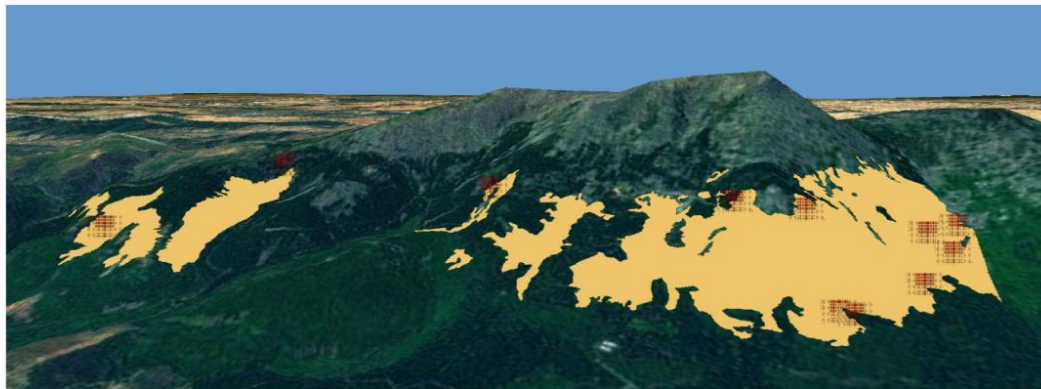
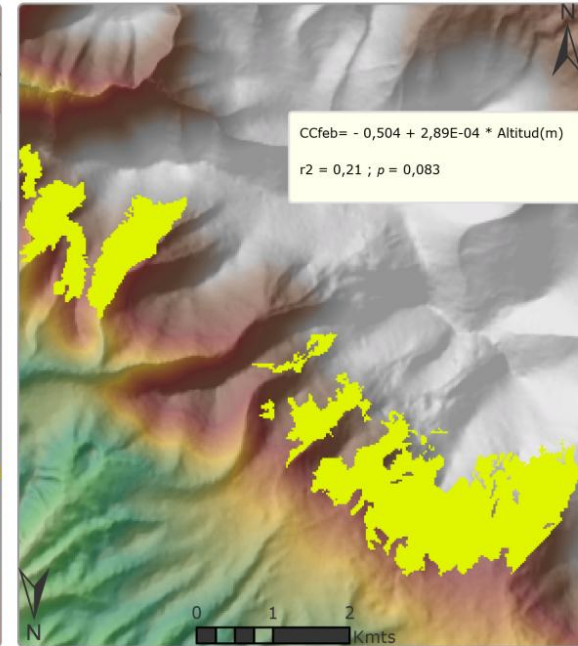
Diciembre



