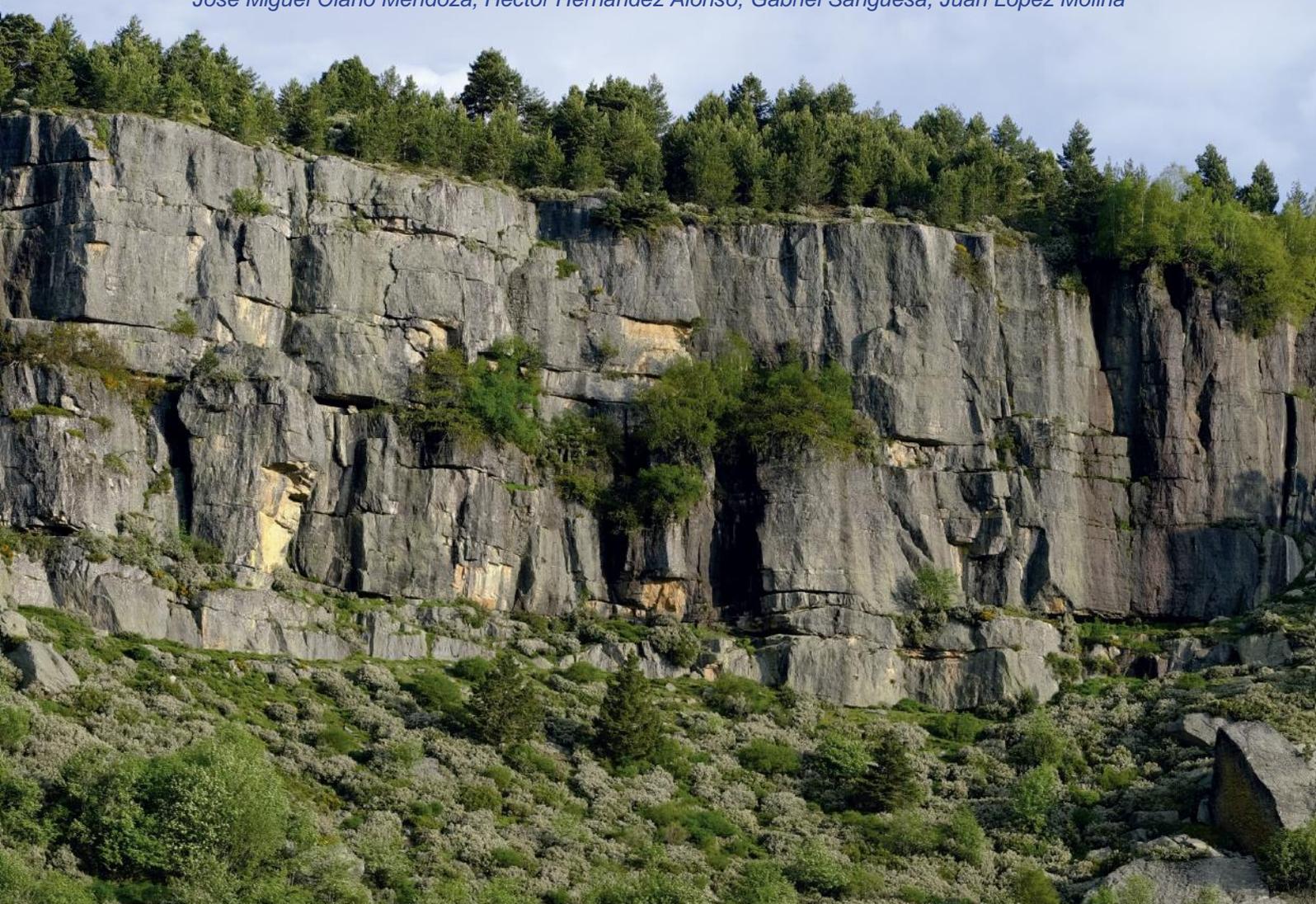




# INFORME ACCIÓN A2.2

04/03/2022

*José Miguel Olano Mendoza, Héctor Hernández Alonso, Gabriel Sangüesa, Juan López Molina*



CON LA CONTRIBUCIÓN DEL INSTRUMENTO FINANCIERO LIFE DE LA UNIÓN EUROPEA





# ÍNDICE

<b>Dendrocronología: el arte de medir los anillos de los árboles .....</b>	<b>5</b>
RELACIÓN DE ESPECIES Y PARCELAS DE MUESTREO .....	8
ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....	10
REFERENCIAS CITADAS EN LA METODOLOGÍA.....	14
<b>FICHAS DE LAS ESPECIES .....</b>	<b>15</b>
1. PINO CARRASCO ( <i>PINUS HALEPENSIS</i> ) .....	15
2. PINO SALGAREÑO ( <i>PINUS NIGRA</i> ) .....	22
3. PINO NEGRAL ( <i>PINUS PINASTER</i> ) .....	29
4. PINO SILVESTRE ( <i>PINUS SYLVESTRIS</i> ) .....	37
5. SABINA ALBAR ( <i>JUNIPERUS THURIFERA</i> ) .....	45
6. HAYA ( <i>FAGUS SYLVATICA</i> ).....	52
7. ENCINA ( <i>QUERCUS ILEX</i> ) .....	59
8. QUEJIGO ( <i>QUERCUS FAGINEA</i> ).....	65
9. MELOJO ( <i>QUERCUS PYRENAICA</i> ) .....	72
REFERENCIAS CITADAS EN LAS FICHAS.....	80
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>81</b>



## RESUMEN GENERAL

*El presente informe estudia las nueve especies que dominan los bosques de la provincia de Soria a través de los anillos de crecimiento de los árboles. En él, se recogen datos de interés como la edad de los bosques, los patrones históricos de crecimiento y el historial de manejo que han experimentado las masas forestales desde el nacimiento de sus árboles hasta nuestros días. Además, también se infiere en el control que el clima ejerce sobre el crecimiento a través de análisis estadísticos y la aplicación de modelos de crecimiento que nos permitirán entender el pasado y asentar una base sobre la que generar proyecciones futuras sobre el crecimiento que se puede esperar en el contexto de cambio climático.*

El tipo e historial de manejo son claves para comprender la dinámica de los bosques de Soria y su capacidad de adaptación al cambio climático. Destaca notablemente la diferencia entre la gestión de los pinares y el resto de los bosques. Los pinares están gestionados de un modo sistemático y ordenado, con cortas totales a final de turno seguidas de la instalación de un nuevo turno. Esto hace que la edad de los individuos de las masas sea muy homogénea y que los ajustes de su gestión, en términos de cambios de densidades o reducción de competencia sean bastante sencillos. El resto de los bosques —tanto de angiospermas como los sabinares— tienen dinámicas muy diferenciadas. Quizá, el caso más similar a los pinares sean los hayedos, donde la gestión también va más orientada a la producción de madera de cierta calidad y cuentan con un manejo más ordenado, lo que suele conllevar la corta de los individuos en un turno más o menos largo. Sin embargo, la capacidad de crecimiento del haya bajo doseles cerrados y un seguimiento de los turnos no tan estricto y sistemático como en el caso de los pinares, han permitido la aparición de individuos extremadamente longevos —más de 300 años—, lo que implica la necesidad de una gestión futura más sofisticada para permitir la coexistencia de diferentes cohortes. Los casos de los sabinares y los bosques de quercíneas son aún más complejos. Los sabinares se han gestionado históricamente como una masa abierta de uso mixto ganadero-forestal, empleando el ramón de los árboles como fuente de alimento para el ganado. Esto genera estructuras de edades muy irregulares, que junto a los procesos de cambio tras la drástica reducción de la ganadería extensiva, implica cambios en la composición y la densidad de la masa. Cualquier medida de adaptación al cambio climático requiere de una redefinición de la gestión de los sabinares. Por último, las tres quercíneas tienen situaciones muy semejantes. Se trata de bosques en los cuales el manejo en forma de monte alto es muy raro. Por el contrario, se han manejado o bien con un uso ganadero y forestal con podas por lo alto, o bien en aprovechamientos puramente forestales para la producción de leñas, con cortas por lo bajo. En el caso del monte bajo, que es la forma de uso predominante, existe una gran diferencia entre la edad de los pies —que es la de la última corta— y la edad de las raíces —que es mucho mayor. La situación actual de los bosques de quercíneas es de un cierto abandono, existiendo supresiones importantes de los pies incluso en los bosques en mejor estado estructural. En las tres especies, es necesario reajustar los bosques para que puedan ser transformados a monte alto, bien favoreciendo la regeneración, bien promoviendo la reducción de los rebrotes y su aumento de altura. En su estado actual las masas de quercíneas serán muy sensibles al cambio climático.

La disponibilidad hídrica es el principal factor que determina la variabilidad interanual del crecimiento de los árboles de este territorio. Sin embargo, tanto la intensidad, como las ventanas temporales que les afectan son muy diferentes dependiendo de la especie y de su situación geográfica. Las especies que habitan zonas más lluviosas —como los bosques de pino silvestre o los hayedos— son sensibles a las condiciones de primavera-verano, si bien las hayas responden a las condiciones del año anterior de crecimiento. En estas especies la variabilidad de las precipitaciones de invierno no tiene efecto alguno en el crecimiento, porque los inviernos prácticamente siempre son lo suficientemente húmedos como para saturar los suelos de agua, por lo que la variabilidad interanual de este parámetro es estadísticamente irrelevante. Resulta muy interesante que, en los hayedos, la defoliación por heladas tardías es el principal factor para determinar diferencias en el crecimiento interanual, muy por encima de la precipitación. Conforme el paisaje se configura con especies más mediterráneas, la respuesta a la disponibilidad hídrica aumenta, tanto en la intensidad, como en el período de sensibilidad, afectando así las precipitaciones tanto de invierno como de primavera, e incluso en algunos casos las del otoño anterior. Las señales de verano son más excepcionales y centradas en el comienzo de la estación, no porque las condiciones de verano no afecten, sino porque la mayor parte de los veranos tienden a ser siempre secos y su poca variabilidad no tiene suficiente valor estadístico. Esta variación se puede



apreciar en algunas especies, como la sabina albar o el pino salgareño, que tienen bosques muestreados en condiciones hídricas muy diferentes. Así, los bosques más septentrionales responden a períodos temporales más cortos, mostrando un impacto importante de las condiciones de primavera-verano, mientras los meridionales responden a períodos más largos. Las especies mejor adaptadas a clima mediterráneo —encina, pino carrasco— y los bosques que ocupan ambientes más secos muestran mayores dependencias a la variabilidad de precipitaciones con respuestas agregadas a períodos de tiempo más largos, que pueden superar los 10 meses, es decir, prácticamente todo el tiempo desde la anterior estación de crecimiento. No hay que confundir una mayor sensibilidad a la variación interanual de la precipitación, con una mayor sensibilidad al cambio climático. De hecho, una de las características que distingue a las especies más tolerantes a las sequías es su capacidad de soportar la alternancia de años húmedos y secos, aprovechando las condiciones de los húmedos para crecer más rápido y resistiendo a las condiciones de los secos. En el otro extremo, las especies de ambientes más húmedos —hayas y pino silvestre— tienen una resistencia muy moderada a las condiciones de sequía, lo que las hacen más sensibles a los eventos extremos de sequía que se avecinan. Dentro de una misma especie sí que se puede hacer dicha asociación, pues los bosques que tienen una mayor sensibilidad al clima, y por períodos más largos, es debido a que geográficamente se sitúan más cerca del límite ambiental de la especie.

Los modelos de Vaganov-Shashkin han funcionado razonablemente bien para casi todas las especies (salvo el haya), corroborando los resultados encontrados en las respuestas agregadas al clima. En general, lo que señalan es cómo el crecimiento de los árboles está siempre limitado por uno de los dos factores climáticos: la precipitación o la temperatura. Las zonas más altas y por tanto más húmedas —norte de Soria— son la excepción a esta situación, ya que en ellas la saturación del suelo siempre suele ser suficiente para satisfacer las demandas hídricas de los árboles. Así, en los meses más cálidos, los árboles pueden crecer sin estar limitados ninguno de estos elementos del clima. Sin embargo, es también en estos sitios donde el modelo es menos fiable, debido a que estas zonas de montaña coinciden con la distribución del haya. Para el resto de sitios y especies, el agua es siempre el factor limitante durante la estación de crecimiento, lo que revela que, en un contexto de cambio del clima asociado con disminuciones de las lluvias, el crecimiento de los árboles podría desplazarse, sobre todo, hacia los meses de primavera debido al aumento de las temperaturas. Esto, por otra parte, significaría adelantar la estación de crecimiento a expensas de los riesgos asociados a crecer de forma prematura, como pueden ser las anteriormente citadas heladas tardías, y el impacto de períodos de sequía estival más largo.

#### OBJETIVOS Y METODOLOGÍA



# Dendrocronología: el arte de medir los anillos de los árboles

La dendrocronología es una disciplina de la ciencia que trata sobre el estudio de la información recogida en los anillos de crecimiento de los árboles. Ya sean las condiciones climáticas, los efectos del envejecimiento, o el manejo de una masa, todos ellos son fenómenos que repercuten sobre la anchura del anillo, y, por tanto, pueden ser cuantificados.



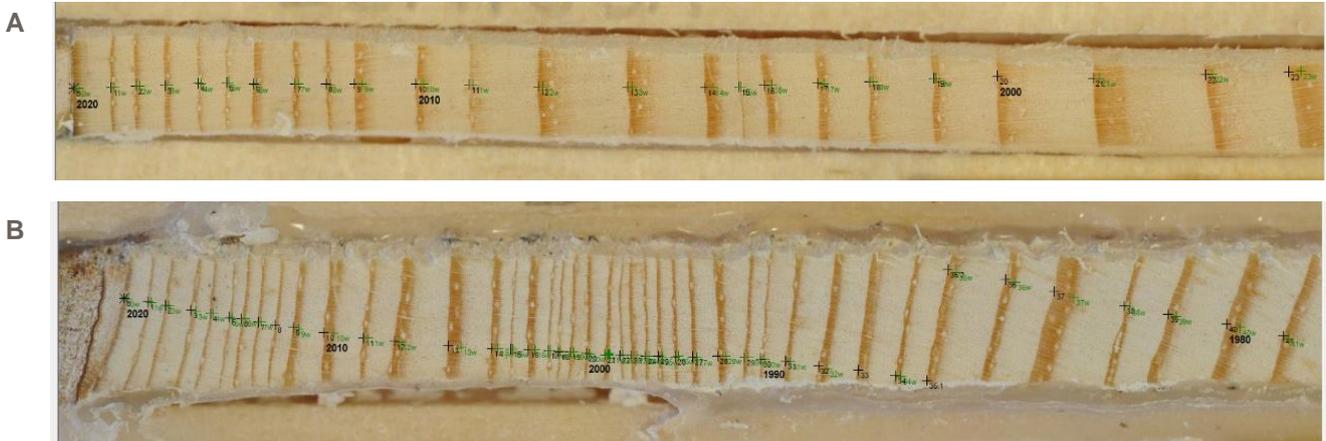
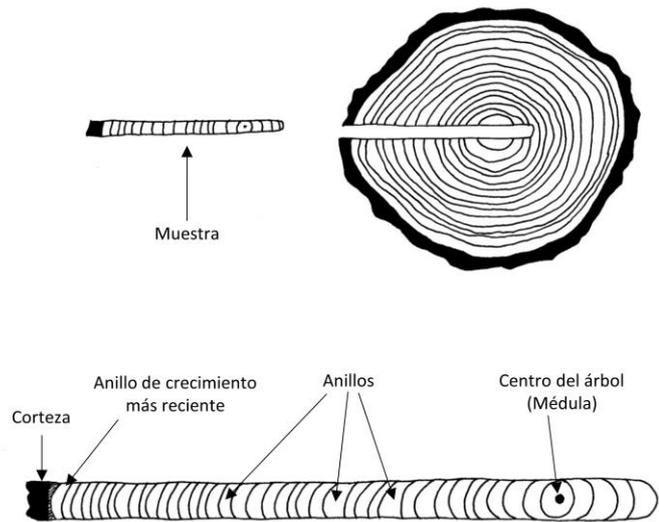
*Figura 1. Extracción de muestras dendrocronológicas con barrenas Pressler en una dehesa de fresno trasmochó. Foto de archivo: [Cambium Research Group](#).*

Este periplo comienza con la extracción representativa de un pequeño cilindro (4 - 5 mm Ø) de madera (*Fig. 1*) de los árboles con la ayuda de una barrena Pressler. Esta muestra se realiza de modo perpendicular al tronco y orientando la barrena hacia el centro del árbol. Idealmente, esta muestra de madera recogería todos los anillos de crecimiento desde que el árbol alcanzó dicha altura (*Fig. 2*). Esto permite estimar los crecimientos anuales, pero también otro tipo de información. Con objeto de asegurar recoger la variabilidad de crecimiento de un árbol y por cuestiones operativas, lo habitual es extraer dos muestras a cada árbol, cada una por una parte distinta del tronco.



**Figura 2.** Sección transversal del tronco de un árbol barrenado. Fuente: adaptado de DeYoung (2016).

Las muestras extraídas se llevan al laboratorio donde, tras secarse a temperatura ambiente, se pegan a listones de madera acanalados para facilitar su manipulación. Para facilitar la visualización y medida de los anillos, el cilindro se rebaja hasta un poco menos de la mitad del grosor inicial usando lijas de grosores progresivamente más finos. De este modo pueden identificarse las estructuras celulares de la madera. El siguiente paso consiste en la datación de los anillos, esto es, asignar a cada anillo el año del calendario correspondiente en el que se formó empezando desde el último anillo formado, que es el más cercano a la corteza. Gracias a una primera inspección visual con una lupa de laboratorio se identifican los anillos más característicos que debieran de tener en común todas las muestras de una parcela: inusualmente estrechos (ej.: años de sequías, Fig. 3a) o muy grandes (ej.: los producidos tras una liberación del crecimiento, Fig. 3b). La superficie de la muestra se digitaliza de forma automatizada con una cámara fotográfica (CaptuRING®) (García-Hidalgo et al, en revisión), y la medición de los anillos se realiza sobre dichas imágenes con el software CooRecorder (Cybis, Sweden) (Fig. 3). Cuando todos los anillos se han medido se realiza una comprobación estadística para asegurar que el grado de correlación entre las muestras es suficiente y que no hay errores asociados a anillos ausentes o falsos anillos (Holmes 1986).



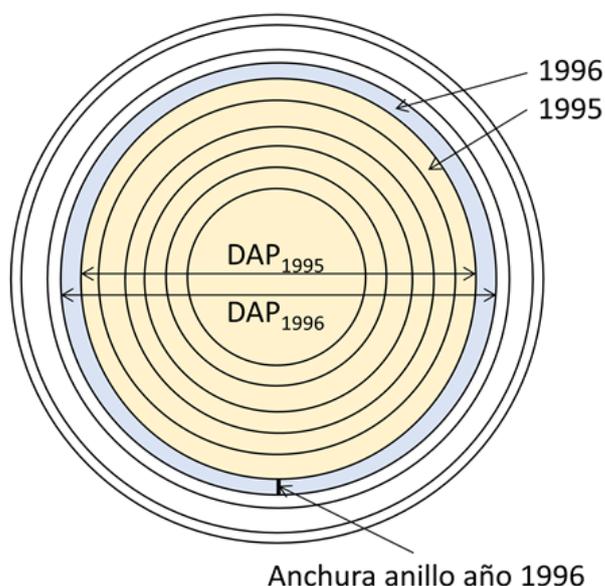
**Figura 3.** a) Anillos de crecimiento de un joven pino salgareño. El anillo número 15 corresponde con el año 2005, un año con una sequía muy común en gran parte de la Península Ibérica). b) Muestra de pino silvestre. Se aprecia una serie de anillos estrechos entre 1990 y 2005 que se corresponde con un periodo de supresión del crecimiento. Los anillos con los números 9 al 13 doblan o triplican el tamaño de los anteriores debido a una liberación del crecimiento asociada a un aclareo en la masa.

El conjunto de series de anchuras de anillos medidas en muestras de un mismo lugar y especie permite establecer un patrón de crecimiento común. Este patrón se realiza mediante una media ponderada de las muestras que se le llama comúnmente cronología. Es el punto de partida para realizar los subsiguientes análisis que nos ayudarán a vislumbrar los patrones de manejo de una masa o la influencia que el clima ejerce



sobre el crecimiento de los árboles. En el caso de las respuestas climáticas, es habitual realizar una serie de tratamientos previos en las series de crecimiento. En concreto, lo común es aplicar, primero, un modelo exponencial negativo sobre las series para eliminar el efecto de la edad debido a que los anillos tienden a estrecharse conforme la edad del árbol avanza y se alejan del centro o médula. El siguiente paso consta en aplicar un suavizado en forma de *spline* para eliminar las fluctuaciones del crecimiento debidas a las tareas de manejo o a las propias dinámicas intrínsecas de los bosques. Finalmente, se calculan los valores medios de crecimiento de cada año para formar lo que se denomina cronología media. Con ella se realizarán lo análisis de respuestas climáticas mensuales, las respuestas climáticas agregadas y los modelos de crecimiento con VS-lite.

$$AIB_{1996} = \text{Área Basal}_{1996} - \text{Área Basal}_{1995}$$



**Figura 4.** Diagrama de la sección transversal de un árbol. En el ejemplo se muestra el cálculo del AIB del año 1996

Otra medida muy utilizada para eliminar la tendencia de la edad son los incrementos de área basal (AIB). El AIB es una medida del crecimiento bidimensional ya que es una medida del aumento en superficie de un árbol. Para un año dado, el AIB es la resta del área basal del tronco de ese año y el área basal del año anterior (Fig. 4).

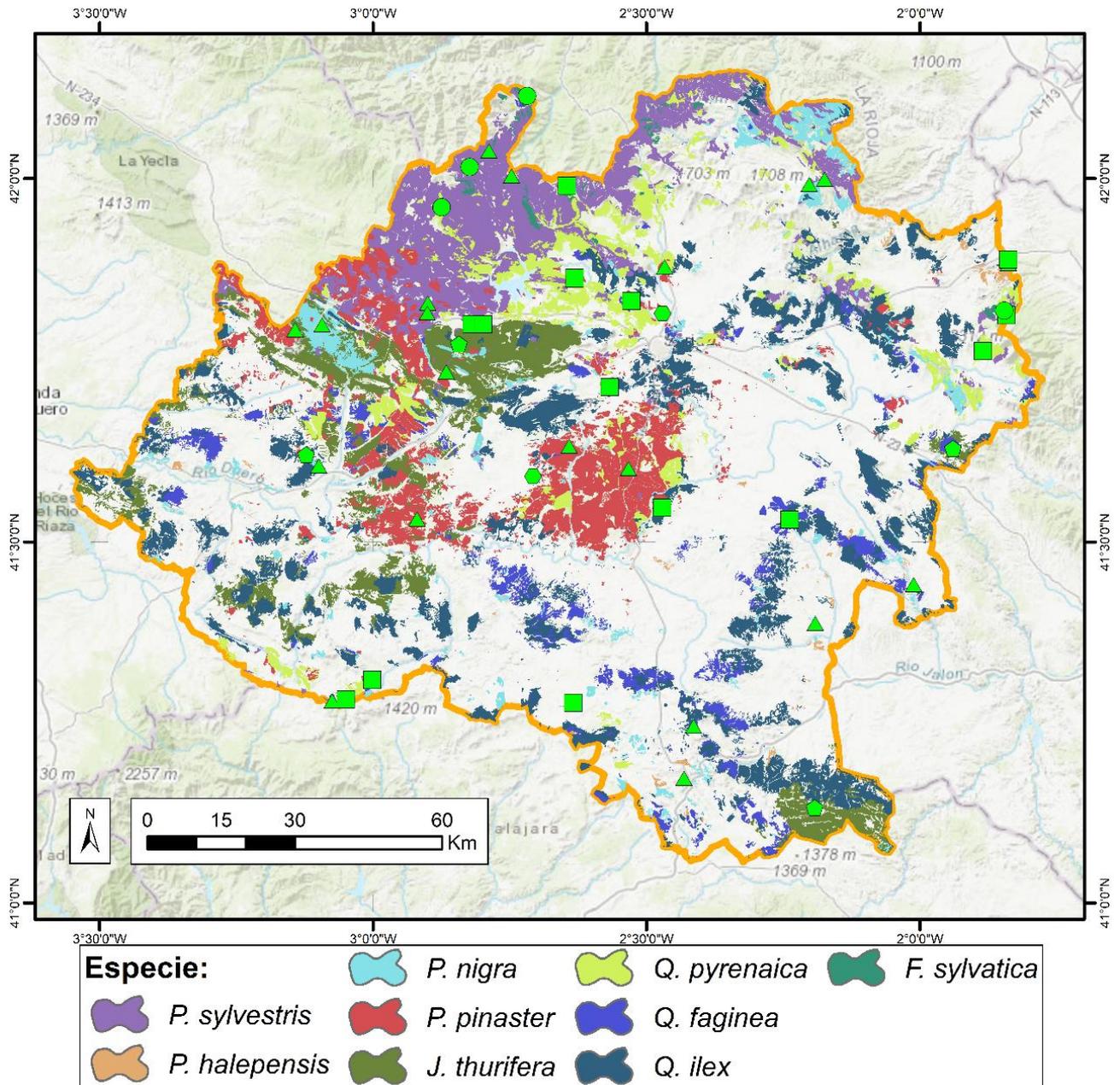


## RELACIÓN DE ESPECIES Y PARCELAS DE MUESTREO

En el muestreo se trató que las localidades reflejasen la diversidad espacial y ambiental de cada especie. Esto se hizo muestreando entre tres y seis localidades para cada una de ellas. La distribución a lo largo de la provincia no es homogénea, ya que la distribución de formaciones forestales a lo largo de la provincia no lo es. El extremo noroeste acumula la mayor parte de los bosques, y también un importante gradiente altitudinal, por lo que tanto esta zona, como la parte central de la provincia están sobrerrepresentadas. Otro criterio, de gran importancia, era la estructura de las masas forestales. Tratamos de muestrear bosques más o menos maduros, con una estructura de monte alto. Esto fue especialmente complicado en el caso de los bosques del género *Quercus*. A pesar de que forman una banda muy amplia a lo largo del reborde este y sur de la provincia, donde cubren extensiones significativas, una inmensa mayoría de estos bosques son montes bajos que se usaron para producir leña y carbón hasta el último tercio del siglo pasado. Su estructura actual es de bosques bajos muy densificados, y resulta muy complicado encontrar zonas con un suficiente nivel de madurez, lo que ha dificultado enormemente el muestreo en dichas áreas.