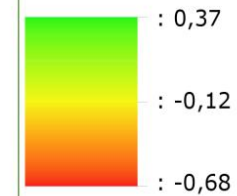
Enero



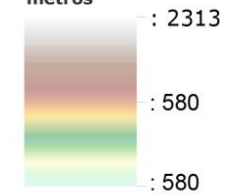
Febrero



Valores de correlación



MDE
metros



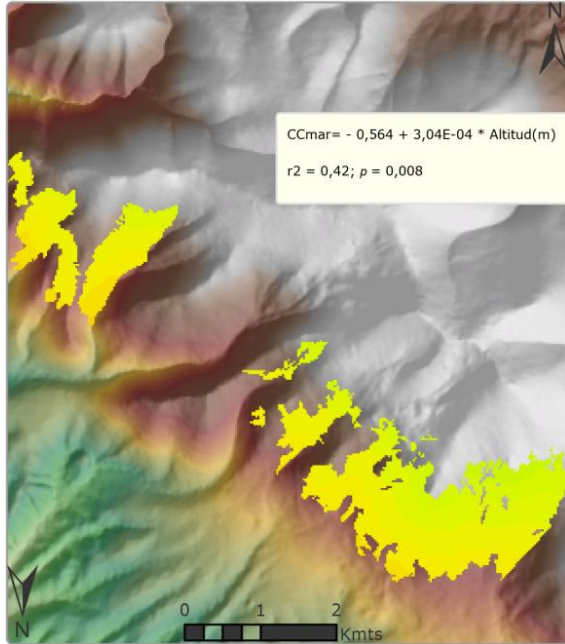
Hayedo Zonas de extracción de muestras

Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

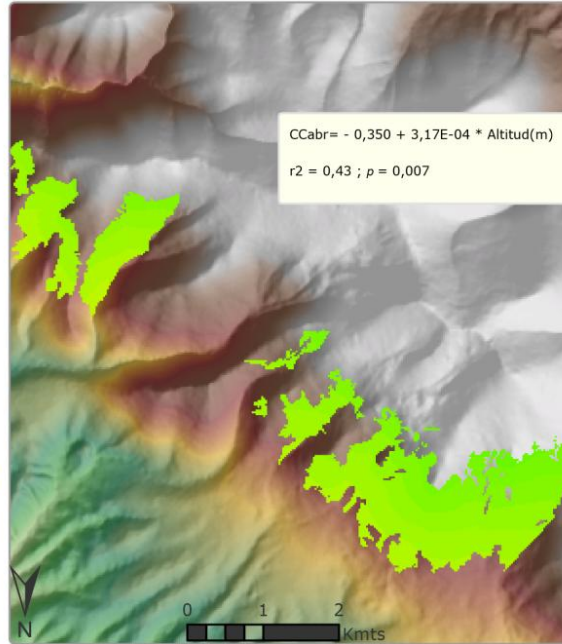
Figura 57. Mapa de correlación de precipitación de invierno

Modelos de correlación de precipitación de primavera

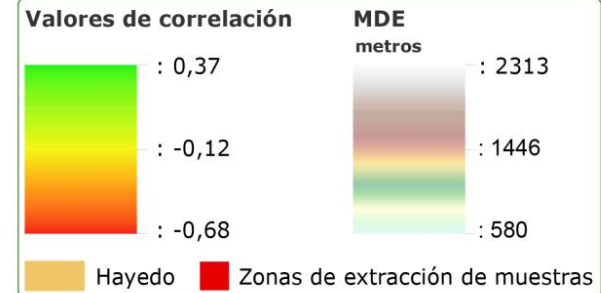
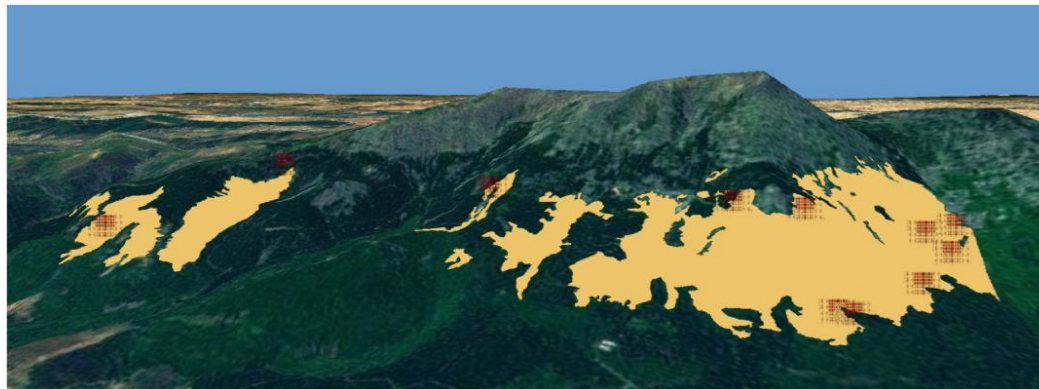
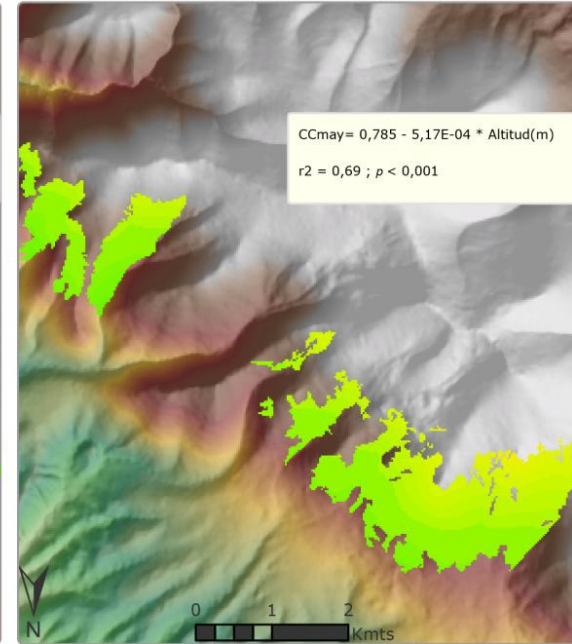
Marzo