**Tabla 1.** Detalles del muestreo de campo: especies, parcelas y número de árboles analizados.

Especie	Nombre científico	Parcelas	Árboles analizados
Pino carrasco	<i>Pinus halepensis</i>	3	75
Pino salgareño	<i>Pinus nigra</i>	5	125
Pino negral	<i>Pinus pinaster</i>	6	150
Pino silvestre	<i>Pinus sylvestris</i>	5	125
Sabina albar	<i>Juniperus thurifera</i>	4	100
Haya	<i>Fagus sylvatica</i>	4	100
Encina	<i>Quercus ilex</i>	4	100
Quejigo	<i>Quercus faginea</i>	4	100
Melojo	<i>Quercus pyrenaica</i>	4	100



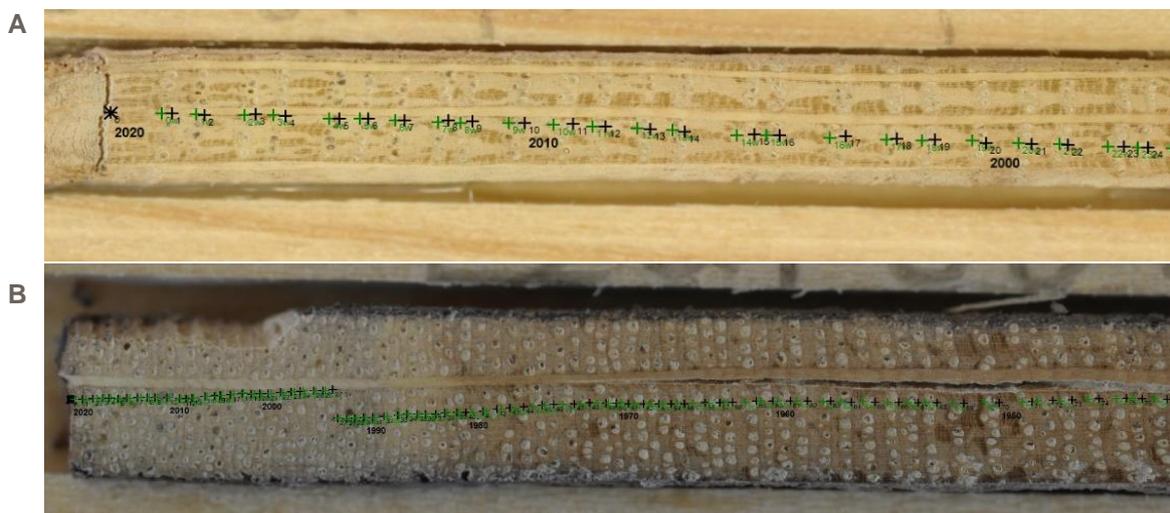
**Figura 5.** Mapa forestal de la provincia de Soria y localización de las parcelas de muestreo según la especie de interés. Triángulo: pino; cuadrado: quercíneas; círculo: haya; pentágono: sabina.



## ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

### Historial de manejo

Los anillos de crecimiento permiten inferir la historia de un bosque. Esto es debido a que los anillos de crecimiento se tornan estrechos de forma paulatina, generando supresiones cuando la densidad arbórea de un rodal aumenta y los pies empiezan a competir por la luz, los nutrientes y el agua del suelo (*Fig. 6a*). De la misma forma se considera una liberación cuando el cambio en la tendencia del crecimiento es muy brusco, generalmente debido a la eliminación de la competencia de los árboles, ya sea causada de forma natural por la muerte de los pies vecinos o por actividades de silviculturales como cortas o claras (*Fig. 6b*). En este estudio se ha inferido en estas dinámicas mediante el uso de la metodología propuesta por *Nowacki & Abrams (1997)*.



**Figura 6.** Ejemplares de quejigo con crecimiento (a) no suprimido y (b) suprimido

Para su mejor interpretación, a lo largo de las fichas de cada especie se pueden encontrar figuras que recopilan los cambios en las tendencias del crecimiento como se muestra en el ejemplo de más abajo (*Fig. 7*). En este ejemplo se observa un proceso de supresión del crecimiento en casi la totalidad de la masa a partir de 1975 hasta principios de los noventa, momento en el que, posiblemente, una actuación silvícola retiró parte de los pies. Esto derivó en un proceso de expansión en el crecimiento constante hasta más o menos el comienzo del siglo XXI cuando la masa vuelve a experimentar una densificación hasta la actualidad.

**Figura 7.** Dinámicas de forestales en la parcela de Tarazona (pino carrasco). La figura muestra para cada año el porcentaje de árboles con liberación (línea azul, eje vertical izquierdo) o supresión en el crecimiento (línea ocre, eje vertical izquierdo) con respecto al total de las muestras extraídas en la parcela (línea negra, eje vertical derecho).



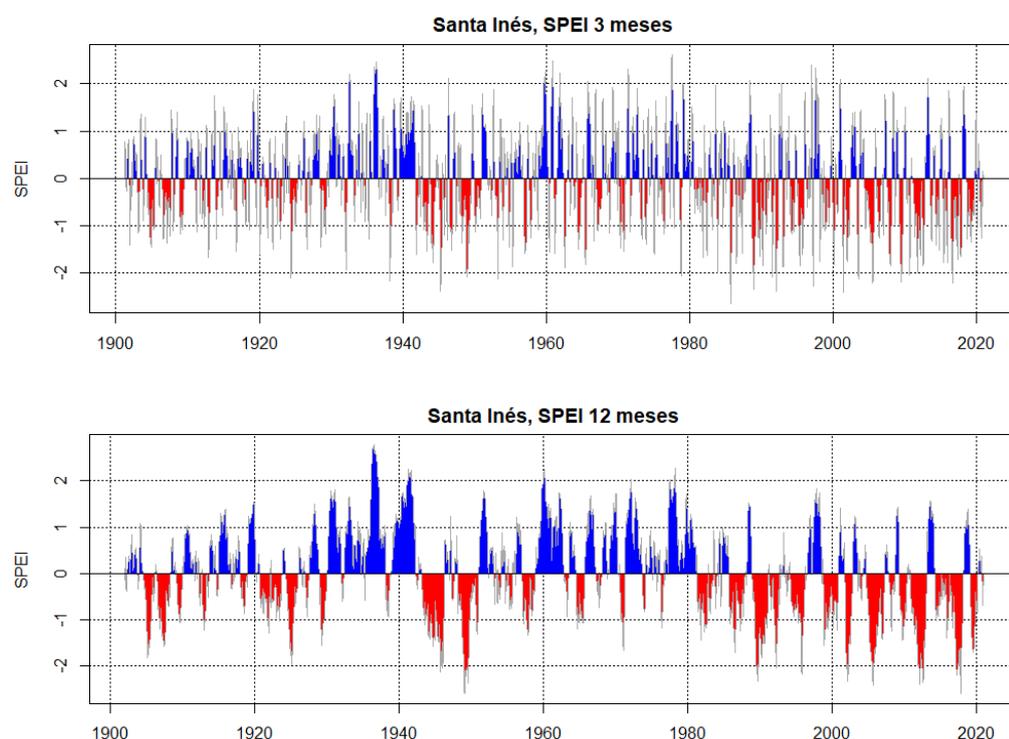


## Correlaciones crecimiento-clima

El set de datos climáticos utilizado ha sido CRU TS v4.05 (*Climate Research Unit, University of East Anglia*) (*Harris et al. 2020*), y está comprendido de observaciones medias mensuales de precipitación y temperaturas máxima y mínima entre otros. Estos datos están configurados en un formato de rejilla con una resolución de 55 km de lado y están disponibles para el periodo de años 1901 – 2020. Sin embargo, en estas fichas las relaciones crecimiento clima se han acotado al periodo 1950 – 2020 debido a que los datos anteriores a 1950 son de escasa fiabilidad en algunas partes de la Península Ibérica, como en la provincia de Soria, ya que las estaciones meteorológicas disponibles para el modelo en dicho periodo para la Península Ibérica eran escasas.

## Respuestas agregadas al clima: el índice de sequía SPEI

La división del año en meses es un constructo sociocultural que no tiene por qué corresponderse con las escalas temporales de la naturaleza. Por otra parte, a menudo es complejo desligar el efecto de la temperatura del de la precipitación, ya que la demanda evapotranspirativa de los árboles está fuertemente ligada a la humedad ambiental, que es un parámetro que engloba tanto a la precipitación como a la temperatura. En este sentido las temperaturas elevadas reducen la humedad relativa del aire incrementando así el gradiente de potencial hídrico entre la atmósfera y el suelo. Para atajar este inconveniente se han desarrollado índices de sequía que evalúan el efecto conjunto de la temperatura y la precipitación a través del cálculo de la demanda evapotranspirativa, y que además pueden desarrollarse a diferentes escalas temporales. De entre ellos, el SPEI (*Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*), desarrollado por Sergio Vicente y otros colaboradores del IPE-CSIC (*Vicente-Serrano et al. 2010*), es una de las métricas más utilizadas para detectar el efecto de la demanda evapotranspirativa.



**Figura 8.** Valores de SPEI mensuales calculados con un efecto acumulado de 3 meses (arriba) y 12 meses (abajo) en la localidad de Santa Inés, Soria. Las áreas azules muestran periodos húmedos y las rojas los secos

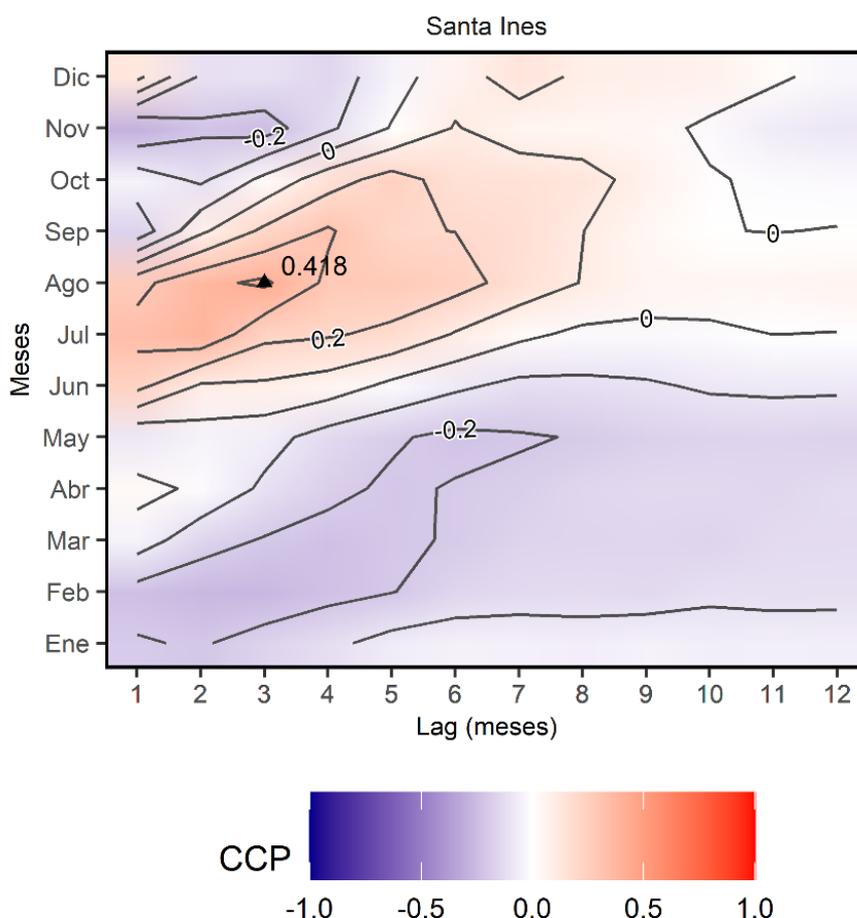
El SPEI es un índice que oscila en torno a un valor medio, representado por el número 0, de modo que los meses más húmedos serán los valores positivos mientras que los más secos los negativos (*Fig. 8*). El efecto del SPEI en el crecimiento de los

árboles se evalúa analizando la respuesta de la cronología de crecimiento en los distintos valores de SPEI calculados con diferentes escalas temporales (*lag*). Modificando el mes de inicio del efecto y la duración temporal del efecto se logra obtener una matriz de valores de SPEI que se correlaciona con la cronología.



Generalmente este resultado se grafica con un mapa de calor o *heatmap* con isóneas que representan el grado de correlación (coeficiente de correlación de Pearson, CCP) entre zonas de igual intensidad del efecto (Fig. 9). Finalmente, el momento de máxima señal se indica con un punto y su correspondiente valor de correlación.

**Figura 9.** Mapa de calor con las correlaciones (CCP) entre el crecimiento de *Pinus sylvestris* y el SPEI calculado con lags de 1 a 12 meses en Santa Inés. En este caso la máxima correlación (triángulo negro) se obtiene con el SPEI de agosto calculado con un lag de 3 meses (de junio hasta agosto).



## Modelización del crecimiento con VS-Lite

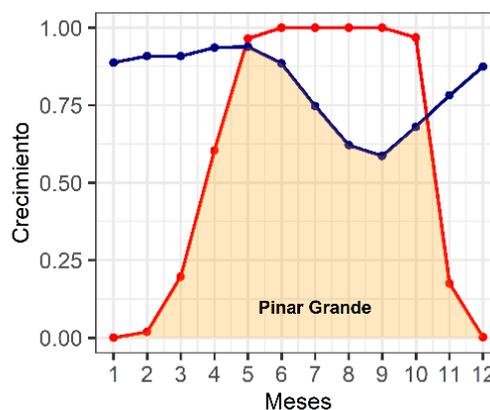
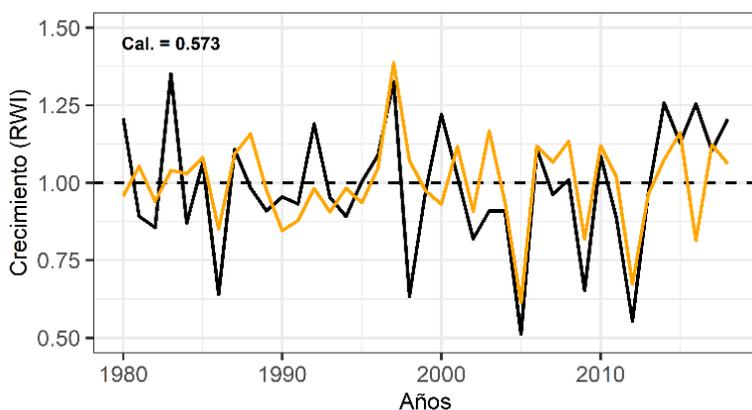
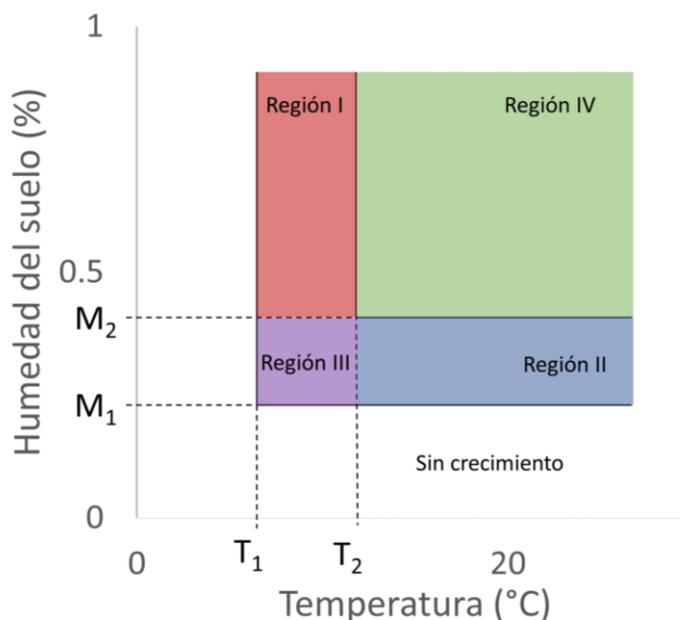
Las correlaciones entre el clima y el crecimiento de los árboles se realizan asumiendo una serie de supuestos. Una de esas suposiciones establece que esa relación es estable en el tiempo, es decir, que durante todo el periodo de tiempo evaluado un árbol siempre va a responder de la misma forma a un elemento del clima (temperatura, precipitación...). Sin embargo, cuando evaluamos la influencia del clima en periodos temporales muy amplios, del orden de decenas de años, es muy probable que las respuestas del crecimiento se desplacen en el tiempo, pudiendo adelantarse o retrasarse, o simplemente aumentando su señal (o perdiéndola inclusive). Para evitar esta limitación se utilizan modelos de crecimiento basados en procesos como el modelo Vaganov-Shashkin-lite o *VS-Lite* (Vaganov et al. 2006, Tolwinski-Ward et al. 2011). Este modelo simula un crecimiento de anillos para cada año basado en las respuestas del crecimiento a la temperatura ( $gT$ ) y humedad del suelo ( $gM$ ) que se modulan por la cantidad de insolación mensual que se recibe en una localización dada ( $gE$ ). Para su funcionamiento, VS-Lite solamente necesita cuatro parámetros: los valores de temperatura y humedad umbral bajo los cuales el crecimiento de un árbol no ocurre ( $T_1$  y  $M_1$ ),



y los umbrales superiores de temperatura y humedad a partir de los cuales el crecimiento de un árbol no se ve limitado por estas condiciones climáticas ( $T_2$  y  $M_2$ ) (Fig. 10). Para la elección de estos parámetros se calculan tantos modelos VS-Lite como combinaciones de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $M_1$  y  $M_2$  posibles, y después, los crecimientos simulados obtenidos se correlacionan con los crecimientos reales, de forma que los mejores parámetros serán aquellos que generen los crecimientos simulados que mayor correlación tengan con los crecimientos reales (Fig. 11).

**Figura 10.** Marco teórico del modelo VS-Lite en el que se muestran las distintas regiones en las que un árbol puede experimentar crecimiento. Regiones: I, crecimiento limitado por la temperatura; II, crecimiento limitado por la humedad del suelo; III, crecimiento limitado por ambos factores; IV, crecimiento no limitado por el clima.

Una vez que el modelo está calibrado se puede conocer de qué forma han crecido los árboles en función de las condiciones climáticas de un sitio aplicando la teoría de los factores limitantes, que establece que un árbol puede crecer tanto como le permita el factor limitante del entorno más restrictivo: temperatura o humedad (Fig. 11). De la misma manera, si proporcionamos proyecciones climáticas a un modelo calibrado podemos conocer si el crecimiento de los árboles va a aumentar o disminuir. También podremos visualizar si el periodo de crecimiento se va a adelantar o alargar a lo largo del año, o si va a verse más limitado durante los periodos estivales (Fig. 11).



**Figura 11.** Izquierda: comparación del crecimiento simulado con el modelo VS-Lite (línea naranja) y el crecimiento real (línea negra) en la parcela de muestreo de Pinar Grande. Derecha: visualización de la respuesta del crecimiento al clima (rojo: temperatura, azul: humedad del suelo). Se puede observar cómo el crecimiento se produce en todos los meses limitado por la temperatura o la humedad (área anaranjada).



## REFERENCIAS CITADAS EN LA METODOLOGÍA

- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific data*, 7(1), 1-18.
- Holmes, R. L. (1986). Quality control of crossdating and measuring. User's manual for computer program COFECHA. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin.
- Joan DeYoung (2016). Forest Measurements: An Applied Approach. Open Oregon Educational Resources.
- Nowacki, G. J., & Abrams, M. D. (1997). Radial- growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement- origin oaks. *Ecological monographs*, 67(2), 225-249.
- Tolwinski-Ward, S. E., Evans, M. N., Hughes, M. K., & Anchukaitis, K. J. (2011). An efficient forward model of the climate controls on interannual variation in tree-ring width. *Climate Dynamics*, 36(11), 2419-2439.
- Vaganov, E. A., Hughes, M. K., & Shashkin, A. V. (2006). Growth dynamics of conifer tree rings: images of past and future environments (Vol. 183). Springer Science & Business Media.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.



# FICHAS DE LAS ESPECIES

## PINO CARRASCO (*Pinus halepensis*)

### Resumen

El pino carrasco es una especie muy poco habitual en la provincia de Soria. De hecho, todas las poblaciones que existen en la actualidad son fruto de repoblaciones relativamente recientes, en zonas próximas al Valle del Ebro, que hasta ahora han sufrido poco o ningún manejo. El motivo de esta ausencia son las condiciones ambientales húmedas del territorio, consecuencia de la elevada altitud de la provincia, lo que ha determinado que se hayan plantado otras especies de pino más afines a este clima. Sin embargo, hemos hecho un esfuerzo por muestrear algunas de las poblaciones presentes porque en un contexto climático más árido y cálido es esperable que el área de distribución del pino carrasco se expanda con mayor profusión por la provincia. Los crecimientos de esta especie son los más modestos entre todos los pinos, muy probablemente debido a que crecen en las zonas más limitadas por las precipitaciones y con una sequía estival más larga. Se trata de una especie netamente mediterránea capaz de tolerar períodos largos de sequía, pero a la vez capaz de detener y activar el crecimiento secundario en función de la disponibilidad hídrica. Esto queda reflejado en la fuerte señal climática del crecimiento, con una respuesta mucho más elevada al balance hídrico acumulado por períodos largos (7 a 9 meses) que a los datos de períodos puntuales. Esta fuerte dependencia de las condiciones hídricas se manifiesta de un modo notable en los modelos de crecimiento que se ajustan muy bien en esta especie y que quedan definidos fundamentalmente por las condiciones hídricas. En un contexto de aumento de temperaturas el pino carrasco podría aumentar su área de distribución, siendo una especie muy adecuada para aprovechar las precipitaciones, por lo que podría expandirse notablemente en la provincia de Soria.