Abril



Mayo

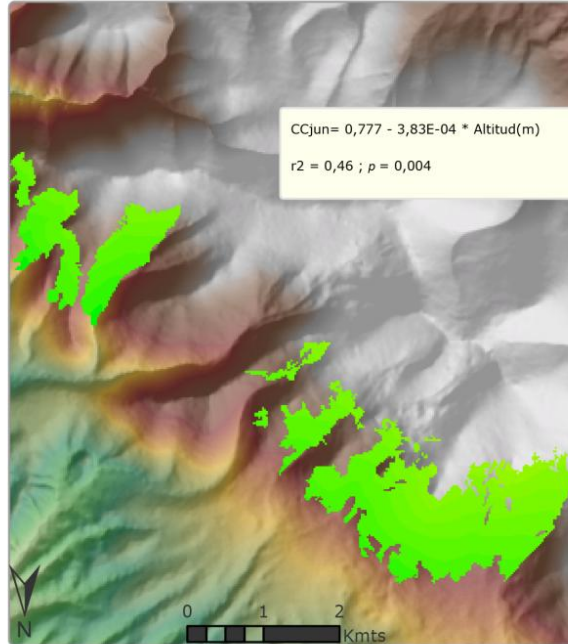


Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

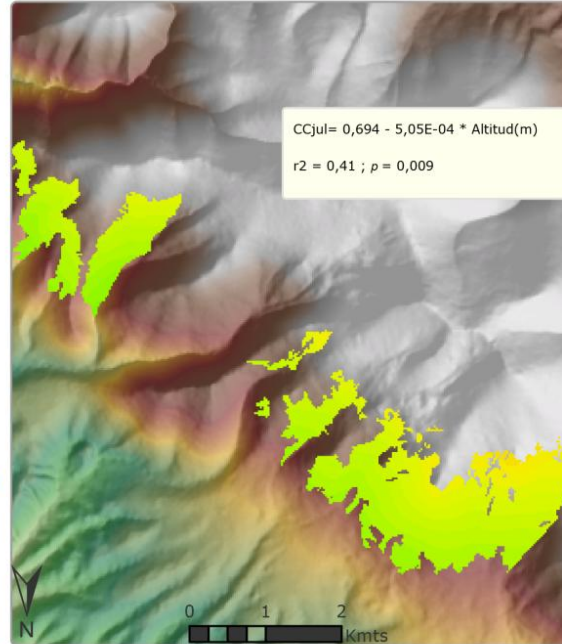
Figura 58. Mapa de correlación de precipitación de primavera

Modelos de correlación de precipitación de verano

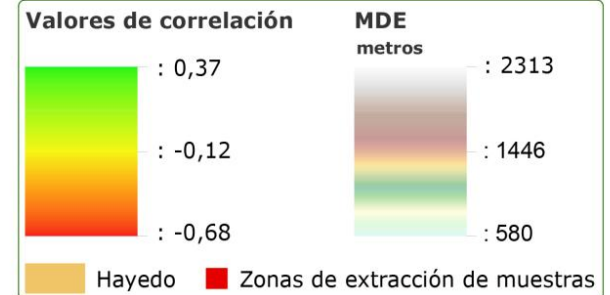
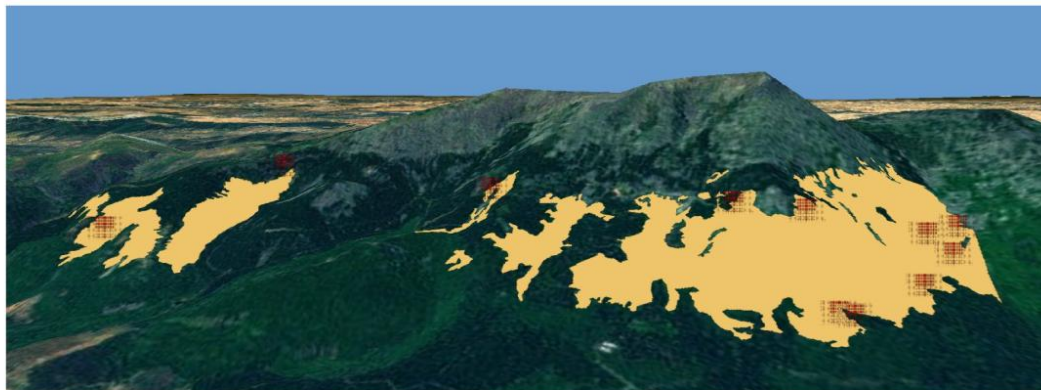
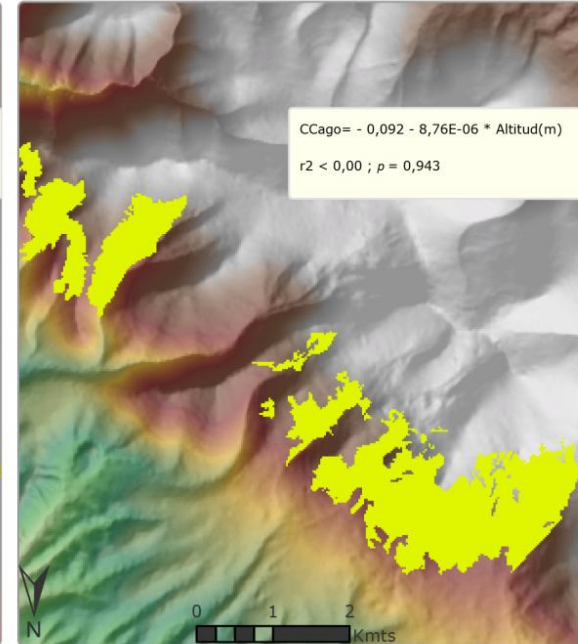
Junio