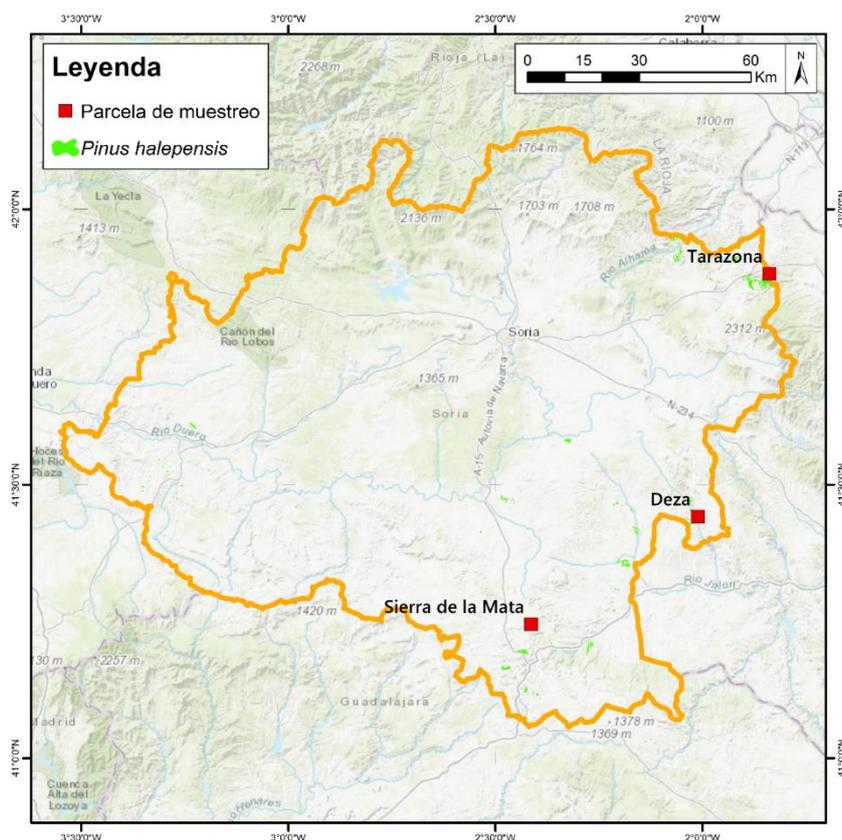
**Figura 1.1.** Distribución mundial del pino carrasco. Fuente: Wikipedia

### Contexto de la especie

El pino carrasco ocupa en la actualidad una posición muy marginal en la provincia de Soria apareciendo únicamente en los territorios de menor altitud y, en todos los casos, en forma de repoblaciones forestales. A pesar de su escasez y de la dificultad de encontrar parcelas de muestreo, hemos trabajado con esta especie debido a que sus características de gran tolerancia a la sequía estival sugieren que pudiera ser un taxón mucho más abundante en un escenario futuro de calentamiento global.



El pino carrasco es la especie ibérica de pino más tolerante a la sequía estival, con una gran capacidad de recuperación tras sequías intensas y recurrentes. Por otra parte, es capaz de detener y reactivar su crecimiento varias veces durante el período de crecimiento para aprovechar las lluvias de las tormentas de verano (Camarero et al. 2010). Además, combina esta característica con un cierto grado de tolerancia a las heladas invernales lo que le permite extenderse desde climas suaves como los de las Islas Baleares o la costa catalana hasta climas continentales como el Valle del Ebro, si bien las temperaturas muy bajas como las de la mayor parte de la provincia de Soria podrían ser un limitante (Trabaud et al. 1985). Estas características le permiten distribirse por los países ribereños del oeste Mediterráneo (Fig. 1.1), aunque la mayor extensión se



encuentra en la Península Ibérica. En su distribución también es relevante su querencia por los sustratos básicos pudiendo establecerse tanto sobre calizas duras como sobre materiales yesosos fácilmente erosionables. En otros aspectos del sustrato es muy indiferente. Su capacidad de liberar las semillas tras los incendios, reclutando de modo masivo, es otro aspecto que también hace suponer una ventaja en el contexto futuro con el clima más seco y donde se prevé un aumento en la frecuencia e intensidad de los incendios en la Meseta Norte.

**Figura 1.2.** Distribución del pino carrasco y las parcelas de muestreo en la provincia de Soria.

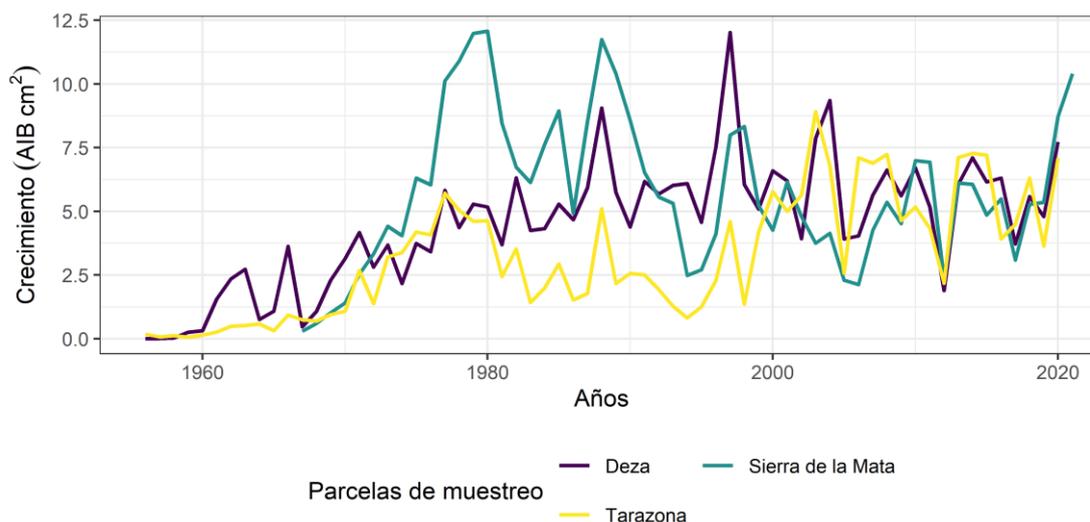
Estas características de tolerancia a la sequía y alta resiliencia frente a los incendios van acompañadas sin embargo de una menor productividad. Sus portes son más reducidos que los de otros pinos, siendo además su madera menor cotizada en el mercado. Por esto, el remplazamiento de bosques de otros pinos por pinares de carrasco puede suponer una pérdida en los productos que se obtienen a partir del bosque.

## Selección de las parcelas y características

El muestreo de pinares dominados por el carrasco ha estado muy limitado por la reducida presencia de estas masas en la provincia de Soria (Fig. 1.2) y por la juventud de la mayoría de las mismas. Sin embargo, hemos sido capaces de encontrar tres zonas de pino carrasco con unas edades medias que rondan los 50 años



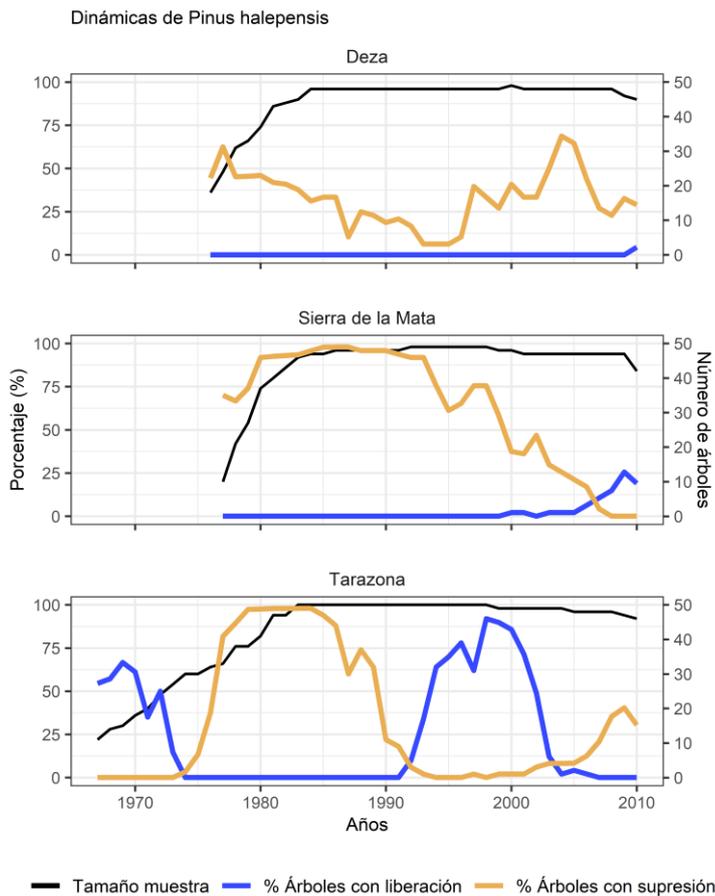
(Tabla 1.1). Las tres parcelas se sitúan en la parte oriental de la provincia: la zona del Moncayo en una localidad rayana con Aragón, la comarca de Deza y la zona sudoriental de la provincia. Esto es coherente por



la preferencia de esta especie por ambientes más xéricos y cálidos.

Los crecimientos de los pinos carrascos son de los más modestos entre los pinos (Fig. 1.3). Más allá de su menor crecimiento y tamaño radial, estos pinos tienen una altura menor, lo que acrecienta la diferencia entre el crecimiento volumétrico de esta y otras especies de pino. Una cuestión relevante es la fuerte variabilidad interanual en el crecimiento (Fig. 1.3), un elemento que se aprecia en la mayor parte de las especies mediterráneas con capacidad de aprovechar los pulsos asociados a los años con más precipitaciones.

**Figura 1.3.** Evolución del crecimiento medio (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo



La mayor parte de estos bosques surgen de un establecimiento simultaneo y masivo, algo común entre los pinos, ya que necesitan cierto grado de luz para crecer en sus primeros estadios. Por esta razón, además, se aprecia una supresión del crecimiento conforme los árboles de la masa aumentan de tamaño y empiezan a competir por la luz y el agua y nutrientes del suelo (Fig. 1.4). Solo la parcela de Tarazona muestra alguna diferencia probablemente por la presencia previa de algunos pinos, de una masa anterior, y porque se ha realizado una actuación silvícola intermedia que se aprecia en forma de liberación del crecimiento. Al margen de las actividades de manejo los crecimientos son muy semejantes en las diferentes parcelas.

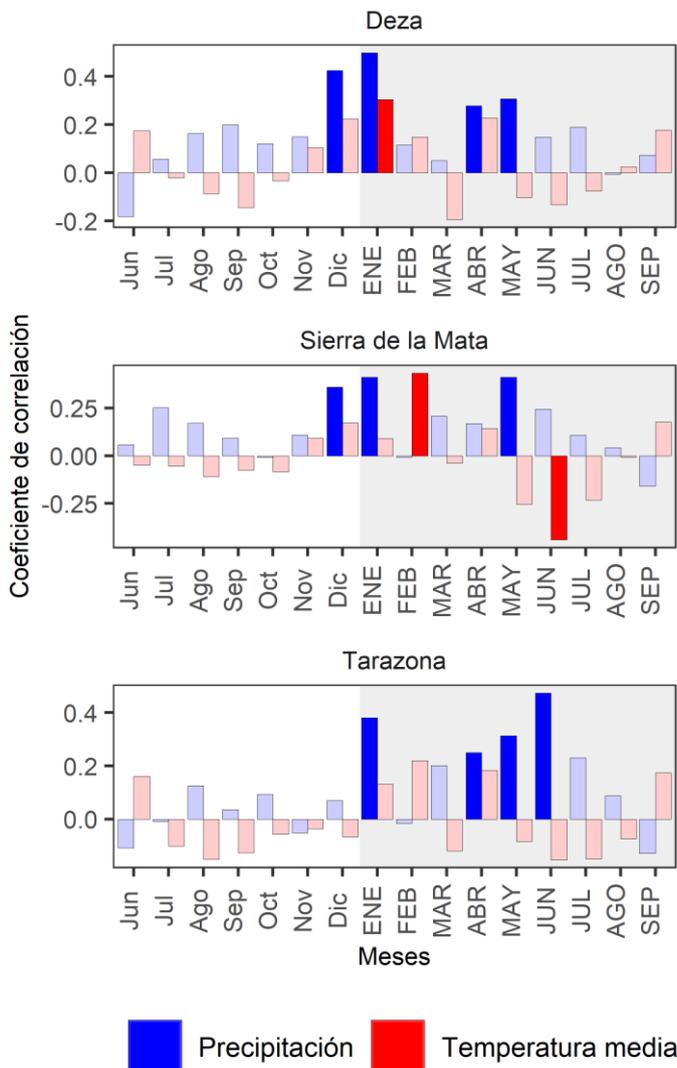
**Figura 1.4.** Liberaciones y supresiones del crecimiento asociadas a las parcelas de muestreo del pino carrasco



## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

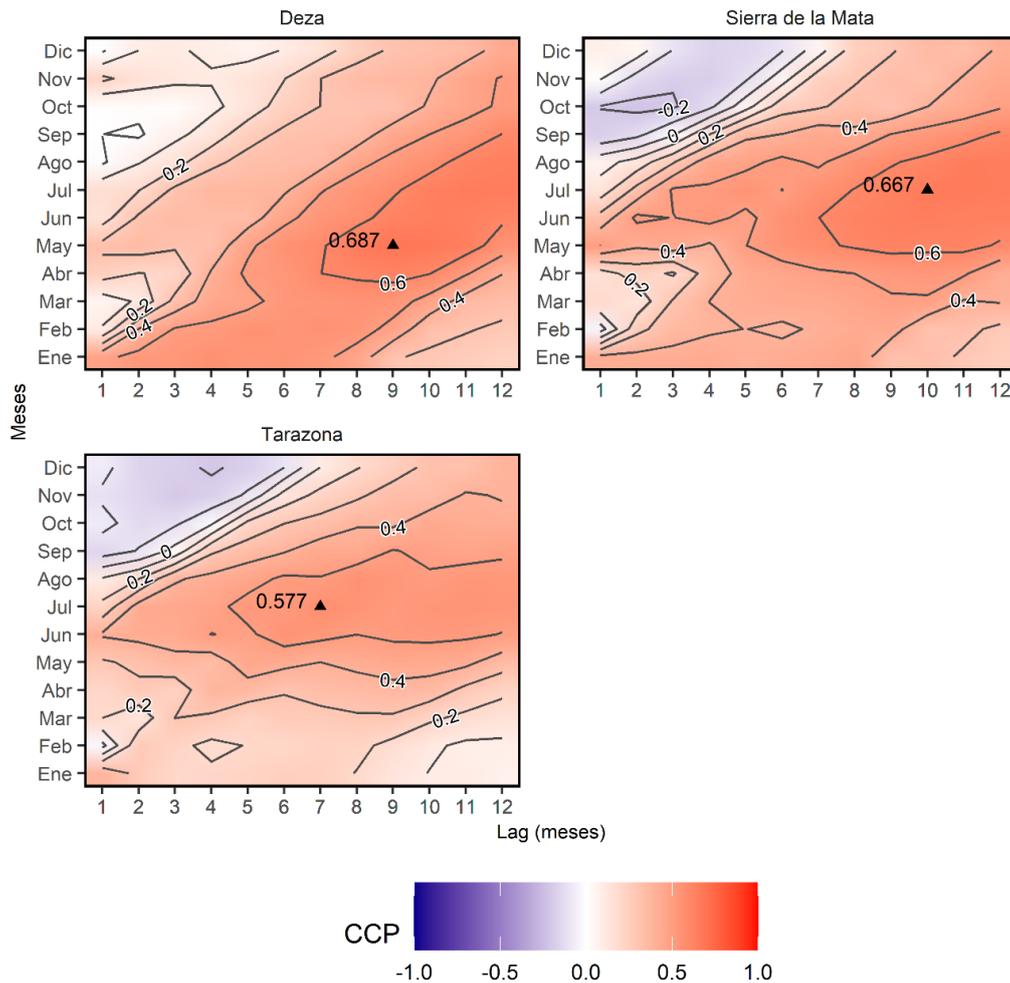
Las correlaciones crecimiento-clima para el pino carrasco reflejan que la limitación hídrica es el condicionante climático más importante de la especie (Fig. 1.5). Las tres localidades muestran una dependencia a las precipitaciones desde el invierno hasta el final de la primavera. Esta señal comienza en diciembre-enero y se extiende hasta mayo-junio, si bien no todos los meses tienen correlaciones significativas. De estos análisis se vislumbra la necesidad de precipitaciones abundantes para poder saturar el suelo durante invierno-primavera y así impulsar el crecimiento de estos árboles durante un período más largo. Las señales de los meses individuales son muy importantes en algunos casos ( $r > 0.4$ ). La temperatura por el contrario tiene señales muy reducidas, siendo negativa en junio en Sierra de la Mata. Esto sugiere un efecto de la temperatura sobre el balance hídrico de la especie en el comienzo del verano a través de un impacto sobre la evapotranspiración. Por otra parte, las señales positivas de la temperatura invernal son comunes en los pinos ibéricos y podrían estar relacionadas con el efecto negativo de los inviernos muy fríos.



**Figura 1.5.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejas correlaciones estadísticamente significativas. Los meses están divididos en meses pertenecientes al mismo año de crecimiento (letras mayúsculas; área gris) y en meses del año anterior al año de crecimiento (letras minúsculas; área blanca)

### Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI

La gran limitación hídrica que padecen los pinos carrascos se manifiesta de un modo muy notable en los mapas de calor de las respuestas al SPEI. En las tres localidades tienen valores muy altos que oscilan desde  $r = 0.57$  a  $r = 0.68$  (Fig. 1.6). Estos pinos funcionan como auténticos higrómetros con señales temporales que muestran picos en Julio (Sierra de la Mata y Tarazona) o mayo (Deza) y acumulaciones temporales extremadamente largas, desde 7 meses en Tarazona (enero-julio) hasta 10 meses (octubre-julio) en Sierra de la Mata. Sin embargo, esta mayor correlación con el índice de sequía no implica un mayor estrés hídrico como ocurre en otras especies templadas acostumbradas a una menor frecuencia de sequías, sino un umbral más alto de tolerancia a la sequía. Esto es, su capacidad de tolerar climas más xéricos.



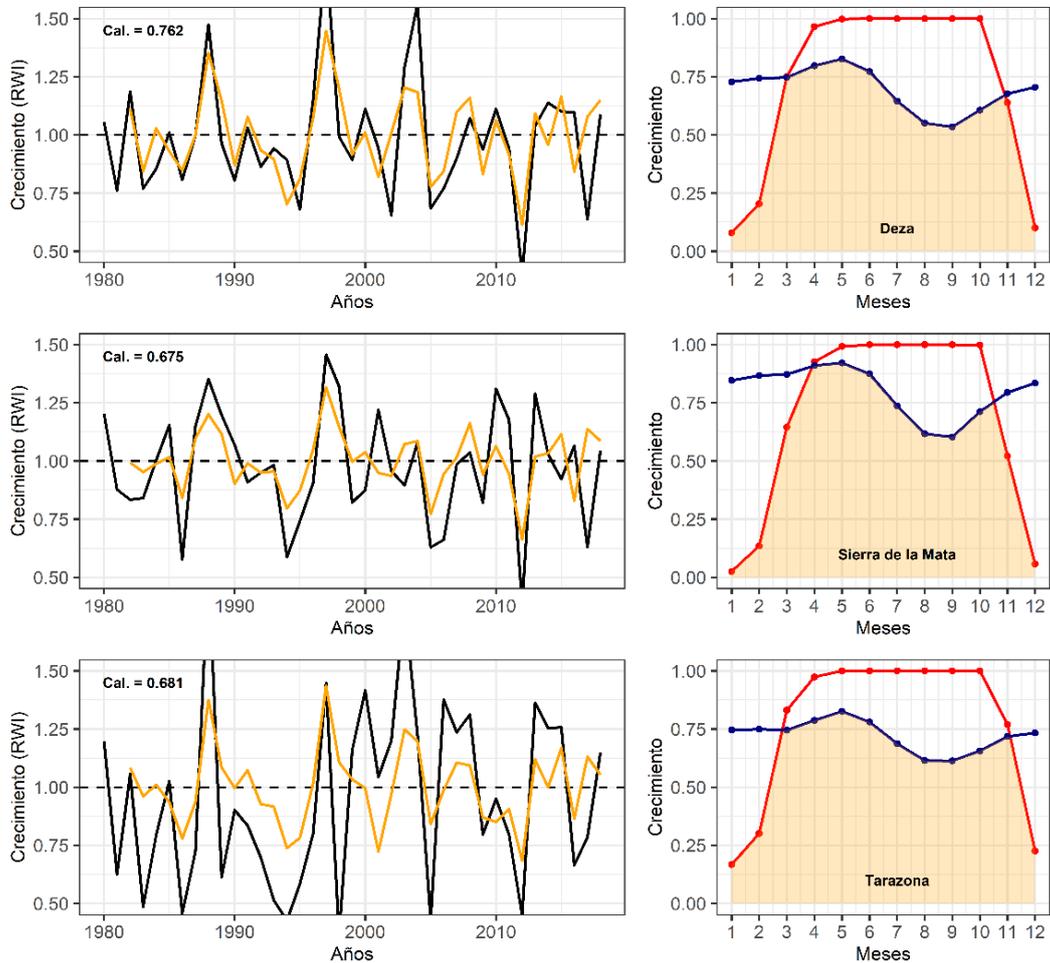
**Figura 1.6.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad.

### Modelos de crecimiento

Los modelos de Vaganov-Shashkin son también muy satisfactorios en cuanto a su ajuste al crecimiento real. Presenta niveles de varianza explicada muy satisfactorios, del 45 al 58%, si bien la respuesta de la especie es más extrema en la realidad que en los modelos observados, con una gran variabilidad y numerosos años con valores extremos (Fig. 1.7). Se observa un predominio de las limitaciones térmicas de marzo a abril sin alcanzarse temperaturas óptimas hasta mayo (subóptimas en abril) de modo similar al resto de las especies. Esta sincronía demuestra una relación estrecha entre las temperaturas de gran parte de la provincia debido a una combinación de la altitud y las condiciones de continentalidad. Las condiciones climáticas óptimas duran hasta finales de octubre. La disponibilidad hídrica por otra parte, como era de esperar, es muy limitada en los pinares de pino carrasco.



No hay ningún momento del año en el que las condiciones hídricas sean óptimas, lo que explica la necesidad de que las precipitaciones invernales y primaverales se acumulen para saturar los suelos. Las mejores condiciones para el crecimiento ocurren entre abril y junio, con la salvedad del periodo de sequía estival, que es patente a partir de julio hasta casi octubre sin que se aprecie una recuperación del crecimiento importante.



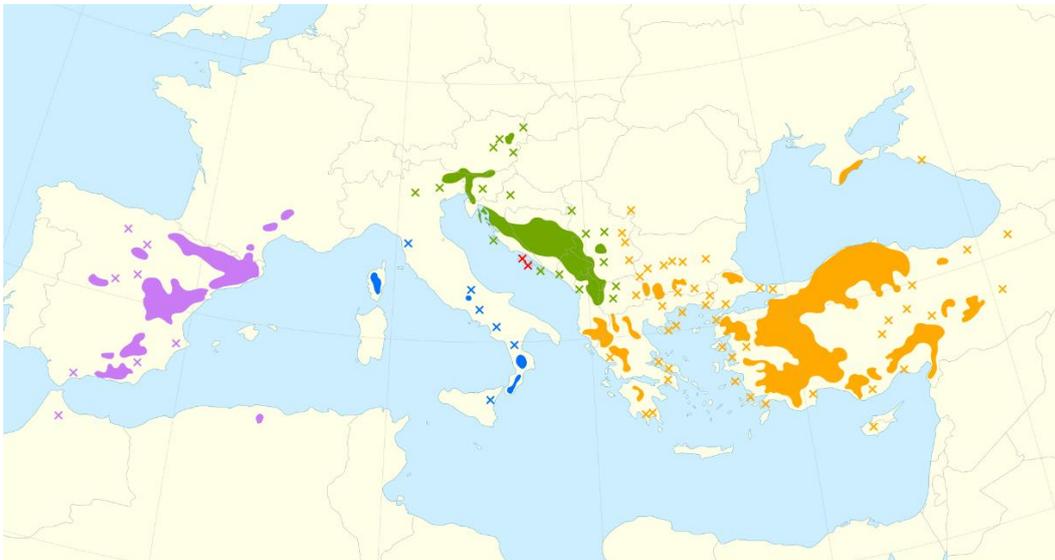
**Figura 1.7.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).



## 1. PINO SALGAREÑO (*Pinus nigra*)

### Resumen

El pino salgareño (*Pinus nigra*) es una especie común en los ambientes montañosos mediterráneos con cierta humedad. Su clasificación taxonómica es algo compleja, con diferentes subespecies y variedades, siendo la subespecie *salzmannii* la propia de la Península Ibérica. Esta especie se ha usado mucho en repoblaciones, generalmente con subespecies y variedades foráneas. En la provincia de Soria la mayor parte de los pinares son repoblaciones, quedando solo algunas las poblaciones autóctonas en las inmediaciones del Cañón de Río Lobos. Se trata de una especie de aptitud calcícola y de montaña mediterránea por lo que tolera moderadamente las sequías estivales, creciendo bien en la mayor parte de la provincia. Es una especie muy susceptible a la procesionaria del pino, lo que repercute en su crecimiento. Se han muestreado las principales poblaciones de la provincia, observándose unos crecimientos moderados y sincrónicos debido a su manejo en poblaciones coetáneas. La respuesta al clima depende mucho de las zonas en que se encuentra el pinar. Las poblaciones más meridionales responden a períodos más largos con gran importancia de las lluvias de invierno, mientras que las más septentrionales al encontrarse en zonas más lluviosas responden fundamentalmente a las condiciones de primavera. En todas ellas las señales climáticas tienen un efecto muy importante en el crecimiento, y los modelos Vaganov-Sahshkin son buenos para todas las poblaciones, salvo en El Vallejo. Al haberse plantado en una zona tan amplia, el pino salgareño ejemplifica cómo climas más cálidos y secos incrementan notablemente la sensibilidad del crecimiento a precipitaciones que ocurren en los períodos de otoño-invierno, debido a la necesidad de que los suelos se rellenen de agua durante el período de menor actividad vegetativa, algo que se espera en la mayor parte de las especies mediterráneas como consecuencia del cambio climático.



**Figura 2.1.** Rango de distribución de las subespecies de *Pinus nigra*. La subespecie *salzmannii* se muestra de color morado. Fuente: Wikipedia.

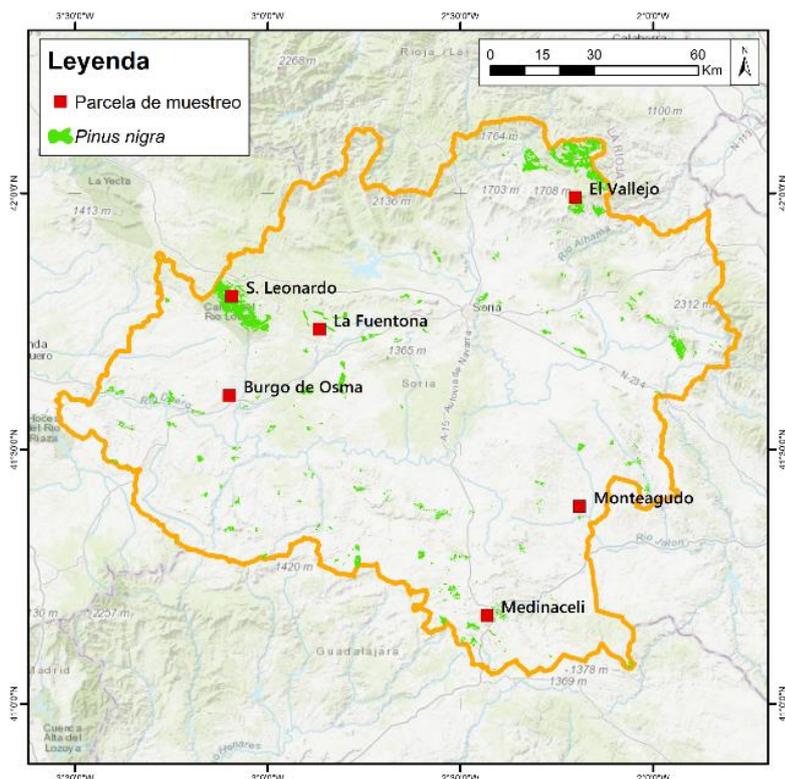


Figura 2.2. Parcelas de muestreo y distribución del pino salgareño en la provincia de Soria.

## Contexto de la especie

El pino salgareño es una especie mediterránea de montaña, por lo que combina una cierta necesidad de humedad estival con muy buenas tolerancias al frío y a los ambientes continentales. Esto lo sitúa generalmente ocupando áreas donde el pino silvestre con mayores requerimientos de precipitación se encuentra más limitado. Otro aspecto muy relevante de esta especie es su preferencia por ambientes basófilos, lo que evita que comparta territorio con el pino negral, algo más tolerante a la sequía y ligado a ambientes acidófilos.

El pino salgareño muestra poblaciones distribuidas en montañas de la cuenca norte del Mediterráneo, con alguna

población en las montañas del Magreb. No obstante, en el pasado, su abundancia en esos terrenos y su distribución fue más amplia según muestran los registros paleobotánicos que describen una mayor dominancia de especies pináceas en la península ibérica ([García-Amorena et al. 2011](#)). Además, su distribución asociada a contextos montañosos ha permitido una diferenciación local que tiene como consecuencia una taxonomía compleja, si bien la mayor complicación se refiere al status taxonómico de las diferentes poblaciones. No existe un consenso sobre el número de subespecies ([Olsson et al. 2020](#)) habiendo propuestas que van desde las cinco o incluso seis subespecies, a otras más restrictivas que lo reducen a dos subespecies con diferentes variedades ([Fig. 2.1](#)). Esta propuesta delimita una población oriental (subsp. *nigra*) y otra occidental de Francia, Italia, España con poblaciones dispersas en el norte de África (subsp. *salzmanii*), con una serie de variedades para cada subespecie. En principio, estos taxones tienen distribuciones geográficas bien diferenciadas, por lo que en la Península Ibérica sólo existe de modo natural una subespecie y una variedad. Sin embargo, esta situación original se ha visto alterada por el hecho de que en muchas de las repoblaciones ibéricas se haya utilizado material genético de la subespecie *Pinus nigra* subsp. *nigra*, por lo que conviven poblaciones autóctonas con reforestaciones de características genéticas bastante diferenciadas.

Desde el punto de vista económico, su aprovechamiento se centra en su madera que es de buena calidad. Por ello se ha usado para construcción y también para la obtención de postes. Un aspecto muy relevante para esta especie es su gran susceptibilidad a sufrir las defoliaciones de la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*). Las orugas de esta especie forman bolsones en las ramas, que, si bien afectan a todas las especies de pinos mediterráneos, muestra unos mayores niveles de afección en los bosques de pino salgareño, especialmente en las repoblaciones. Su incidencia podría aumentar como consecuencia del cambio climático ya que las orugas son muy sensibles a las temperaturas frías.

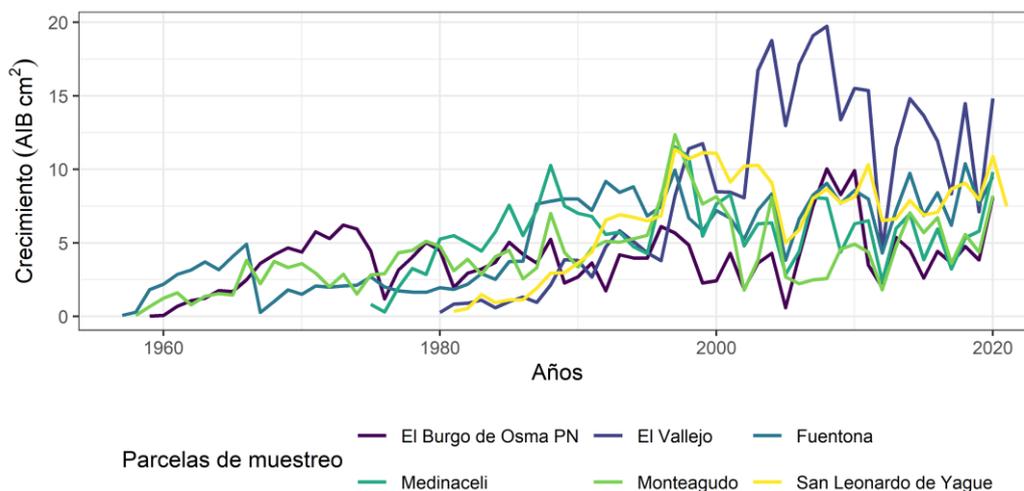


**Tabla 2.1.** Tabla de las características de las parcelas de muestreo de la sabina albar.

Localidad	Altitud (m)	Edad media	Árbol más joven	Árbol más viejo
El Burgo de Osma	1020	55,7	51 (1970)	62 (1959)
El Vallejo	1195	34	27 (1994)	34 (1987)
La Fuentona	1073	43	25 (1996)	64 (1957)
Medinaceli	1156	40,9	23 (1998)	46 (1975)
Monteagudo	849	55,3	42 (1979)	63 (1958)
San Leonardo	1093	34,9	30 (1991)	40 (1981)

## Selección de las parcelas y características

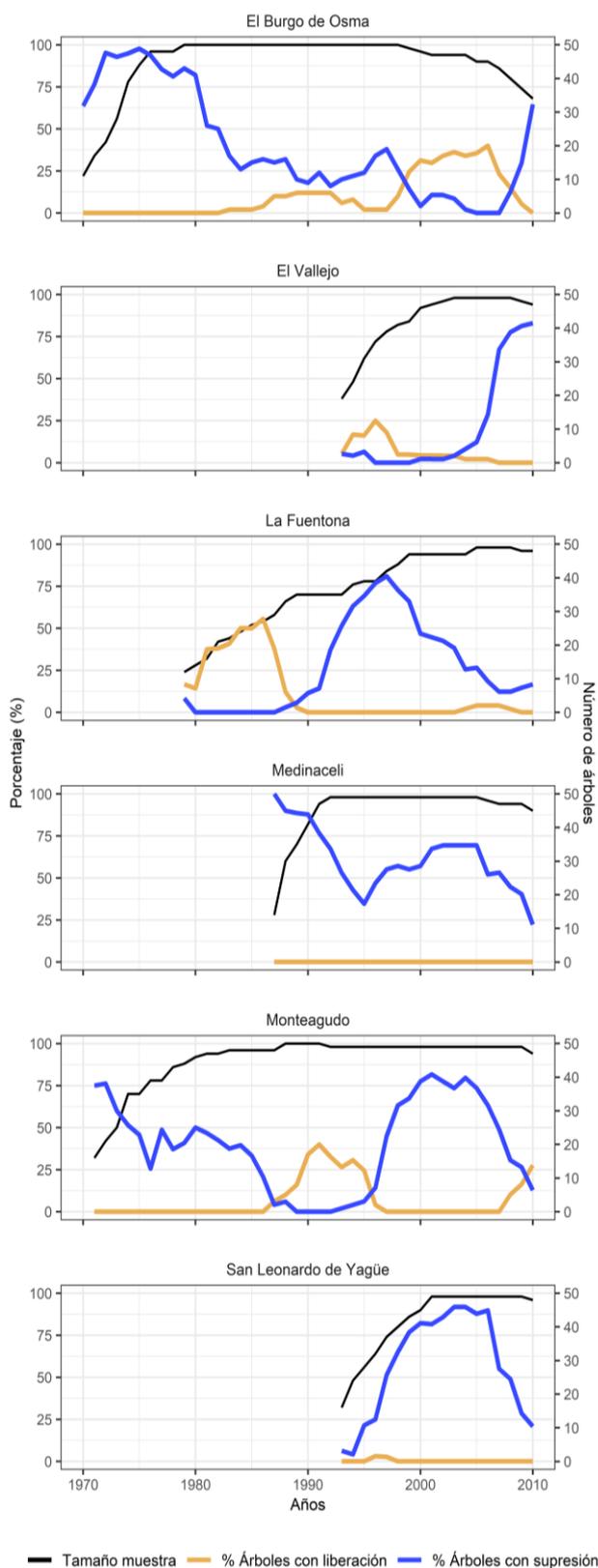
La provincia de Soria cuenta tanto con poblaciones nativas de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, como con repoblaciones de la subespecie *nigra* (Fig. 2.2). Las poblaciones nativas se concentran en el centro-oeste de la provincia, alrededor del Cañón del Río Lobos, mientras que las repoblaciones se encuentran dispersas por toda la provincia, si bien destaca una fuerte concentración en la Comarca de Tierras Altas en la zona limítrofe con la Rioja.



**Figura 2.3.** Evolución del crecimiento medio del pino salgareño (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo.

Estas repoblaciones se han establecido generalmente sobre zonas previamente no forestadas, en un amplio abanico de ambientes potenciales, desde encinares a melojares pasando por sabinas albares. En el muestreo se ha tratado de recoger esta variabilidad geográfica (Fig. 2.2, Tabla 2.1), a pesar de que muchas de estas zonas corresponden a repoblaciones con una subespecie no autóctona. Así, se ha muestreado tanto en el núcleo de la población autóctona de *Pinus nigra*, como en algunas de las principales zonas donde se ha repoblado con la subespecie *nigra* (Tierra Altas, Sierra de Cabrejas, Burgo de Osma, Medinaceli y Monteagudo).

Las poblaciones muestreadas son bastante jóvenes (Tabla 2.1), ya que la mayor parte de ellas son repoblaciones, existiendo solo una población natural pero que también es muy reciente. Tras una fase inicial de crecimientos reducidos, los crecimientos medios por árbol se estabilizan ligeramente por debajo de los 10 cm<sup>2</sup> de área basal por año, con una gran sincronía entre sitios, especialmente en años de fuertes sequías como el 2005 y el 2012 (Fig. 2.3).



No se aprecian diferencias significativas entre la población natural (San Leonardo) y las de otras subespecies. Al tratarse de pinares que se instalan de modo síncrono es normal que tras el establecimiento de la masa se observen procesos de supresión (Fig. 2.4) debido a la densificación tras el período inicial de crecimiento, como ocurre en todas las localidades salvo en La Fuentona y con menor intensidad en El Vallejo. En estas últimas se observa el proceso contrario, una liberación en el estadio inicial de la masa, lo que se podría atribuir a la existencia de regeneración avanzada: árboles que estaban en una masa anterior y que se vieron favorecidos por la reducción de la competencia asociada a su corta. Esto es algo apreciable en La Fuentona, por la presencia de individuos mucho más viejos que la media de la masa, pero no tanto en El Vallejo (tabla 2.1). En El Burgo de Osma y en Monteagudo se observa la aparición de liberaciones en períodos intermedios, lo que es un indicio de actuaciones de reducción de densidad en las masas. Como se aprecia, estos fenómenos tienen un impacto limitado en el tiempo e inmediatamente después se produce una supresión como consecuencia del aumento del área basal de la masa.

Figura 2.4. Eventos de supresión y liberación en los crecimientos del pino salgareño.

## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

Las respuestas de los pinos salgareños a las condiciones climáticas mensuales son bastante heterogéneas (Fig. 2.5). Sin embargo, se pueden distinguir las localidades más meridionales en ambientes más xéricos (Medinaceli, Monteagudo y Burgo de Osma) en las que se manifiesta una importante señal positiva de las precipitaciones de invierno. Este hecho refleja que las precipitaciones en estos ambientes son muy bajas a lo largo de todo el año y que son necesarios los años relativamente húmedos para saturar los suelos para poder sustentar el crecimiento que ocurrirá en los siguientes meses. Esta señal no aparece, o incluso lo hace de modo negativo (San Leonardo de Yagüe) en las zonas más septentrionales, donde todos los inviernos son lo suficientemente húmedos para saturar los suelos, por lo que la lluvia deja de ser un factor limitante. De hecho, incluso en alguna localidad puede tener un papel negativo, ya que los periodos más lluviosos en invierno coinciden con la llegada de borrascas que además de dejar precipitaciones también bajan las temperaturas, por ello no sorprende que una señal

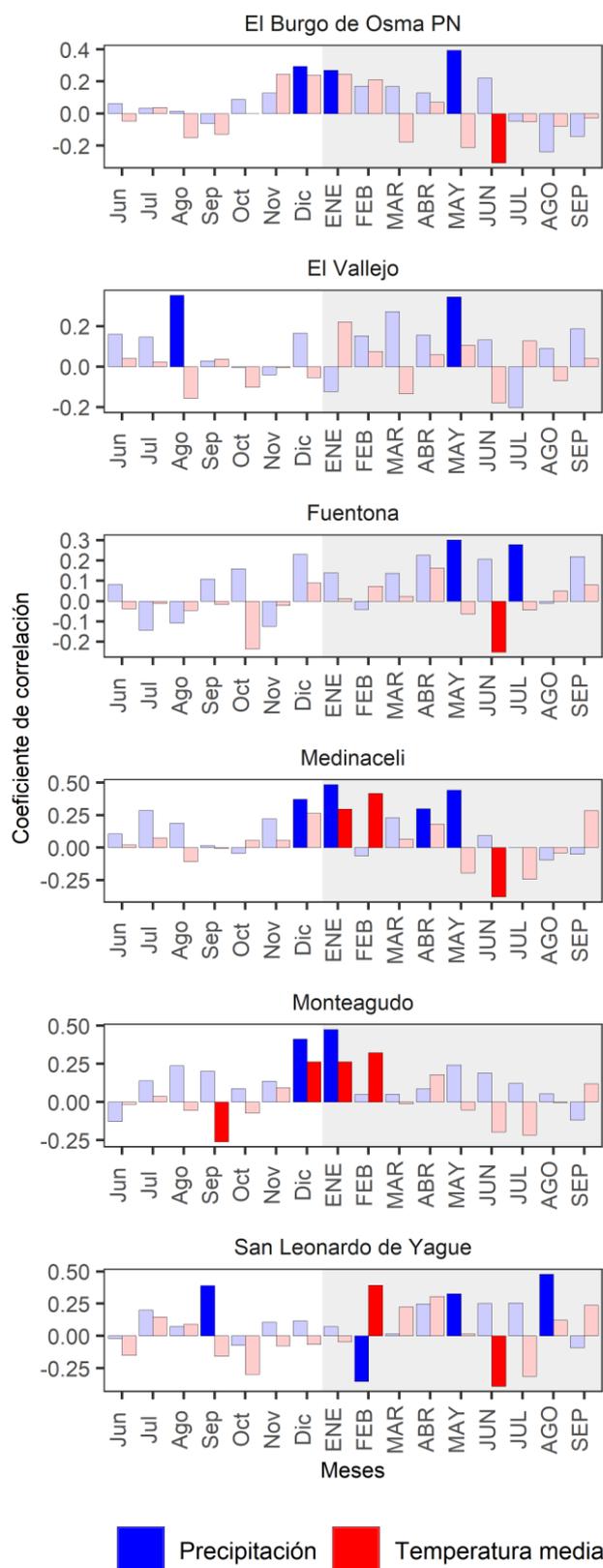


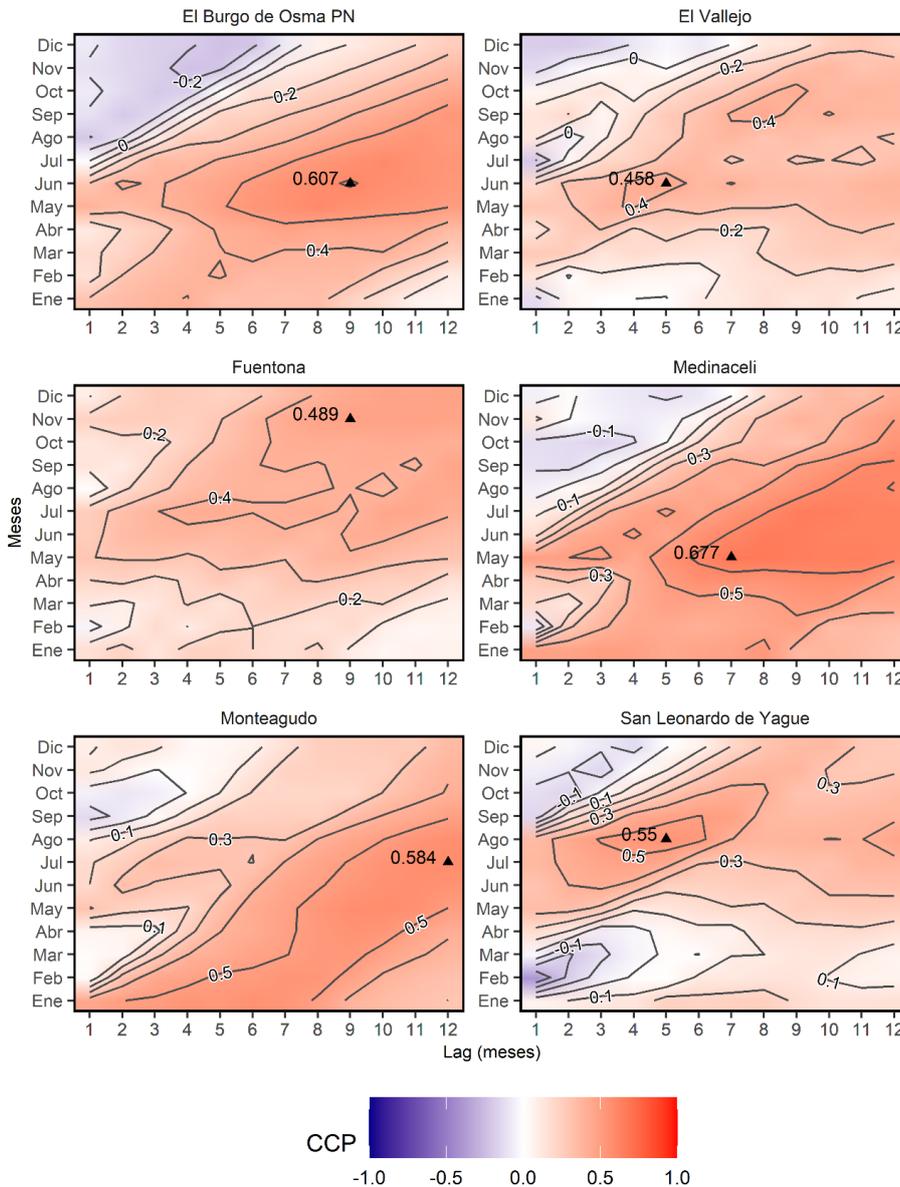
negativa de la precipitación invernal coincide con una señal positiva de la temperatura. La mayor parte de las poblaciones (5 de 6) muestran una señal positiva de las lluvias de mayo, un mes crucial, debido a que ya se ha iniciado el crecimiento y un mayo húmedo permite mantener una alta actividad cambial durante mayo y en parte de junio. El efecto de las condiciones estivales no se manifiesta en todas las localidades, apareciendo señales negativas de la temperatura de junio (3 localidades) asociadas con una disminución de la evapotranspiración que permite retener agua en el suelo durante el periodo más seco del año, lo que coincide con como el efecto positivo de las lluvias de julio (La Fuentona) o agosto (San Leonardo de Yagüe). En las dos localidades más septentrionales y húmedas aparece un efecto positivo de las precipitaciones de final del verano anterior.

**Figura 2.5.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejas correlaciones estadísticamente significativas. Los meses están divididos en meses pertenecientes al mismo año de crecimiento (letras mayúsculas; área gris) y en meses del año anterior al año de crecimiento (letras minúsculas; área blanca).

#### Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI

El análisis de los efectos de la demanda evapotranspirativa acumulada en diferentes escalas temporales (Fig. 2.6) muestra un efecto muy relevante en el crecimiento anual. Es frecuente que cuando la limitación hídrica ocurre a lo largo de períodos de tiempo relativamente largos el efecto de los meses individuales sea bajo, o incluso no significativo (Fig. 2.5), pero el efecto agregado de los meses sea muy importante. De hecho, los niveles de varianza explicada ( $R^2$ ) por el SPEI van desde el 21% al 45%, valores que empiezan a ser muy importantes. Al igual que ocurría con las respuestas mensuales, también aparece una heterogeneidad en las respuestas agregadas, tanto en las fechas de máxima señal como en el periodo acumulado a considerar. La señal más temprana (mayo) ocurre en Medinaceli, uno de los sitios más secos, desplazándose a junio en El Vallejo y El Burgo, y hasta julio en Monteagudo y agosto en San Leonardo. La señal de La Fuentona de noviembre parece demasiado tardía. En general los períodos del efecto son largos, de cinco meses los más breves (El Vallejo y San Leonardo de Yagüe), reflejando los inviernos mucho más lluviosos de estos lugares y que





limitan con el período de mayor déficit hídrico de verano. Los períodos más largos (8 - 12 meses) reflejan condiciones generales mucho más secas en las que los suelos no se saturan durante el invierno. En general, estos resultados muestran la sensibilidad de esta especie a las limitaciones hídricas, un fenómeno más evidente en las repoblaciones situadas en zonas más meridionales.