Julio



Agosto

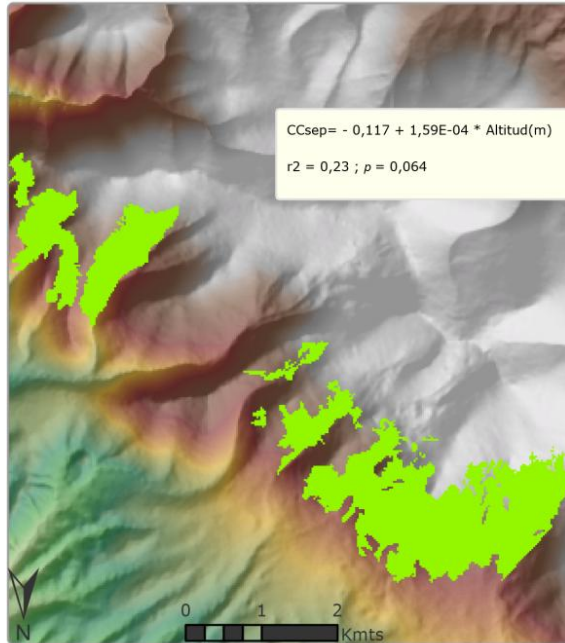


Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

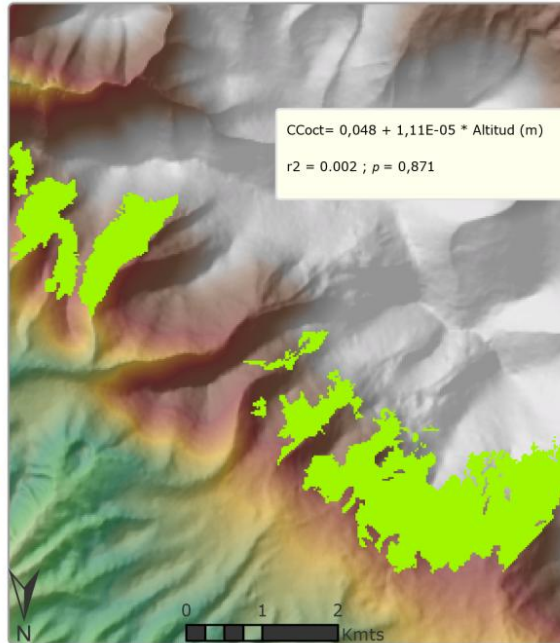
Figura 59. Mapa de correlación de la precipitación de verano

Modelos de correlación de precipitación de otoño

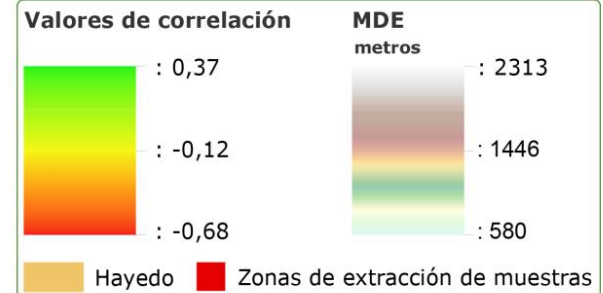
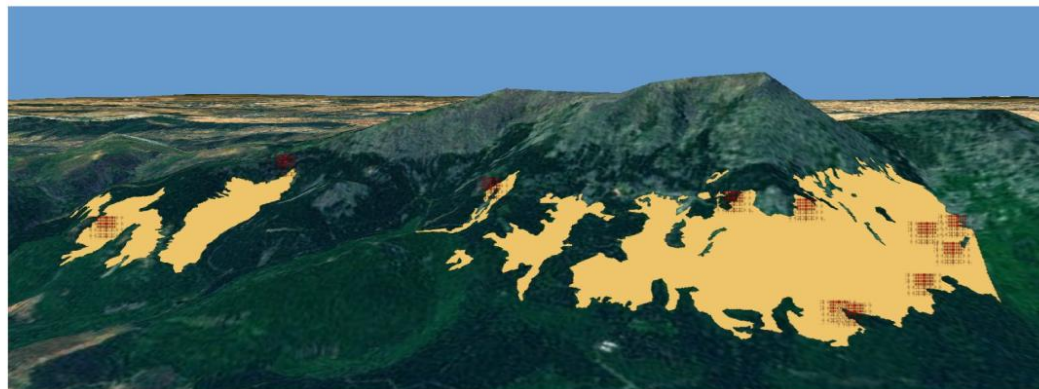
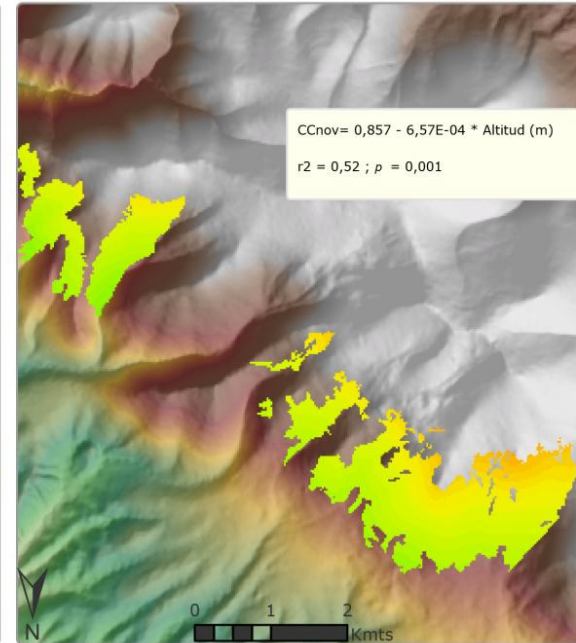
Septiembre