**Figura 2.6.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones

climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad.

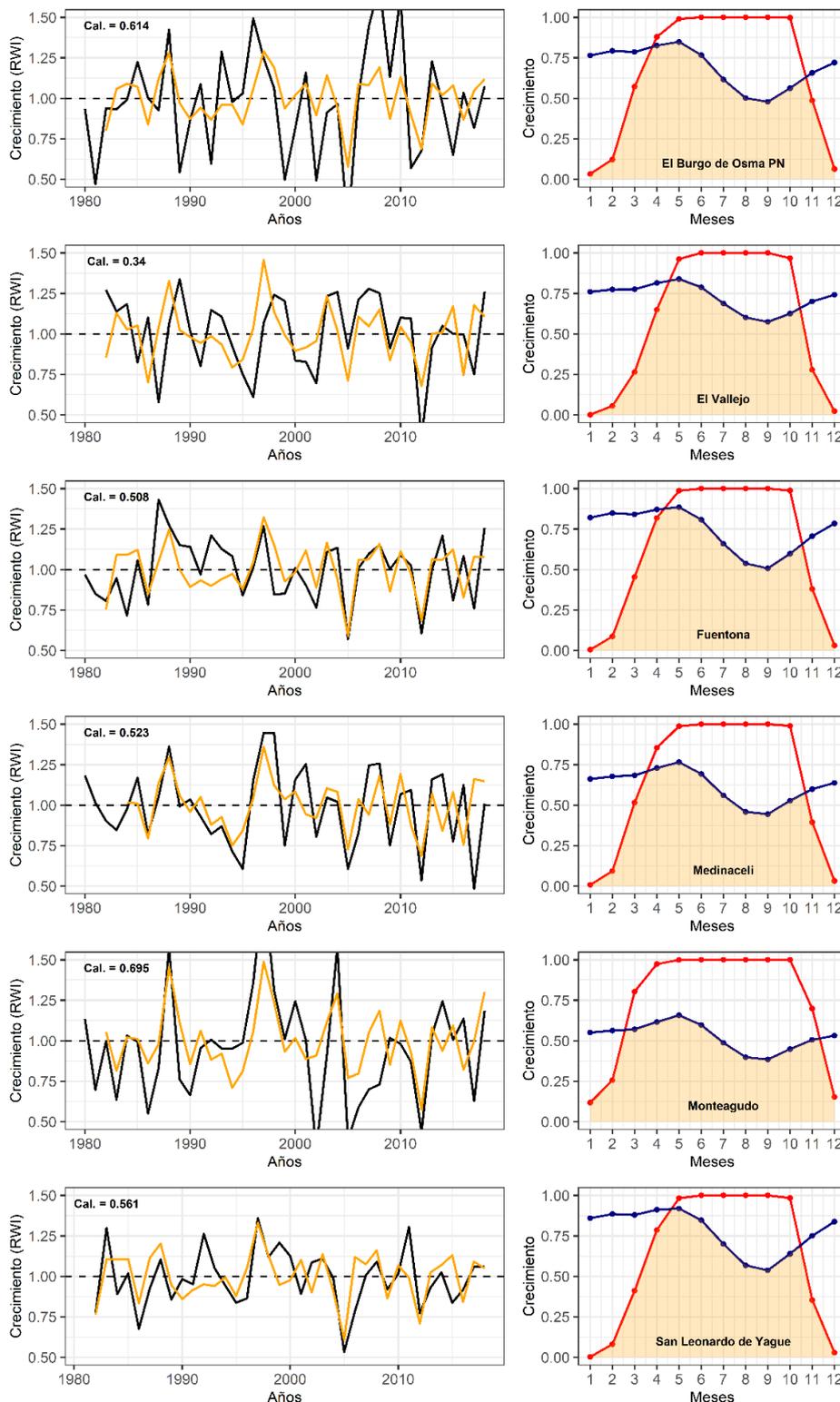
### Modelos de crecimiento

Los ajustes al modelo de Vaganov-Shashkin (Fig. 2.7) son buenos para todas las poblaciones ( $r = 0.508 - 0.696$ ) salvo para El Vallejo ( $r = 0.34$ ) en que fue un ajuste modesto. La baja correlación encontrada en la localidad de El Vallejo entre el crecimiento y el clima (Figs. 2.5, 2.6, 2.7) probablemente sean un indicativo de que el crecimiento de esa masa está más regulado por las propias dinámicas de la población (Fig. 2.4) que por la influencia climática. Los modelos reflejan la disparidad en las condiciones térmica. Mientras que la población más térmica (Monteagudo) muestra condiciones óptimas a partir de abril y subóptimas a partir de marzo, la población más fría (El Vallejo) no llega al óptimo térmico hasta junio. Es en la disponibilidad hídrica donde se aprecian con más detalle las diferencias. En ninguna de las localidades hay disponibilidades hídricas óptimas durante algún punto del año, pero la xericidad es mucho más marcada en Monteagudo donde la respuesta de la humedad no alcanza los 0.75 puntos, situación que ligeramente mejora en Medinaceli. En ambos lugares, así como en el Burgo de Osma que es un poco más húmeda, destaca la alta frecuencia de



eventos con crecimientos bajos (línea negra, Fig. 2.7), lo que sugiere que la población está sometida a un fuerte estrés hídrico. El déficit hídrico también aparece en las poblaciones más septentrionales, pero de un modo mucho más moderado, siendo la población de San Leonardo la que mejores condiciones climáticas presenta, si bien el déficit es acusado para todas ellas en agosto-septiembre. En concordancia se observa una menor frecuencia de eventos extremos. Todos los modelos muestran una limitación térmica para el crecimiento hasta abril-mayo, siendo más acusada en San Leonardo de Yagüe donde el crecimiento aún no se ha iniciado en abril, y en El Vallejo, donde las condiciones térmicas de mayo aún no son totalmente óptimas. Posteriormente, el período de temperatura óptima se extiende hasta octubre en todas las localidades, sin embargo, las condiciones sub-óptimas son menos acusadas en las localidades más térmicas de Monteagudo de las Vicarías y El Burgo de Osma.

**Figura 2.7.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).





## 2. PINO NEGRAL (*Pinus pinaster*)

### Resumen

El pino negral (*Pinus pinaster*) combina la tolerancia a los climas continentales y también a la xericidad, además de presentar una capacidad de vivir en suelos ácidos de poco valor agrícola. Esto ha hecho que esta especie se haya vuelto muy abundante en los suelos más pobres del interior de la provincia. Por otra parte, su valor como especie resinera hizo que fuera una especie muy estimada durante el siglo XX, e incluso que se utilizara para reemplazar a frondosas (*Quercus pyrenaica*) en muchas zonas de la provincia. La preponderancia de la resinación hizo que las ordenaciones de muchos de estos bosques no fueran dirigidas a la producción de madera debido en parte a que los portes no muy buenos. Hubo un intento de volver a dirigir estos bosques a la producción de madera, pero de nuevo la tendencia ha sido la de dirigir estos bosques hacia la resinación. El pino negral es un pino de turno más corto que el pino silvestre, con buen crecimiento, y muy adaptado al clima mediterráneo con posibilidad de detener y reactivar el crecimiento en mitad del período de xilogénesis. Esta capacidad le permite aprovechar los pulsos de humedad tras períodos de sequía como las tormentas de verano como se aprecia en una fuerte relación entre su crecimiento anual y el balance hídrico de dicho año. Esto además se manifiesta en una gran variabilidad anual en su crecimiento, y un fuerte control climático, que se aprecia en los excelentes resultados que arrojan los modelos de crecimiento. En este caso tal control climático no es un indicador de que la especie se encuentre en una situación de dependencia hacia la disponibilidad hídrica del suelo, sino de que es capaz de aprovechar la fuerte variabilidad intraanual en las precipitaciones que caracteriza a los ambientes mediterráneos. En un contexto más seco, el pino negral podría ser un complemento para el pino silvestre en aquellos lugares en el que este último muestre mayor sensibilidad a las sequías más intensas (zonas de menor altitud, suelos más someros y/o laderas sur).

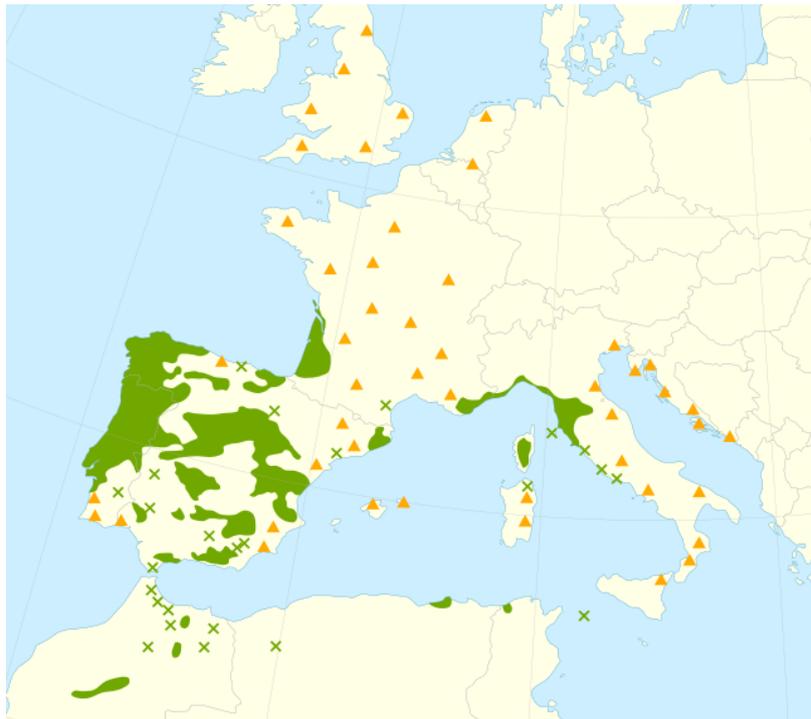


Figura 3.1. Rango de distribución del pino negral en el mundo. Fuente: Wikipedia.



## Contexto de la especie

El pino negral, también conocido como pino resinero o pino gallego tiene un carácter más mediterráneo que el pino silvestre, situándose en zonas donde la sequía estival es más patente. Si bien hay algunos pinares negrales al sur de la Comarca de Pinares (Fig. 3.2), las mayores extensiones de esta especie se sitúan en dos ubicaciones concretas, las zonas de suelos arenosos al norte Almazán y las inmediaciones de Bayubas de Abajo, también con alto contenido en arenas. Al margen de esos núcleos aparecen pinares negrales en pequeñas repoblaciones en gran parte de la provincia. Un aspecto muy importante para esta especie es la preferencia por suelos de naturaleza ácida. Es posible observar este pino sobre materiales de pH básico, pero se trata de una situación muy excepcional. En Europa el pino negral es una especie con el epicentro de su distribución en la Península Ibérica (Fig. 3.1), donde además ha sido muy empleada en reforestaciones. Fuera de ella, es común en la comarca francesa de Las Landas, Córcega, noreste de Italia y Costa Azul, así como en algunas zonas aisladas del Magreb. Se trata por tanto de una especie muy adaptada al clima mediterráneo y con capacidad para tolerar sequías frecuentes.

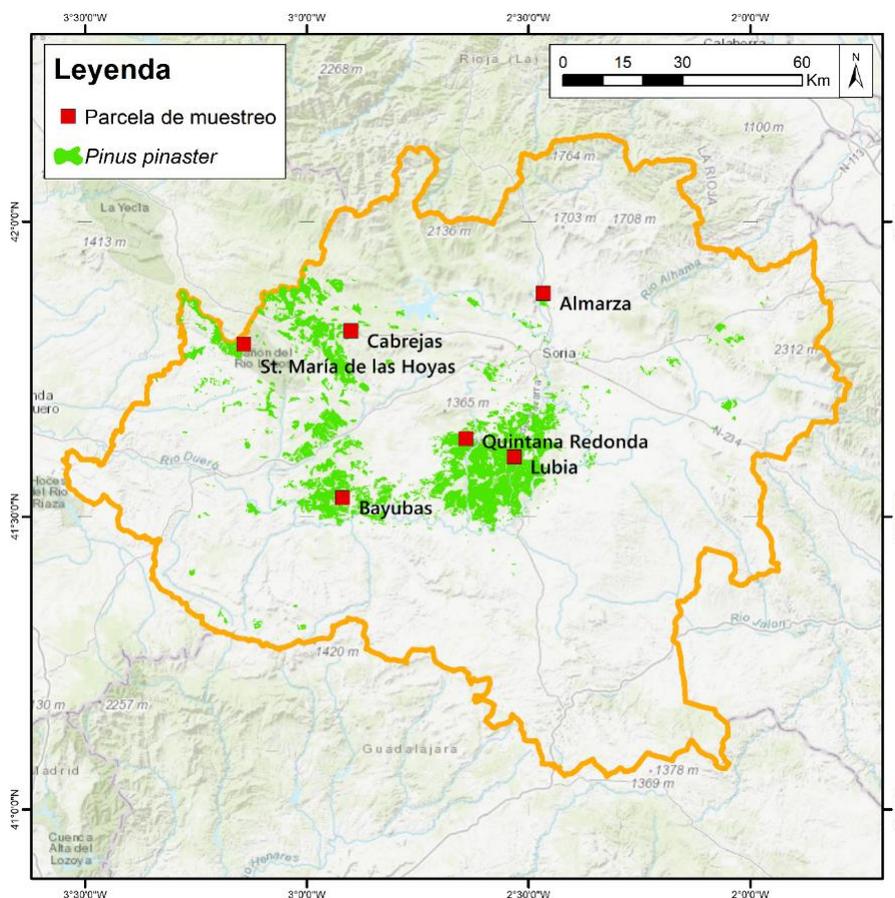


Figura 3.2. Distribución de la especie en la provincia de Soria y localización de las parcelas de muestreo.

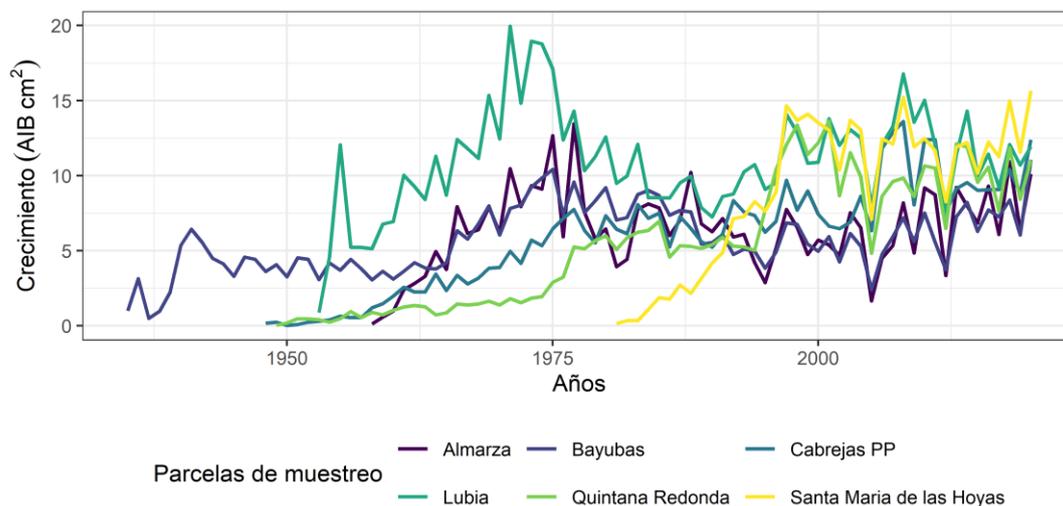
A diferencia de otros pinares donde el aprovechamiento principal es la madera, en el caso de los pinares negrales, el uso de mayor importancia en el siglo pasado fue la resina. La resina es un producto utilizado desde la antigüedad, es la base de, por ejemplo, la pez usada para calafatear los barcos, del aguarrás, o uno de los posibles compuestos utilizados para fabricar el fuego griego. Sin embargo, la resinación a gran escala no empieza en España hasta la mitad del siglo XIX cuando se introducen las técnicas de resinación desarrolladas en Francia y se establece la primera fábrica de resinas en Hontoria del Pinar, un pueblo de Burgos muy próximo a la provincia de Soria. Si bien en un inicio se resinaban todas las especies de pino, ya en 1929 toda la resinación se centró en *Pinus pinaster* que era la especie con más potencial. Este uso ha determinado la fisionomía y extensión de la mayor parte de los pinares negrales españoles.



**Tabla 3.1.** Descriptivos de las parcelas de muestreo del pino negral.

Sitio de muestreo	Altitud (m)	Edad media	Árbol más joven	Árbol más viejo
Almarza	1090	58	53 (1968)	63 (1958)
Bayubas de Abajo	948	64	46 (1975)	86 (1935)
Lubia	1118	48	31 (1990)	68 (1953)
Quintana Redonda	1020	42	20 (2001)	72 (1949)
Santa María de las Hoyas	1097	32,3	23 (1998)	40 (1981)
Cabrejas del Pinar	1185	57,7	42 (1979)	73 (1948)

La resinación tuvo una gran importancia económica durante el siglo XX, generando numerosos empleos forestales e incluso determinando la transformación de superficies forestales en bosques de pino negral. Ejemplo de ello es la comarca de Almazán donde los bosques de pino se sitúan en zonas que a comienzos del siglo XX eran bosques de rebollo (*Quercus pyrenaica*) como atestigua la cartografía histórica y los numerosos rebrotes de rebollo que aún subsisten en los pinares negrales.



**Figura 3.3.** Evolución del crecimiento medio (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo

La resinación de estos pinares entró en crisis durante la década de los 70 del pasado siglo por la concatenación de diferentes factores: la importancia de los productos derivados del petróleo, la reducción de la competitividad frente a terceros países y la falta de mano de obra para un trabajo tan exigente. Desde entonces tanto la producción como el número de resineros en activo se ha ido reduciendo notablemente hasta la década pasada. Un aumento de los precios de la resina junto con la situación de alto desempleo inició un tímido resurgir de este sector que ha implicado que en la provincia de Soria muchos de los pinares negrales muestren cada vez más árboles con signos de resinación.

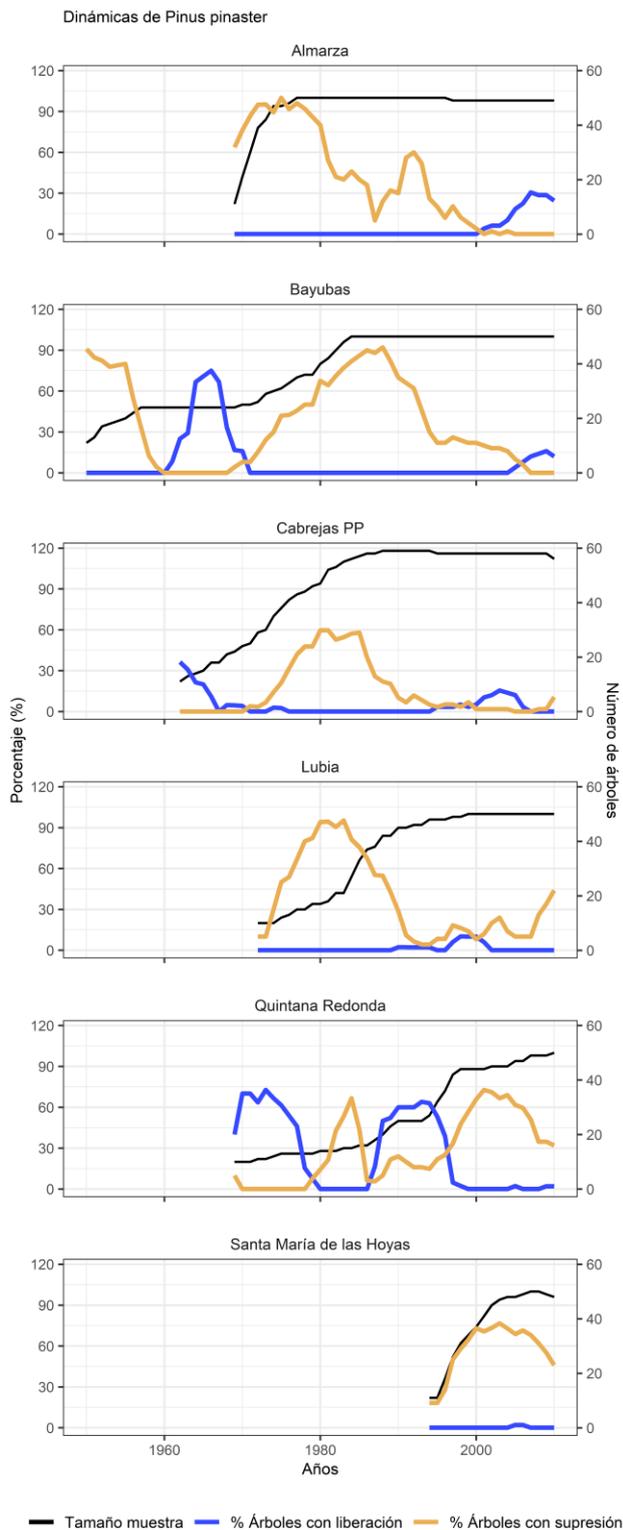


La resinación ha determinado que los planes de gestión de estos bosques no hayan sido dirigidos a la producción de madera como producto principal y es común ver fustes de muy baja calidad. La madera en sí es mucho menos valiosa que la del pino silvestre, y su alto contenido en resina hace que sea poco adecuada para su uso como combustible. Por lo que el resurgir de la resinación ha dado de nuevo importancia a estos bosques.

Además, hay que reconocer su valor por la producción de recursos micológicos, sobre todo níscalos, aunque su uso turístico no tiene actualmente la misma intensidad que los pinares de silvestre.

### Selección de las parcelas y características

En el muestreo se ha tratado de incluir su variabilidad geográfica de la provincia de Soria (*Fig. 3.2, Tabla 3.1*), incluyendo las principales masas de pino negral. Tanto las masas más consolidadas de Almazán (Lubia y Quintana Redonda) y Bayubas como la zona sur de la Comarca de Pinares (Pinar Grande y Santa María de las Hoyas). Hemos querido incluir también una repoblación en las zonas más húmedas (Almarza). Las edades medias de estas masas van desde los 32 años de Santa María de las Hoyas hasta los 64 de Bayubas de Abajo. En general, las masas de *P. pinaster* son muy jóvenes (el árbol más viejo con 86 años) como corresponde a una especie con un turno de corta muy rápido y una longevidad baja en comparación con casi todas las demás especies estudiadas. Eventualmente los turnos pueden alargarse en el caso de bosque resinados donde el crecimiento se ve reducido por dicha actividad, pero en el caso de este estudio no se escogieron bosques con signos de haberse sometido a resinación. Los árboles de las localidades muestreadas tienen un crecimiento basal medio entre 5 y 15 cm<sup>2</sup> (*Fig. 3.3*) con un comportamiento muy sincrónico entre las diferentes parcelas. Los descensos por sequías son muy marcados, y en general se observa una gran variabilidad interanual del crecimiento, lo que sugiere un gran condicionamiento del crecimiento a la disponibilidad de recursos.



**Figura 3.4.** Eventos de supresión y liberación en los crecimientos del pino negral.

Todas las parcelas muestran supresiones iniciales asociadas al establecimiento de la masa (*Fig. 3.4*). Los árboles comienzan con crecimientos muy elevados tras la instalación y, según se densifica la masa, los crecimientos individuales descienden (*Fig. 3.4*). Quintana Redonda y Cabrejas se salen ligeramente de dicho patrón con liberaciones iniciales, lo que indica que, en dichos casos, los bosques crecieron sobre individuos que ya estaban presentes en una masa anterior como regeneración avanzada y que se vieron favorecidos por la corta de un bosque previo.



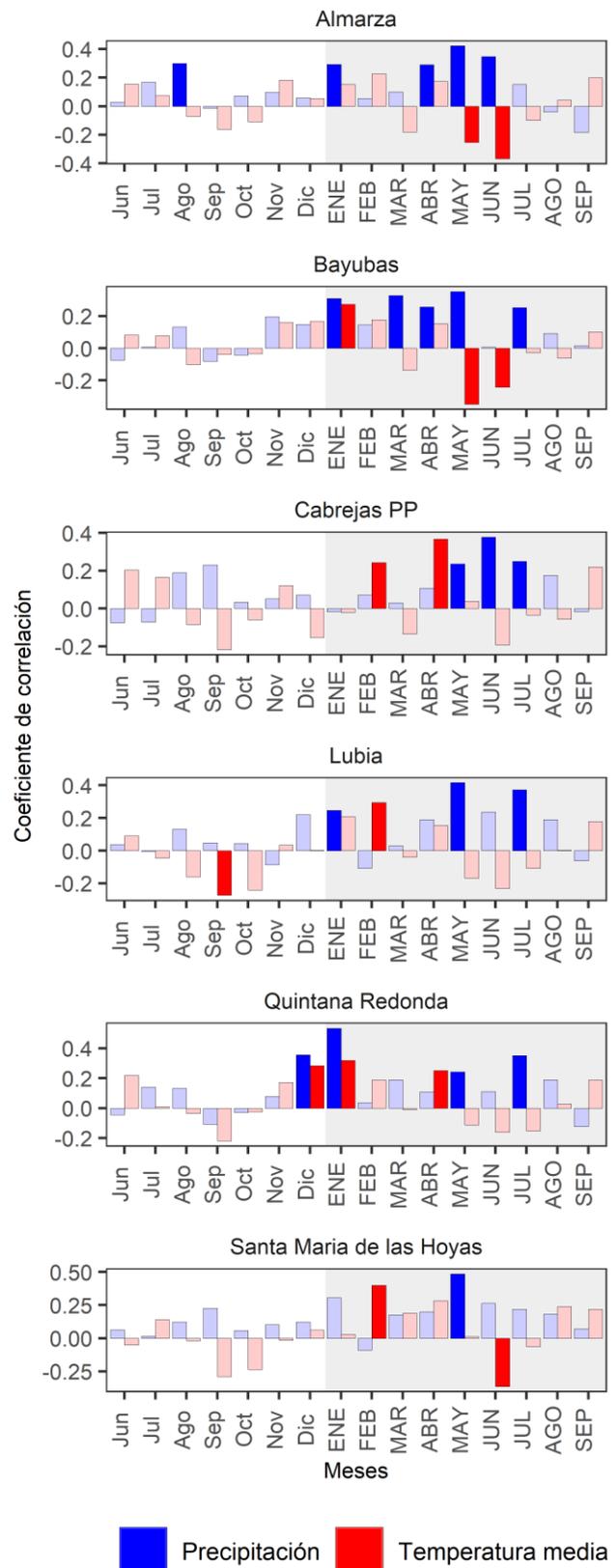
De hecho, esto se aprecia en que los árboles más viejos son de mucha mayor edad que la de la principal cohorte de la masa (*Tabla 3.1*). Tras la corta que generó el establecimiento inicial, las actividades silvícolas han sido escasas, solo Bayubas y Quintana Redonda tuvieron actuaciones de eliminación de pies. En este caso probablemente se deba a una corta de árboles del turno anterior, ya que las cortas se dan en momentos muy iniciales de la historia de la masa. Esto ocasiona una liberación en los árboles presentes seguido de un ciclo de densificación de la masa, lo que a su vez genera una reducción del crecimiento individual por fenómenos de competencia. En Bayubas, Almarza, Cabrejas y Lubia se han dado actuaciones más recientes y mucho más moderadas de reducción de la densidad que se aprecian en un incremento puntual del crecimiento de algunos árboles.

## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

El pino negral muestra una fuerte limitación hídrica a lo largo de todo el período de crecimiento. Todas las localidades muestran varios aspectos en común. En primer lugar, el último mes del año con limitaciones hídricas es julio. Agosto ya es demasiado seco en las zonas ocupadas por el pino negral y el crecimiento suele ser muy reducido y centrado en la madera tardía (*Arzac et al. 2018*). Las limitaciones hídricas se inician en marzo en la zona más meridional, Bayubas, o en abril en Almarza, siendo mayo el mes más común en el que se aprecian dichas limitaciones (Cabrejas, Lubia, Quintana Redonda y Santa María). Incluso, las precipitaciones de invierno, previas al crecimiento (diciembre-enero) parecen importantes en varias localidades, lo que indicaría que pueden contribuir a la saturación del suelo y al relleno de los acuíferos. La temperatura también es importante en muchas localidades. Un aspecto a remarcar es que aparecen señales negativas de la temperatura en mayo y junio. Estas señales negativas durante los períodos de crecimiento indican que, una vez superado el umbral requerido para el crecimiento, el efecto de temperaturas más elevadas es negativo porque acrecienta la evaporación del agua del suelo.

**Figura 3.5.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejan correlaciones significativas. Los meses del mismo año de crecimiento en letras mayúsculas; área gris y minúsculas; área blanca para los del año anterior.



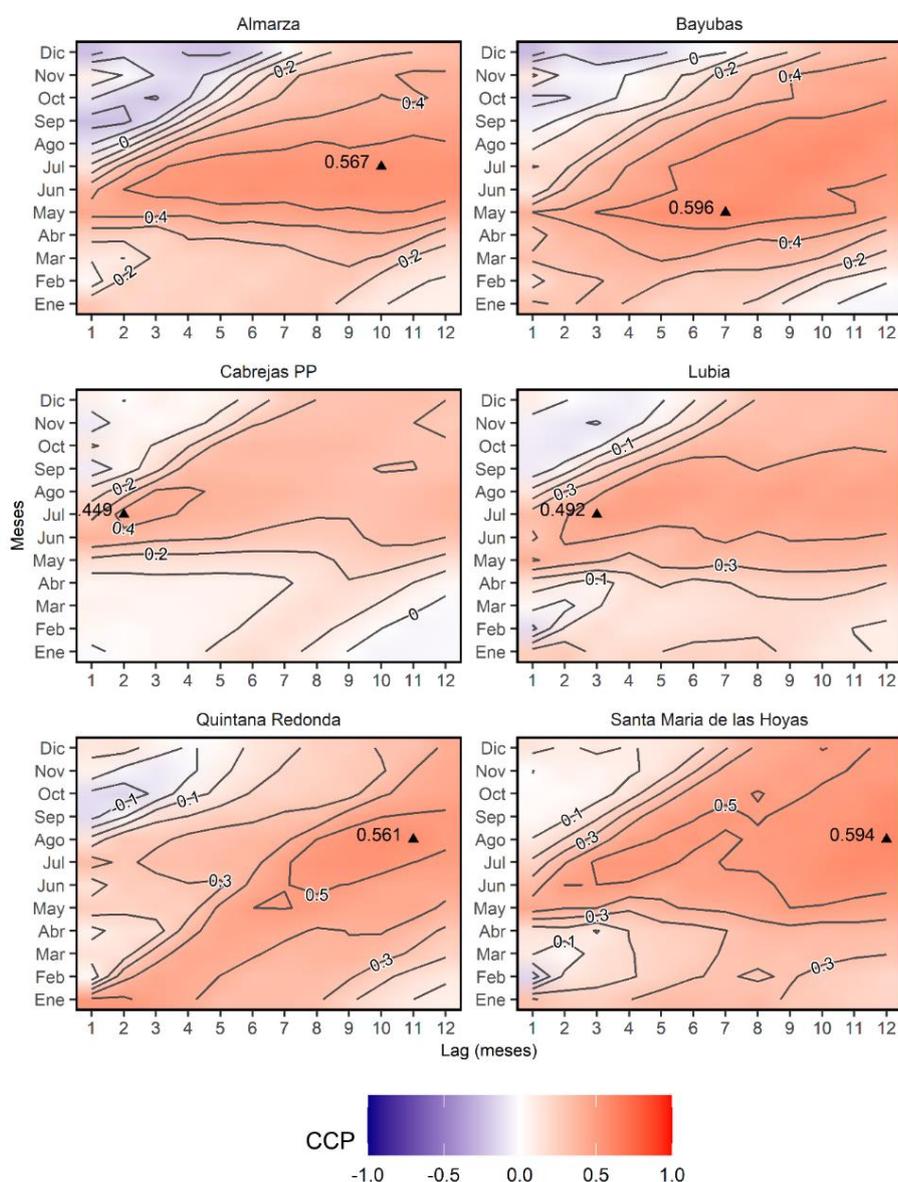


Es decir, que las limitaciones hídricas inherentes al clima mediterráneo se ven acrecentadas por una mayor temperatura. Por el contrario, las temperaturas altas en invierno (diciembre a febrero) que aparecen en casi todas las localidades lo que podrían indicar un efecto negativo de las temperaturas muy bajas sobre el crecimiento (*Hernández-Alonso et al. 2021*). No olvidemos que nos encontramos en un clima fuertemente continental en altitudes que superan los 1000 m.

### Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI

El análisis de los efectos de la demanda evapotranspirativa a diferentes escalas temporales (*Fig. 3.6*) muestra un efecto muy significativo de esta en el crecimiento anual. La intensidad del efecto de la evapotranspiración es alta, con un mínimo de un 20% de varianza explicada en Cabrejas y hasta un 36% en la zona meridional de Bayubas. El mes de máxima intensidad varía desde agosto (Santa María de las Hoyas y Quintana Redonda) a julio en tres localidades y mayo (Bayubas, la localidad más seca de las seis). Hay que recordar que Bayubas tenía un efecto positivo de la lluvia de julio. La duración de la señal puede llegar a ser muy amplia, de un año en Santa

María de las Hoyas, 11 meses en Quintana Redonda o 10 en Almarza. Esta señal es más reducida, de dos meses en Cabrejas, y tres en Lubia. En general los resultados indican que el crecimiento del pino negral en Soria es fuertemente dependiente de la disponibilidad hídrica y que dicha limitación hídrica puede responder a períodos relativamente largos.

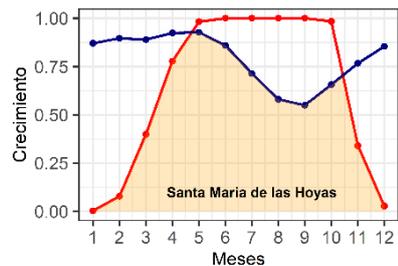
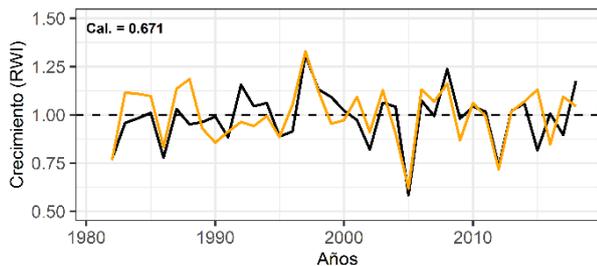
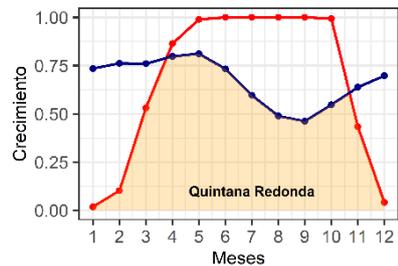
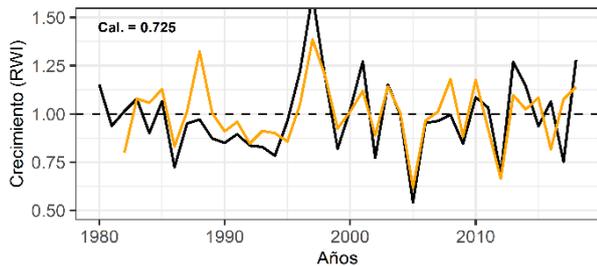
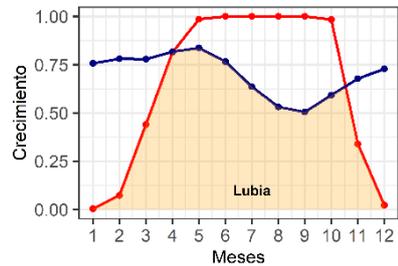
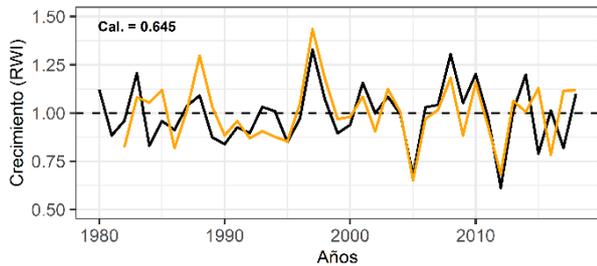
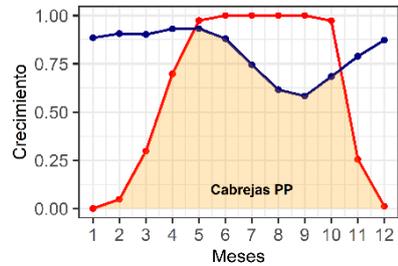
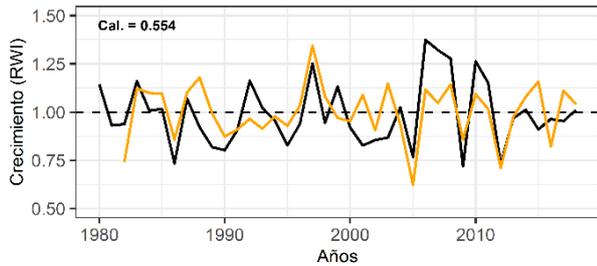
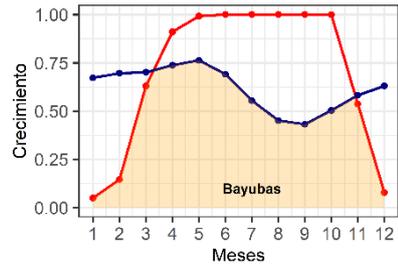
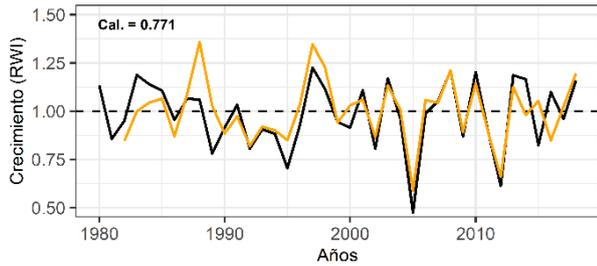
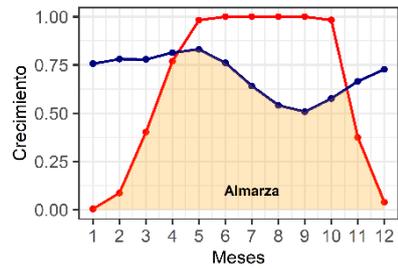
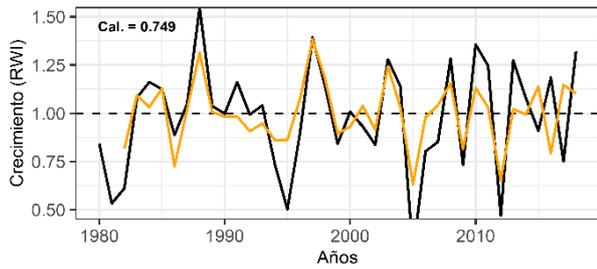


**Figura 3.6.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad



**Modelos de crecimiento** Las diferentes localidades muestran un ajuste muy elevado al modelo de Vaganov-Shashkin común (Fig. 3.7). Con ajustes que van desde  $r = 0.77$  para Almarza a una más baja de 0.65 para Luvia, lo que son valores bastante altos. Todos los modelos muestran una limitación térmica para el crecimiento hasta abril y bastante homogénea entre localidades, ya que no hay grandes cambios altitudinales. El déficit hídrico ocurre desde el inicio del crecimiento en marzo-abril y se intensifica conforme se avanza hasta agosto-septiembre cuando alcanza un mínimo. Las condiciones óptimas de temperatura se mantienen hasta octubre cuando experimentan un brusco descenso. Es de destacar que las condiciones hídricas no son óptimas en ningún momento del año, en ninguna localidad, por lo que cualquier sequía ocurrida durante el año puede tener su impacto en el crecimiento.

**Figura 3.7.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).

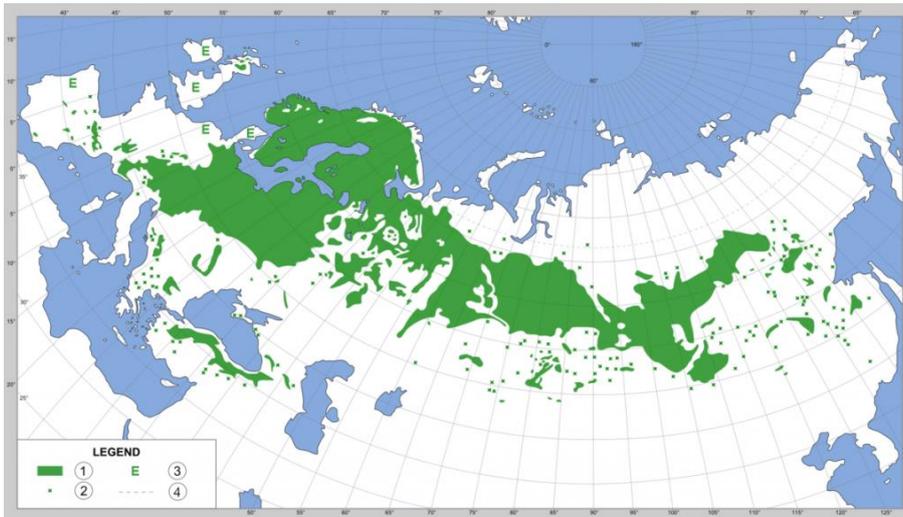




### 3. PINO SILVESTRE (*Pinus sylvestris*)

#### Resumen

El pino silvestre ocupa las zonas más lluviosas de la provincia de Soria ocupando áreas extensas de masas ordenadas para la obtención de madera. En la Comarca de Pinares se trata de bosques que llevan siglos en el lugar, mientras que en las zonas más orientales suelen ser repoblaciones de bancales y antiguos pastizales. El pino silvestre es una especie que requiere ambientes sin limitaciones hídricas en verano, y por tanto en Soria se enfrenta a un clima mediterráneo con sequía estival. Para recoger la variabilidad de la especie, el muestreo ha seleccionado tres localidades en el núcleo central de Comarca de Pinares, a diferentes altitudes, un pinar aislado al sur de la provincia y una repoblación en ambiente frío y seco en Tierras Altas.



**Figura 4.1.** Mapa de distribución mundial del pino silvestre. Fuente Wikipedia

El crecimiento medio es muy sincrónico entre los sitios, pero con notables diferencias en el crecimiento medio por área basal, que va desde 5 hasta 20 cm<sup>2</sup> por año. El cambio en las pautas de crecimiento muestra actuaciones de aclareo

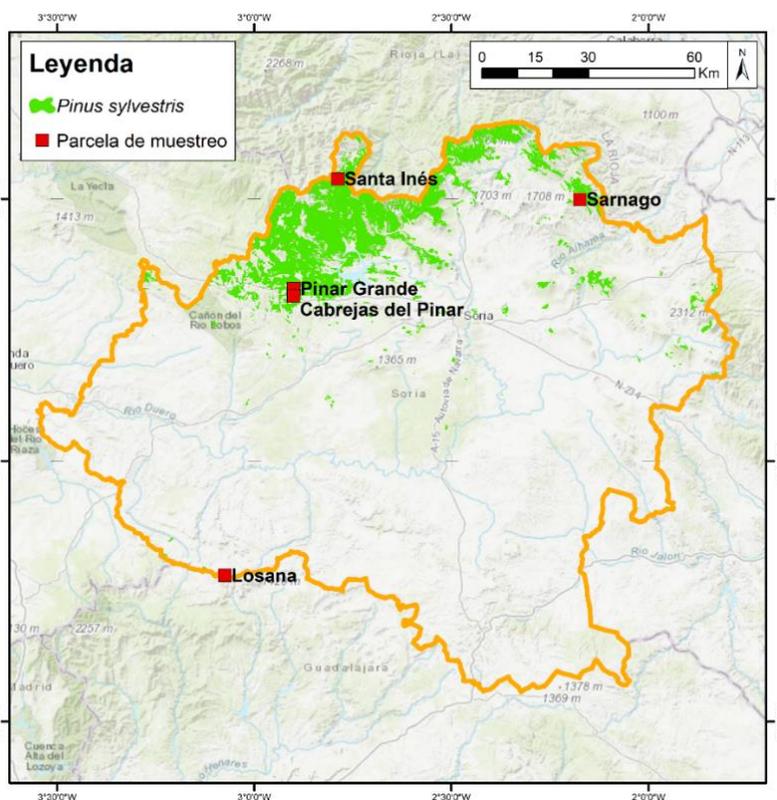
asociadas al establecimiento de la masa, en Pinar Grande y Santa Inés, o realizadas tras periodos más dilatados de densificación como ocurre en Cabrejas y Sarnago. En Losana sin embargo no se han detectado intervenciones de manejo. La precipitación durante el período de crecimiento es el principal factor climático que limita el crecimiento del pino silvestre. En general, la intensidad y la longitud de esta señal aumenta con la xericidad: junio a agosto en la zona más elevada y fresca de Santa Inés, mayo a agosto en una localidad septentrional más baja (Pinar Grande) y marzo a agosto en la localidad más meridional. Si bien en zonas ya fuera del área histórica de la especie los crecimientos se ven afectados por periodos más breves (junio-julio), pero de un modo muy intenso (Sarnago). El modelo de Vaganov-Shashkin indica que la temperatura media mensual afecta el punto de inicio del crecimiento, siendo este más temprano (abril) en zonas más bajas hasta mayo-junio en las más elevadas. La limitación del modelo de crecimiento por disponibilidad hídrica aparece de modo más acusado en las zonas más alejadas de su núcleo de distribución, pero ni siquiera en las zonas más altas deja de haber limitaciones hídricas en el período del crecimiento.

#### Contexto de la especie

El pino silvestre se distribuye fundamentalmente por el norte de la provincia de Soria (Fig. 4.2). Su núcleo principal es la comarca conocida como Pinares, donde la explotación de los pinares de pino silvestre ha constituido uno de los pilares de su economía desde hace siglos. El sistema de manejo se basaba en la propiedad comunal de la tierra, lo que generaba unos niveles de renta muy elevados para su época.



En la actualidad el pino silvestre sigue siendo, con diferencia, la especie forestal de mayor interés económico de la provincia, suministrando madera a una importante industria de transformación, que genera empleos industriales en el mundo rural. Los pinares, tienen, además, un gran valor turístico por su paisaje, pero también por su producción micológica, que atrae a numerosos recolectores en el período otoñal. La mayor parte de los pinares ocupan zonas potenciales de bosques de *Quercus* (sobre todo *Q. pyrenaica*) y hayedos, en los que se favoreció al pino silvestre de crecimiento más rápido y con una madera de mayor calidad. A diferencia de la Comarca de Pinares donde el pino silvestre tiene una larga tradición, las poblaciones más orientales de este núcleo norte (Cebollera, Tierras Altas) son el resultado de repoblaciones de los años 60 y 70, generalmente sobre antiguas superficies de pastizales o matorrales dedicados al ganado, enmarcadas en los grandes planes nacionales de reforestación que tuvieron lugar en dicho período. En el caso del Moncayo soriano, también se trata de repoblaciones forestales, si bien algunas de ellas son algo más antiguas. Finalmente hay que destacar el pinar de Losana, situado al sur de la provincia, muy lejos del resto de los pinares. Aunque en el contexto soriano siempre se habla de esta localidad como un pinar relicto por estar muy al sur de la masa principal, visto desde una perspectiva más general se trata de una subpoblación de los pinares de silvestre de la cara norte del Sistema Central. Por su valor, la mayor parte de los pinares de silvestre están sometidos a ordenaciones forestales, algunas de ellas con más de un siglo de antigüedad, con cortas que favorecen estructuras coetáneas.



**Figura 4.2.** Mapa de distribución del pino silvestre en la provincia de Soria. Son cinco parcelas de muestreo porque en una de ellas (Cabrejas del Pinar) se muestreó un bosque mixto con *Pinus pinaster*.

Desde el punto biogeográfico, la distribución mundial del pino silvestre es la más amplia para una conífera, llegando desde cerca del Pacífico en la Siberia rusa, hasta la Península Ibérica, donde se encuentra el límite suroeste de su distribución (Fig. 4.1). Esta situación de extremo sur/seco de distribución indica una especial sensibilidad al cambio climático, y en especial al aumento de las sequías.