Octubre



Noviembre



Fuente: CNIG y elaboración propia
 Autor: Ernesto Tejedor Vargas
 2012

Figura 60. Mapa de correlación de la precipitación de otoño

6. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo se han dividido en dos apartados, en uno se han aportado las conclusiones referidas a los resultados obtenidos, mientras que en otro bloque se han destacado las conclusiones acerca de la metodología empleada y la formación que se ha tenido que llevar a cabo para poder desarrollar el trabajo.

6.1. Conclusiones respecto a los resultados obtenidos

Los resultados finales fruto del análisis dendroclimático y la modelización de las variables, es decir, las cartografías, han sido muy satisfactorios. Las cartografías explican de manera concreta y visual las relaciones entre el crecimiento de las hayas y el clima y consecuentemente el gradiente altitudinal dado el análisis dendroclimático.

Los coeficientes de correlación más significativos dados los datos analizados para la especie *Fagus sylvatica* en el P.N. del Moncayo son los de la temperatura en abril y la precipitación en junio. Por tanto, al ser los meses o periodos que más influencia tienen en el crecimiento de la especie, habrá que continuar analizando los cambios y las relaciones que se producen entre estos periodos y el crecimiento de la especie. Además de continuar el estudio con otras especies como *Pinus halepensis* o *Quercus pirenaica*.

Existe una correlación entre gradiente altitudinal/térmico y crecimiento de las hayas, presentando patrones diferentes de crecimiento conforme aumentamos en altitud. Con los datos obtenidos, es a partir de los 1300 metros de altitud donde la respuesta de las hayas al clima empieza a variar con respecto a altitudes inferiores.

Al mismo tiempo, sería conveniente repetir todo el estudio con otros datos climáticos para contrastar los resultados y seguir investigando sobre la señal climática negativa tan fuerte en temperatura de octubre.

Se destaca por tanto la influencia de las variables climáticas estudiadas en el crecimiento de *Fagus sylvatica*. Por tanto, esta especie junto con otras, unido a la localización particular de las mismas hacen imprescindible continuar estudiando las características de las especies y su comportamiento ante el clima para poder anticiparse a los cambios futuros y poder así tratar de gestionar el Parque de la manera más eficiente posible.

6.2. Conclusiones respecto de la metodología utilizada

Para la correcta ejecución del trabajo se ha tenido que realizar un proceso formativo en cuanto a metodología y técnicas en dendrocronología y en el programa estadístico R.

- Las técnicas y herramientas utilizadas por la dendrocronología se muestran eficaces para determinar qué elementos del clima condicionan la dinámica de crecimiento de la especie.
- Son técnicas complejas, y por tanto, su correcta ejecución y utilización requiere muchas horas de práctica y la repetición de muchos de los procesos.
- Requiere de procesos estadísticos complejos para la verificación y validación de los resultados, por tanto, se tiene que tener conocimiento de las herramientas estadísticas.
- El programa para estadística aplicada R, se consolida como parte fundamental a la hora de analizar los resultados obtenidos tras la medición de los anillos. Dada su condición de programa de código abierto, el usuario es capaz de modificar cualquier parámetro para ajustarlo a las necesidades de cada estudio.
- Al mismo tiempo, R permite al usuario ejecutar scripts que permitan iterar procesos, de tal forma que se ahorra gran cantidad de tiempo. Además, permite generar gráficos de alta calidad.

A la necesidad de la unión de R con el análisis dendroclimático se une la importancia de la integración de esta información en un sistema de información geográfica. Se está trabajando sobre una especie localizada en unas determinadas condiciones geográficas, por tanto introducir el territorio es fundamental. Los sistemas de información geográfica no son una ciencia, sino que son una herramienta. Por tanto, como herramienta se muestran muy eficaces para localizar y analizar procesos e integrar distintos procesos que se suceden en la superficie de la tierra. Además, los SIG permiten al usuario generar cartografía como producto final tras la realización de múltiples análisis o estudios estadísticos con diferentes variables.

La producción de cartografías es fundamental en el ámbito de la gestión del medio ambiente y la ordenación del territorio. Mediante las cartografías se pretende por un lado aumentar el conocimiento de la especie estudiada y por otro analizar futuros cambios en la distribución de la especie ante variaciones climáticas.

7. Referencias

- Biondi, F. and K. Waikul. 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30: 303-311.
- Bunn, A.G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26: 115-124.
- Bunn, A.G. 2010. Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia* 28: 251-258.
- De Luis, M., Brunetti, M., González-Hidalgo, J. C., Longares, L. A., Martín-Vide, J. (2010a). Changes in seasonal precipitation in the Iberian Peninsula during 1946–2005. *Global and Planetary Change* 74: 27-33.
- Dittmar, C. Zech, W. Elling, W. 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study, *Forest Ecology and Management*, Volume 173: 63-78.
- Dixon, P.M. 2001 Bootstrap resampling. In: El-Shaarawi, A.H., Piegorisch, W.W. (Eds.), *The Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley, New York.
- Draper N R & Smith H. 1966. *Applied regression analysis*. New York: Wiley, 407 p.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567pp.
- Guiot, J. 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin* 51:39-41.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. and Lister, D.H., 2012: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 dataset. Submitted to *International Journal of Climatology*.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Jump, A. Hunt, J. 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12: 2163-2174.
- Martínez del Castillo, E. 2011. Análisis multitemporal de la cubierta forestal del macizo del Moncayo mediante teledetección e índices de ecología del paisaje. Trabajo fin de máster en TIGs: SIG y teledetección.
- Menéndez Valderrey, JL. 2006. *Fagus sylvatica* L. Asturnatura.com on line, 98. Disponible en www.asturnatura.com/especie/fagus-sylvatica.html.

Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., New, M. (2004). A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). Tyndall Center Working Paper 55: 1-30.

Mitchell, T.D. and Jones, P.D., 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25, 693-712.

Puigdefábregas, J. Mendizabal, T. 1998. Perspectives on desertification: western Mediterranean. *Journal of Arid Environments* 39: 209-224.

Ricart, S. Ribas, A. La incidencia de la helada del 1956 en el olivar de navata (Altemporda, Girona). *Investigaciones geográficas* 50: 127-142.

Rojo Abuín, J.M. 2007. Regresión lineal múltiple. Instituto de Economía y Geografía. Madrid.

Vicente-Serrano, S. Saz, M.A. Cuadrat, J.M. 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research* 24: 161-180.

Weisberg, S., 1985. Applied Linear Regression, 2nd ed., John Wiley, New York, 324 pp.

Wimmer, R., Grabner, M. (1997). Effects of climate on vertical resin duct density and radial growth of Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst). *Trees* 11: 271-276.