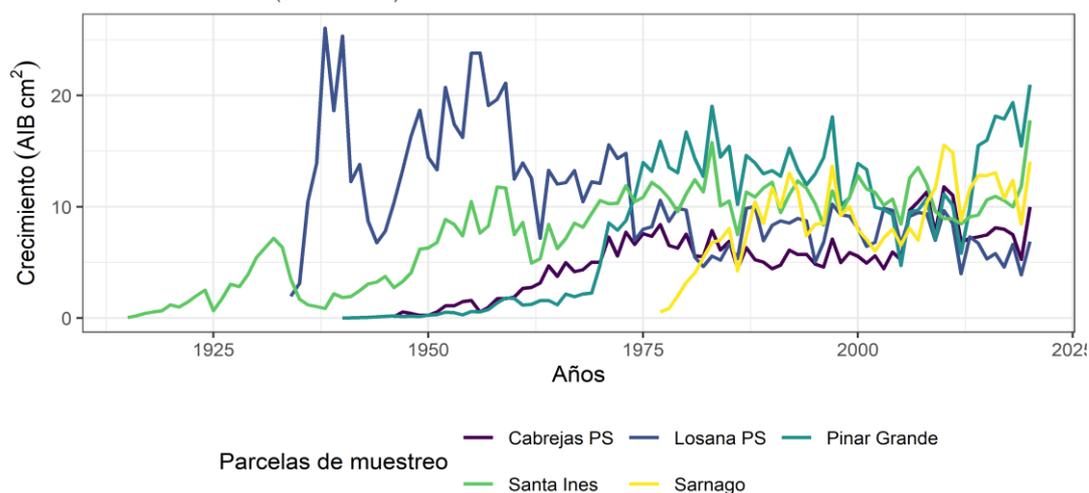
**Tabla 4.1.** Características de las parcelas muestreadas de pino silvestre.

Localidad	Altitud (m)	Edad media	Árbol más joven	Árbol más viejo
Santa Inés	1900	84	64 (1957)	100 (1921)
Pinar Grande	1142	65	42 (1979)	92 (1929)
Cabrejas del Pinar	1140	56,1	26 (1995)	74 (1947)
Sarnago	1370	41	30 (1989)	44 (1977)
Losana	1397	44,5	28 (1993)	87 (1934)



## Selección de las parcelas y características

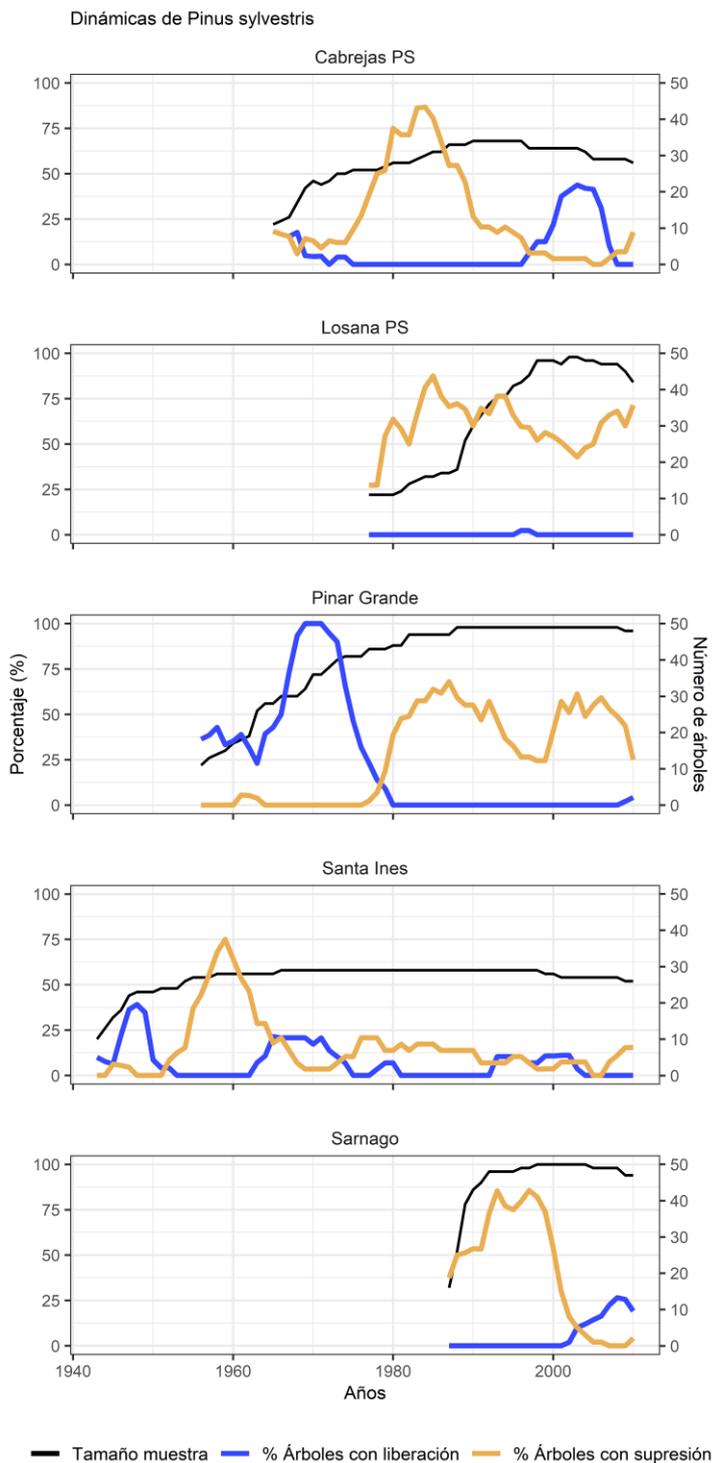
En el muestreo de pinares silvestres se ha tratado de incluir su variabilidad ambiental en la provincia de Soria (*Fig. 4.2, Tabla 4.1*), incluyendo zonas a diferentes altitudes desde muy elevadas (Santa Inés) hasta de baja altitud (Pinar Grande), así como repoblaciones más recientes (Sarnago) y la población más meridional (Losana). Las edades medias de estas masas van desde los 41 años del pinar de Sarnago en una repoblación de Tierras Altas hasta los 84 años del pinar de Santa Inés a 1900 metros de altitud en mitad de la masa continua de la Sierra de Urbión (*Tabla 4.1*).



**Figura 4.3.** Serie temporal de incremento medio de área basal para las cinco localidades de pino silvestre

Los árboles de las localidades muestreadas tienen un crecimiento basal bastante sincrónico (*Fig. 4.3*), donde las caídas más bruscas de crecimiento se corresponden con las sequías más importantes (1995, 2005, 2012). El crecimiento medio por árbol está alrededor de los 10 cm<sup>2</sup> por año con diferencias notables entre localidades en la última década.

Todas las parcelas muestran establecimientos sincrónicos o espaciados en un tiempo relativamente reducido como corresponde a una especie heliófila que se regenera por cortas a hecho o de forma natural por la apertura de claros en el dosel. Salvo Losana, todas las parcelas tienen historias de manejo que incluyen cortas intermedias (*Fig. 4.4*) para reducir la densidad. En el caso de Santa Inés hay una liberación importante asociada al establecimiento de la masa, y posteriormente se aprecian liberaciones más moderadas a finales de los 60 y entre los 90 y comienzo de siglo. Estas acciones parecen asociadas a las labores de clara debido a procesos de densificación de la masa. En el caso de Pinar Grande hay una liberación muy importante, poco después del establecimiento de la masa a finales de los 40, posiblemente por eliminación de los árboles dominantes. Tras esto se ve un proceso de supresión debido al aumento de la competencia y se aprecia otro en años recientes, posiblemente asociado a una clara en la masa que ha reducido la competencia. En Cabrejas del Pinar se observa una clara/clareo a comienzos del presente siglo tras un período largo de supresión. La parcela de Sarnago ha recibido una actuación silvícola de reducción de densidad a partir de 2010, tras una supresión muy intensa desde 1990. Por último, la parcela de Losana no muestra actuaciones forestales desde su instalación, apreciándose un estado cada vez más intenso de supresión, lo que se refleja en sus bajas tasas de crecimiento medio (*Fig. 4.4*).



**Figura 4.4.** Eventos de supresión y liberación para las diferentes parcelas de pino silvestre.

## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

En los climas de naturaleza mediterránea, las precipitaciones son el factor más limitante para el crecimiento. Este también es el caso de los pinares de pino silvestre que a pesar de encontrarse a altitudes relativamente considerable muestran limitaciones por disponibilidad hídrica.

En las zonas más elevadas como Santa Inés las limitaciones hídricas aparecen relativamente tarde (Fig. 4.5), en los meses de julio y agosto, como corresponde a una zona con más precipitación y menor demanda evapotranspirativa, mientras que en las zonas más bajas la sequía puede ocurrir en un período más largo de mayo a agosto en Pinar Grande o incluso en períodos todavía más largos de abril a agosto en la localidad meridional de Losana. En el caso de Sarnago la señal mensual es más baja, apareciendo solo en junio.

Que el mes de agosto aparezca en las limitaciones hídricas es muy relevante, porque sugiere una contribución del crecimiento de agosto al tamaño final del anillo. Esto no es algo común en ambientes mediterráneos, donde los crecimientos suelen ser prácticamente inexistentes a partir de julio. Esta respuesta es coherente con una especie de distribución eurosiberiana, donde el crecimiento no se detiene en el verano. Sin embargo, esto también puede implicar una cierta vulnerabilidad del pino silvestre a las sequías intensas de verano por sus limitaciones de recuperar su crecimiento previo tras una sequía.

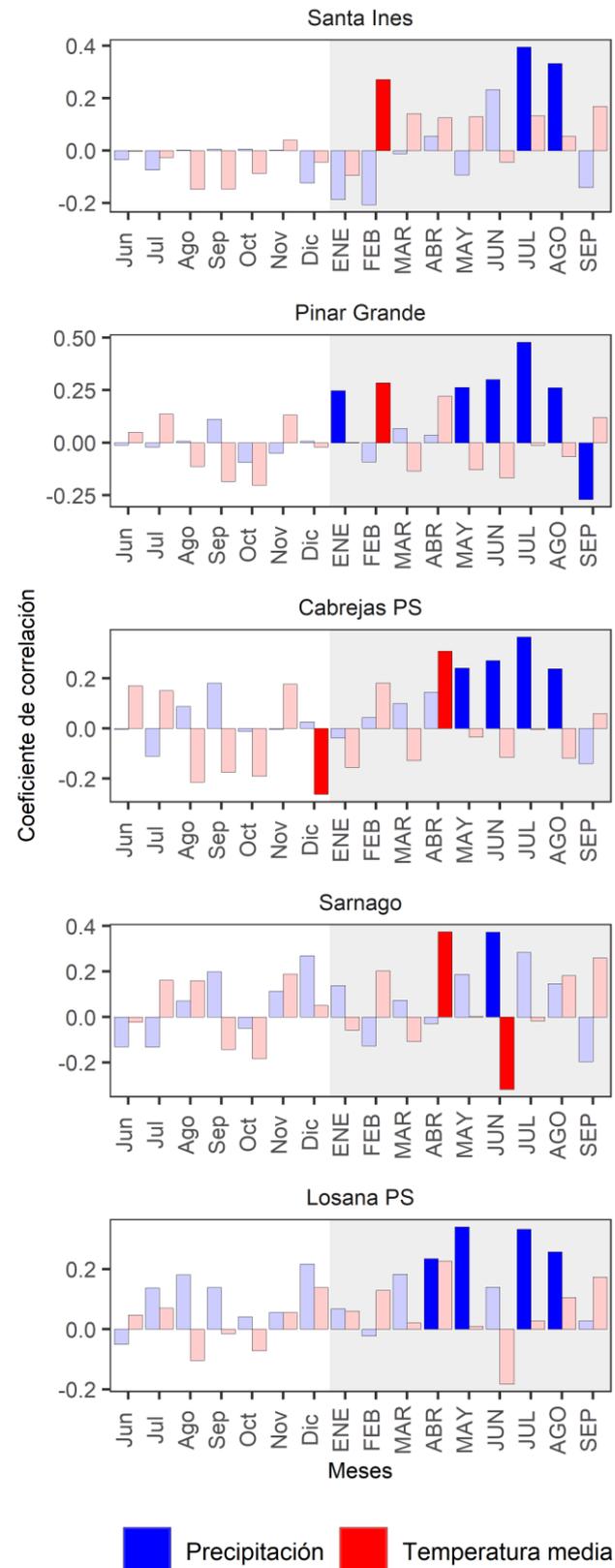


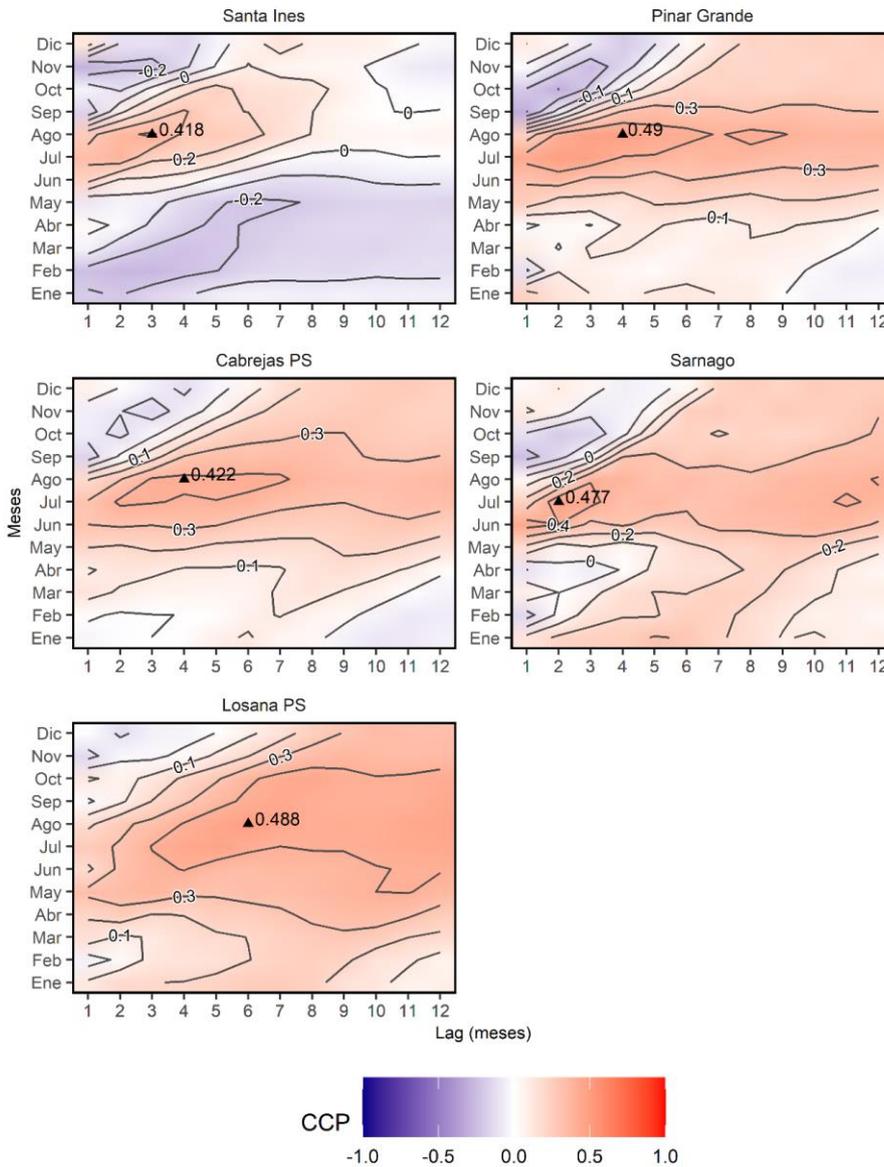
Al contrario que la precipitación, la temperatura juega un papel menor en el crecimiento del pino silvestre. Por ejemplo, en Sarnago vemos una señal positiva de la temperatura de abril. Este efecto, muy común, tiene que ver con el impacto de las temperaturas primaverales tempranas sobre el inicio del período de crecimiento. Una primavera más cálida permite activar el crecimiento secundario antes y disponer de un período de crecimiento más largo, lo que se traduce en una mayor anchura de anillo. Al contrario que otras especies caducifolias, la presencia de heladas tardías no supone un problema para los pinos, ya que la foliación ocurre después del período más sensible y no hay una vinculación entre crecimiento secundario y crecimiento primario, como sí ocurre en angiospermas caducifolias. Al contrario que ocurre con otras especies en ambientes mediterráneas, las señales negativas de temperatura estival son escasas (solo en Sarnago) lo que indicaría que el papel de la precipitación es más importante en el balance hídrico que la demanda evapotranspirativa. Otras señales de temperatura en invierno (febrero) también son comunes en los pinares ibéricos.

#### Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI

El análisis de los efectos de la demanda evapotranspirativa a diferentes escalas temporales (Fig. 4.6) muestra un efecto significativo en el crecimiento anual. El mes de máxima intensidad es agosto para tres de las cuatro localidades, corroborando un período de crecimiento prolongado que incluye la mayor parte del verano. Solo difiere el caso de Sarnago, donde la señal se desplaza al mes de julio mostrando la existencia de un período de crecimiento más limitado en consonancia con las condiciones climáticas algo más secas de las sierras nororientales de la provincia.

**Figura 4.5.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejan correlaciones significativas. Los meses del mismo año de crecimiento en letras mayúsculas; área gris y minúsculas; área blanca para los del año anterior.





**Figura 4.6.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad.

La duración de la señal muestra además otras diferencias. En la zona más elevada la señal es de tres meses, en concordancia con las precipitaciones elevadas en el inicio de primavera, pero su amplitud temporal se va incrementando conforme descendemos altitudinalmente (cuatro meses en Pinar Grande y hasta seis meses en la población más meridional de Losana, lo que sugiere una

fuerte variabilidad en las precipitaciones primaverales en estas estribaciones orientales del Sistema Central. De nuevo, solo difiere de este patrón la localidad de Sarnago con una señal acumulada de dos meses (junio y julio), un patrón mucho más mediterráneo como corresponde a una zona alta y seca ya en el límite climático sur de esta especie. La intensidad de la señal de SPEI está dentro de un rango medio en todos los lugares desde un máximo de 0,49 en Pinar Grande hasta un mínimo de 0,418 en Santa Inés, el lugar menos limitado por la precipitación.



### *Modelos de crecimiento*

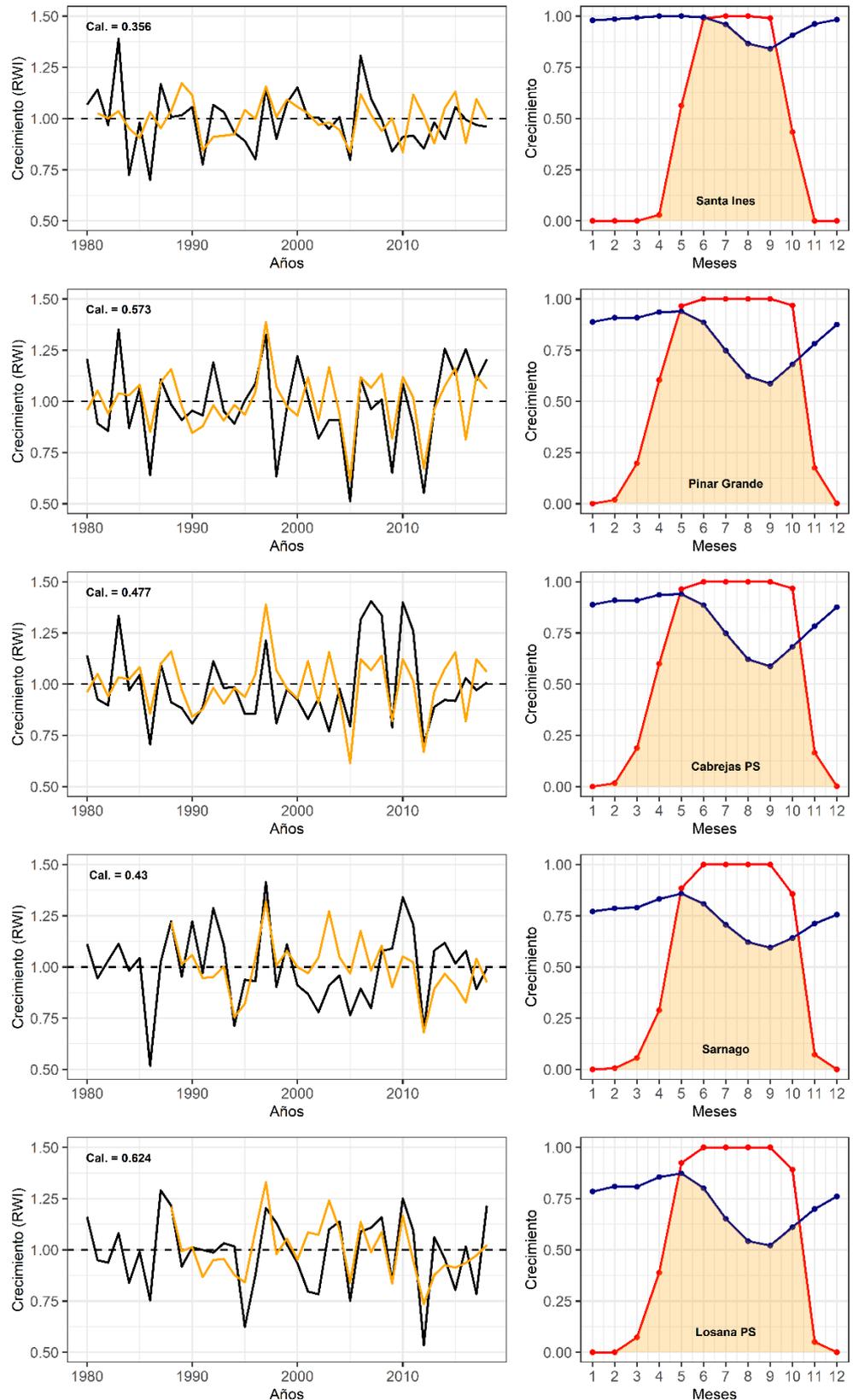
Las diferentes localidades se ajustaron de modo razonable a un modelo de Vaganov-Shashkin común (Fig.4.7). Con ajustes que van desde  $r = 0,62$  para Losana a valores más bajos de 0,356 en Santa Inés, lo que se corresponde con correlaciones medias-altas. Todos los modelos muestran una limitación térmica para el crecimiento desde el comienzo del año hasta abril-mayo, siendo más acusada en Santa Inés donde el crecimiento aún no se ha iniciado en abril; y en Sarnago, donde las condiciones térmicas de mayo aún no son óptimas. Posteriormente se observa un período de temperatura óptima que se extiende hasta octubre en las localidades más térmicas de Pinar Grande, pero no así en las demás, y en especial en la más elevada de Santa Inés.

La disponibilidad hídrica muestra un patrón contrario, con un óptimo en invierno y primavera y un déficit durante el período de crecimiento (el patrón típico mediterráneo). La limitación hídrica comienza en mayo en todas las localidades salvo en Santa Inés, donde se aprecia un ligero déficit en julio que se va incrementando durante el verano, presentando un mínimo de disponibilidad hídrica en septiembre en todas las localidades para irse recuperando según finaliza el verano. Es de remarcar que solo en Santa Inés hay condiciones de disponibilidad hídrica sin limitaciones en algún momento del año, de diciembre a mayo, mientras que en el resto de las localidades hay limitaciones climáticas en el crecimiento de los árboles en todo el momento del año. Si bien esto no tiene implicaciones directas en el crecimiento ya que las condiciones de invierno no afectan al modelo, sí que sugiere que la variabilidad interanual y estacional en las precipitaciones podría generar sequías en casi cualquier momento del año.

Por otra parte, dado que la mayor parte de la actividad de crecimiento se concentra en los meses de mayor duración del día (mayo-julio) se aprecia que la disponibilidad hídrica es el mayor factor limitante para el crecimiento de la especie en todas las localidades, incluso y aunque en menor medida, en la más fría y lluviosa. Este aspecto deberá ser considerado dado el contexto de clima futuro más seco que sin duda acrecentará estas limitaciones.



Figura 4.7. Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).





## 4. SABINA ALBAR (*Juniperus thurifera*)

### Resumen

Los sabinares albares son una de las formaciones más singulares de la Península Ibérica. Durante tiempo se pensó que su estructura abierta era consecuencia de las fuertes limitaciones climáticas y edáficas de las parameras que tienden ocupar. Sin embargo, en la actualidad se sabe que el aspecto de los sabinares albares es consecuencia de un manejo silvopastoral que limita el establecimiento de otras especies arbóreas y favorece el desarrollo de un pasto arbolado. El descenso de la ganadería extensiva junto al abandono de las prácticas tradicionales ha hecho que muchos de los sabinares albares empiecen a densificarse y a incluir otras especies de árboles, tanto quercíneas como pinos. Este cambio es de lejos el factor que más va a afectar a los sabinares albares durante este siglo y obligará a diseñar unas nuevas pautas de manejo. Las sabinas son especies de crecimiento lento, pero con una gran longevidad potencial. Su crecimiento anual depende fundamentalmente de las precipitaciones, especialmente la primaverales, si bien en las zonas con mayores tasas de crecimiento y sobre suelos más profundos (Berzosa y Judes) la respuesta del balance hídrico es a períodos de retorno más largos. El ajuste de los modelos es razonable, lo que indica que es una especie para la cual podremos modelizar la respuesta del crecimiento a futuras condiciones. En cualquier caso, el clima no parece un factor muy limitante para la especie, ya que es capaz de tolerar ambientes mucho más cálidos y secos como ocurre en los sabinares del Valle del Ebro.

### Contexto de la especie

Las formaciones de sabina albar (*Juniperus thurifera*) se encuentran entre las más singulares de la Península Ibérica. Los bosques de cupresáceas son raros en toda Europa, apareciendo únicamente en la Península Balcánica, donde sí hay formaciones de *Juniperus* y de *Cupressus*. De todas estas formaciones, los sabinares albares son los que mayor superficie ocupan, estando en su mayor parte en la Península Ibérica (Fig. 5.1), con poblaciones mucho más reducidas en el norte de África, sobre todo en la cordillera del Atlas, y de modo mucho más puntual en el norte de los Pirineos, estribaciones de los Alpes y Córcega.

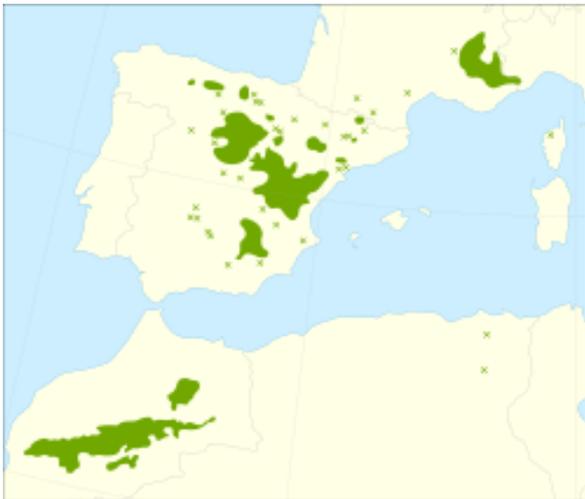
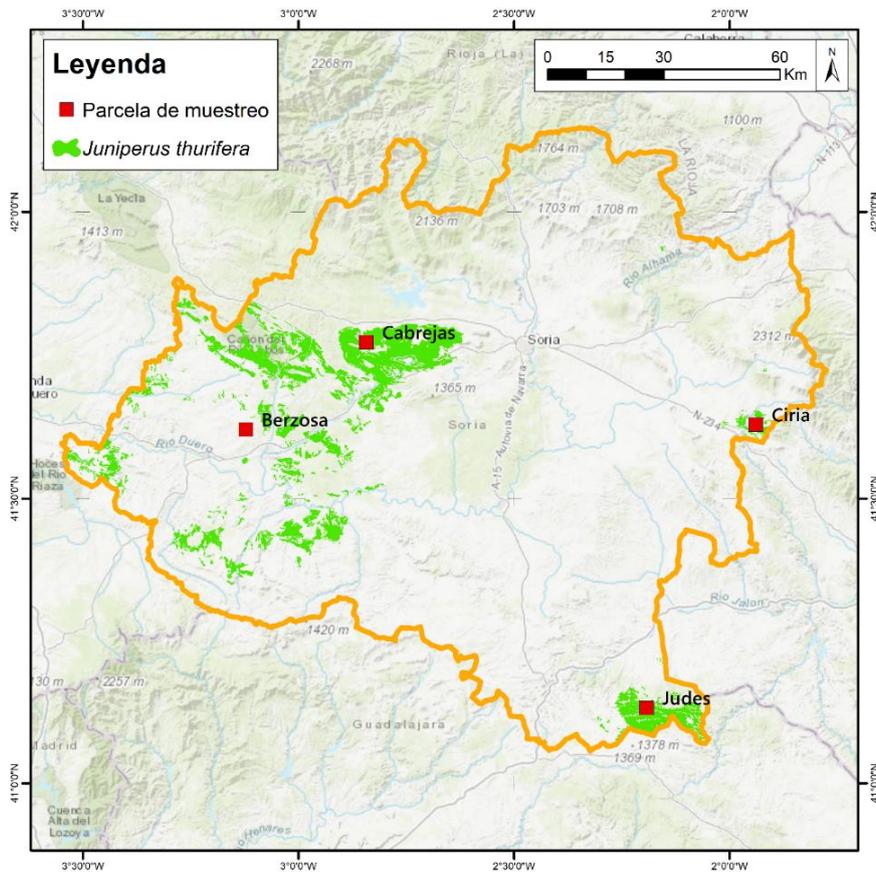


Figura 5.1. Distribución mundial de la sabina albar. Fuente: Wikipedia.

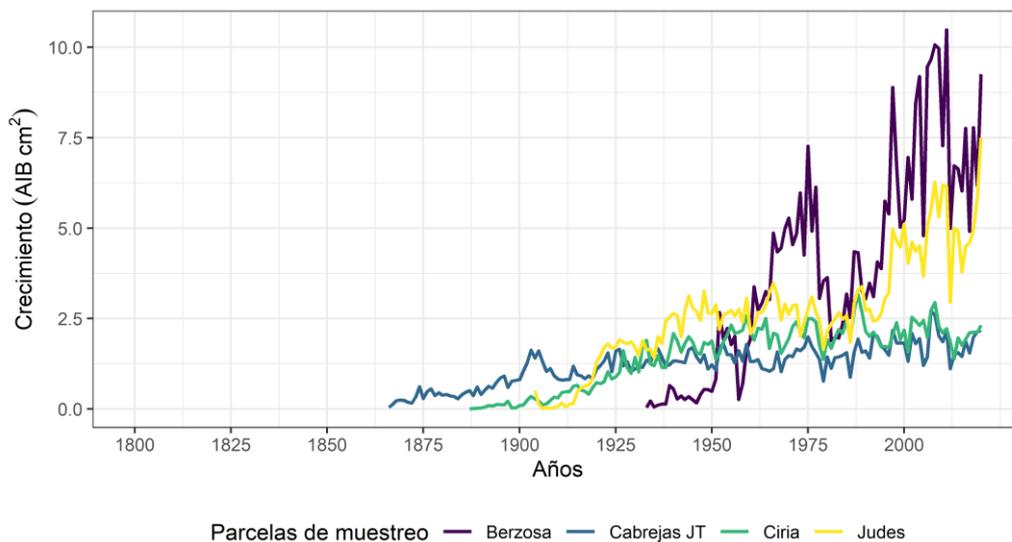
La estructura tradicional de los sabinares era la de un bosque abierto, con el suelo tapizado de pasto y con una cobertura rala de especies arbustivas, especialmente el enebro común (*Juniperus communis*). La presencia de otras especies arbóreas solía ser escasa, lo que se atribuyó a las condiciones climáticas tan continentales en que medraba esta especie. Sin embargo, esta concepción ha cambiado al constatarse que la estructura de los sabinares albares era consecuencia de un intenso uso ganadero que limitaba la presencia de otras especies arbóreas más tolerantes al ramoneo. La sabina albar era así utilizada no solo mediante pastoreo directo, sino también mediante un sistema de podas que permitía

alimentar al ganado en los períodos de escasez de pasto. La reducción de la carga ganadera combinada con otros factores como la desaparición de los usos tradicionales del suelo, la entrada de otras especies arbóreas de pináceas y fagáceas y un mayor reclutamiento de sabina albar, están provocando un cambio en la estructura de los sabinares que avanza hacia una densificación y diversificación de la masa forestal (Olano et al. 2008; 2011). Este hecho será sin duda el aspecto más crítico para predecir el futuro de los sabinares albares por cuánto va a alterar los procesos competitivos en esta formación, pudiendo aparecer fenómenos hasta ahora ausentes como incendios debido a la actual ausencia de continuidad en el combustible. Por el contrario, el clima no parece un factor muy limitante para la especie, ya que es capaz de tolerar contextos



mucho más cálidos y secos que los predominantes en la provincia de Soria, como ocurre en los sabinares del Valle del Ebro. Los sabinares albares tienen una representación muy extensa en la provincia de Soria (Fig. 5.2). La formación más amplia ocupa las parameras calizas de la Sierra de Cabrejas y sus estribaciones en lo que constituye, junto con las extensiones burgalesas, uno de los mayores sabinares albares mundiales. En condiciones semejantes de paramera caliza aparecen los sabinares orientales, de la comarca de Ciria-Borobia al sur del Moncayo y las parameras de la comarca de Judes-Chaorna. De un modo menos continuo aparecen los sabinares de toda la comarca de Osma, también sobre suelos básicos, pero más profundos y ricos en arcillas.

**Figura 5.2.** Distribución de la especie en la provincia de Soria y parcelas de muestreo



**Figura 5.3.** Evolución del crecimiento medio (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo de sabina albar.



Tabla 5.1. Tabla de las características de las parcelas de muestreo de la sabina albar.

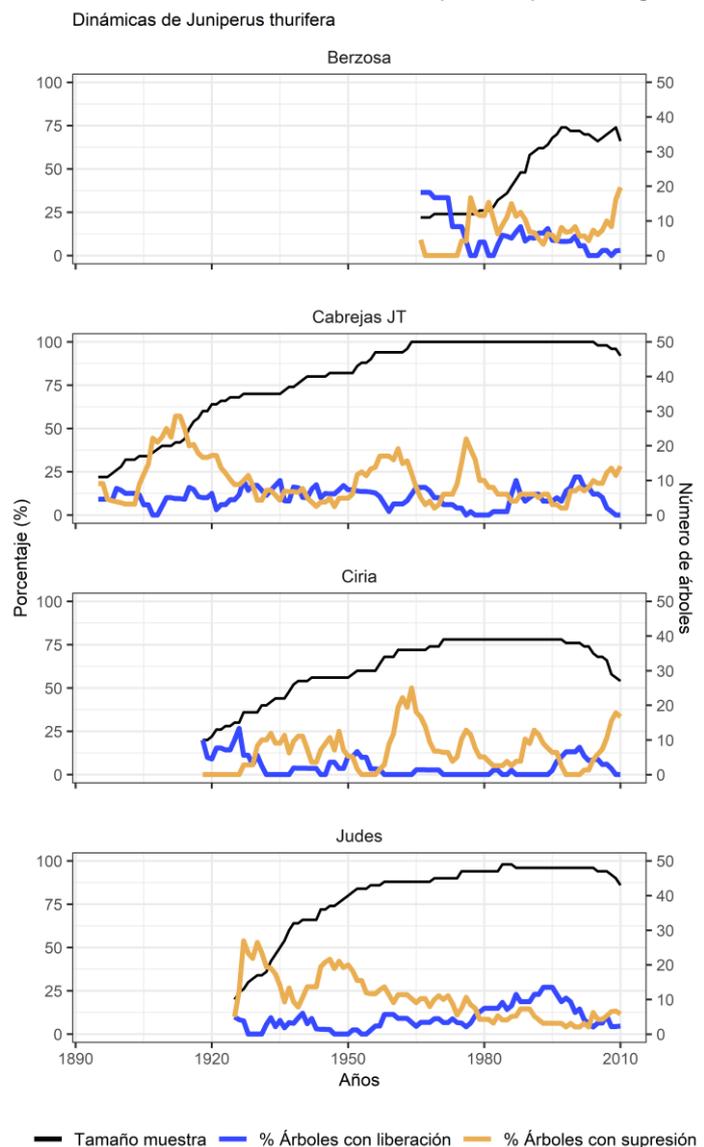
Localidad	Altitud (m)	Edad media	Árbol más joven	Árbol más viejo
Berzosa	975	46,5	13 (2008)	88 (1933)
Cabrejas	1142	111,8	66 (1955)	155 (1866)
Ciria	1030	95	59 (1962)	115 (1906)
Judes	1253	91	46 (1975)	115 (1906)

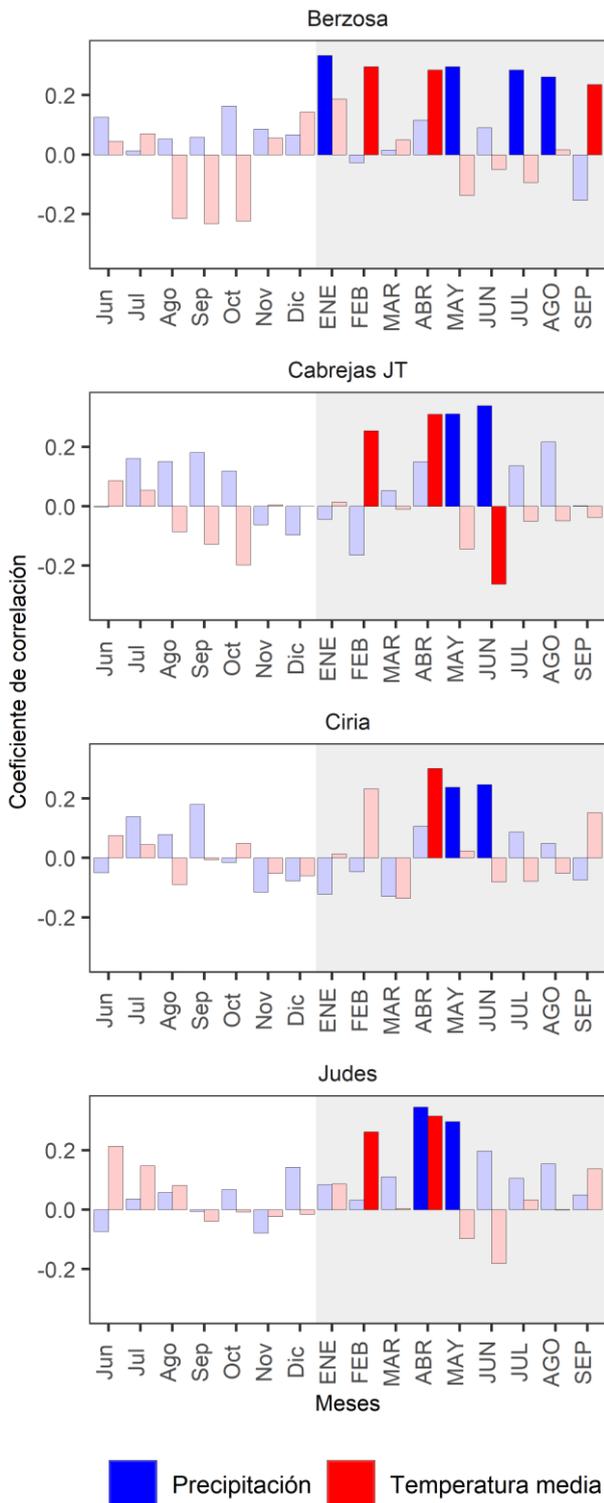
## Selección de las parcelas y características

El muestreo de sabinares ha tratado de reflejar la diversidad de situaciones en que aparecen estas formaciones (*Fig. 5.2*), incluyendo formaciones en las principales masas de sabinar (Cabrejas, Judes, Ciria), así como una población en los sabinares dispersos del sudoeste. Exceptuando esta última localidad que contiene árboles relativamente jóvenes, los sabinares tienen una edad media próxima al siglo, sin la presencia de individuos muy longevos ya que el más viejo muestreado tiene 155 años. Sin embargo, el crecimiento tan excéntrico de las sabinas albares hace que frecuentemente se subestime su edad por no poder llegar al centro, por lo que las edades reales de los árboles pueden variar ligeramente. Estas edades son coherentes con unos aprovechamientos del territorio muy reducidos y turnos de corta bastante largos.

**Figura 5.4.** Eventos de supresión y liberación para las diferentes parcelas de la sabina albar

El crecimiento basal medio de las especies del género *Juniperus* es muy reducido. Esto se debe a que su sistema de transporte de savia es sumamente conservador, con traqueidas de diámetro muy pequeño, lo que limita la capacidad de transporte de agua y, por consiguiente, de crecimiento. Además, las sabinas predominan en suelos muy someros con condiciones especialmente restrictivas, lo que limita mucho el crecimiento potencial. Sin embargo, cuando se encuentran en suelos más profundos su crecimiento es más elevado, sin llegar a alcanzar las mismas tasas que los pinos. En la *figura 5.3* se observa cómo, de forma general, el incremento en área basal es reducido. Estas tasas tan reducidas de crecimiento por árbol se magnifican si consideramos que los sabinares suelen tener densidades de pies más baja que otros bosques, lo que implica que la superficie ocupada por los árboles en estos paisajes sea bastante pobre. Destaca la localidad de Berzosa por ser un sabinar más joven desarrollado sobre suelos de más calidad, donde en los años más favorables la media de incremento de área basal por árbol puede ser de 10 cm<sup>2</sup>, frente a estos sitios Cabrejas y Ciria apenas alcanzan los 2.5 cm<sup>2</sup> de media por árbol.





A diferencia de los pinares, los sabinares no han estado sujetos a planes de ordenación sistemáticos, sino a un manejo tradicional vinculado al uso ganadero del que muchas veces carecemos de registros escritos. Además, en esta especie era común el corte del ramón para ganado durante los períodos en que escaseaba el pasto (verano, invierno). Por ello, interpretar las gráficas de liberación-supresión (Fig. 5.4) resulta complejo. Se aprecian supresiones en los períodos de mayor reclutamiento, lo que sugiere un efecto de competencia entre los diferentes individuos. Competencia que, probablemente, ocurre a nivel de suelo por la adquisición de agua y nutrientes, ya que las copas rara vez entran en contacto. Las liberaciones son escasas y muy distribuidas en el tiempo, lo que sugiere que estas responden a procesos que ocurren de forma puntual a ciertos grupos de árboles más que a una escala de parcela (Fig. 5.4).

**Figura 5.5.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejan correlaciones estadísticamente significativas. Los meses están divididos en meses pertenecientes al mismo año de crecimiento (letras mayúsculas; área gris) y en meses del año anterior al año de crecimiento (letras minúsculas; área blanca).

## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

Los sabinares albares responden favorablemente a las precipitaciones durante el período de crecimiento (Camarero et al. 2014). Esta señal aparece con intensidad en mayo en todas las localidades (Fig. 5.5) uniéndose generalmente a otros meses, como abril en la localidad más meridional, junio en las más septentrionales y por un período más alargado en la localidad de Berzosa dado que es un ambiente más cálido con suelos más profundos. Se constata que la disponibilidad hídrica durante el período de máxima actividad cambial es clave para aumentar la producción de madera. En Cabrejas del Pinar se aprecia un efecto negativo de la temperatura de junio, un indicador de que la disponibilidad de agua está fuertemente condicionada por las dinámicas de evapotranspiración a nivel de árbol y suelo, con años muy cálidos que generan un menor aprovechamiento hídrico. Por el contrario, la temperatura de abril ejerce

un efecto muy positivo, ya que las primaveras más cálidas provocan un inicio más temprano de la producción de madera, permitiendo no solo temporadas de crecimiento más largas, sino desplazando parte del crecimiento a la primavera temprana cuando las condiciones hídricas son más adecuadas.



Finalmente, aparecen señales positivas de las temperaturas en febrero en tres localidades, un factor que se ha asociado a condiciones más adecuadas para la fotosíntesis durante el final del invierno lo que provoca una mayor acumulación de reservas para el crecimiento del año siguiente. Llama profundamente la atención el largo período de respuesta climática en la población de Berzosa, que es mucho más largo que la señal normal de los sabinars, y que merece un estudio diferenciado, ya que concurren varios factores: árboles jóvenes, suelos de material blando, menor altitud y clima algo más seco, que podrían explicar este comportamiento. En todo caso, este resultado es coherente con la gran plasticidad del crecimiento de la sabina albar, que es capaz de interrumpir y reanudar la actividad cambial varias veces a lo largo de la estación de crecimiento para aprovechar los pulsos de lluvia estival.

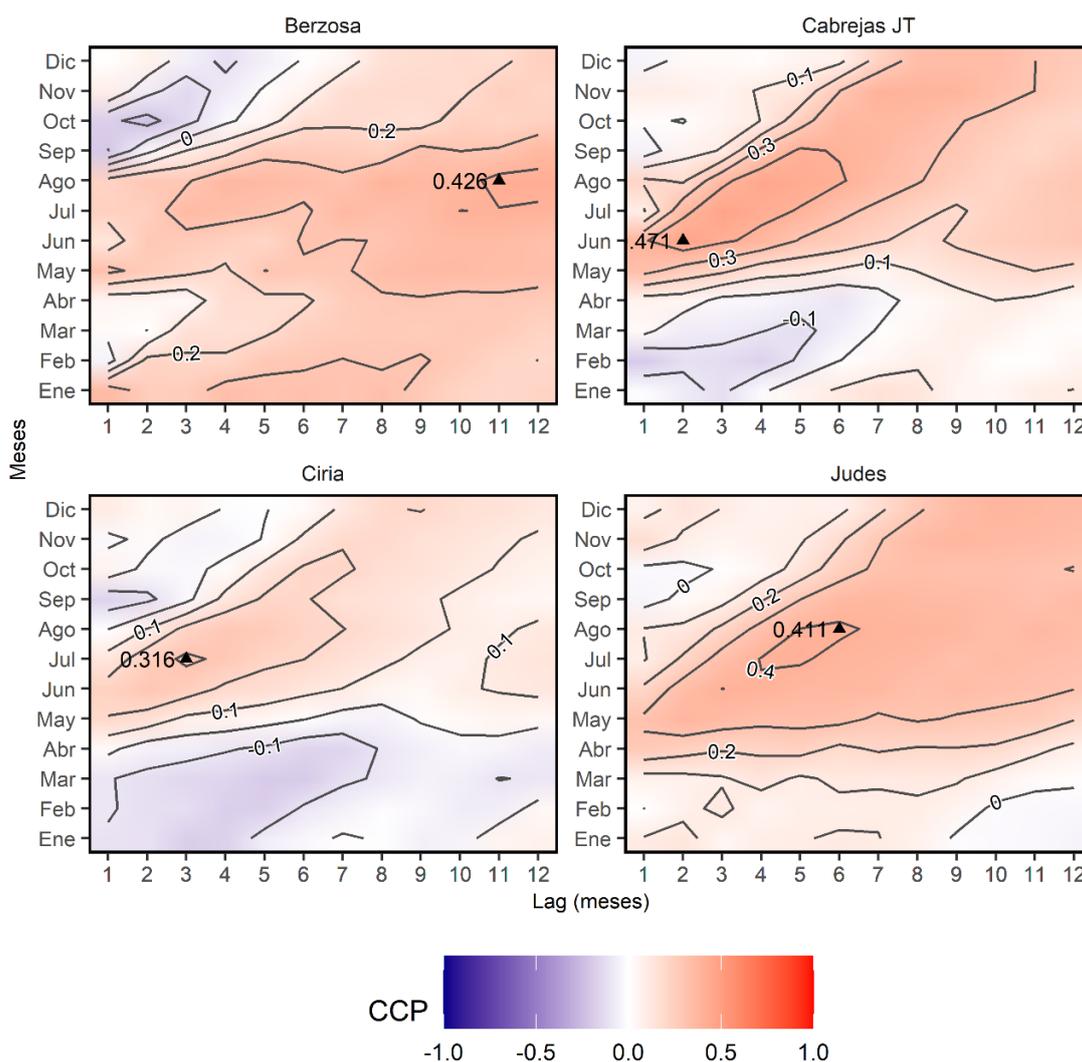


Figura 5.6. Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad.

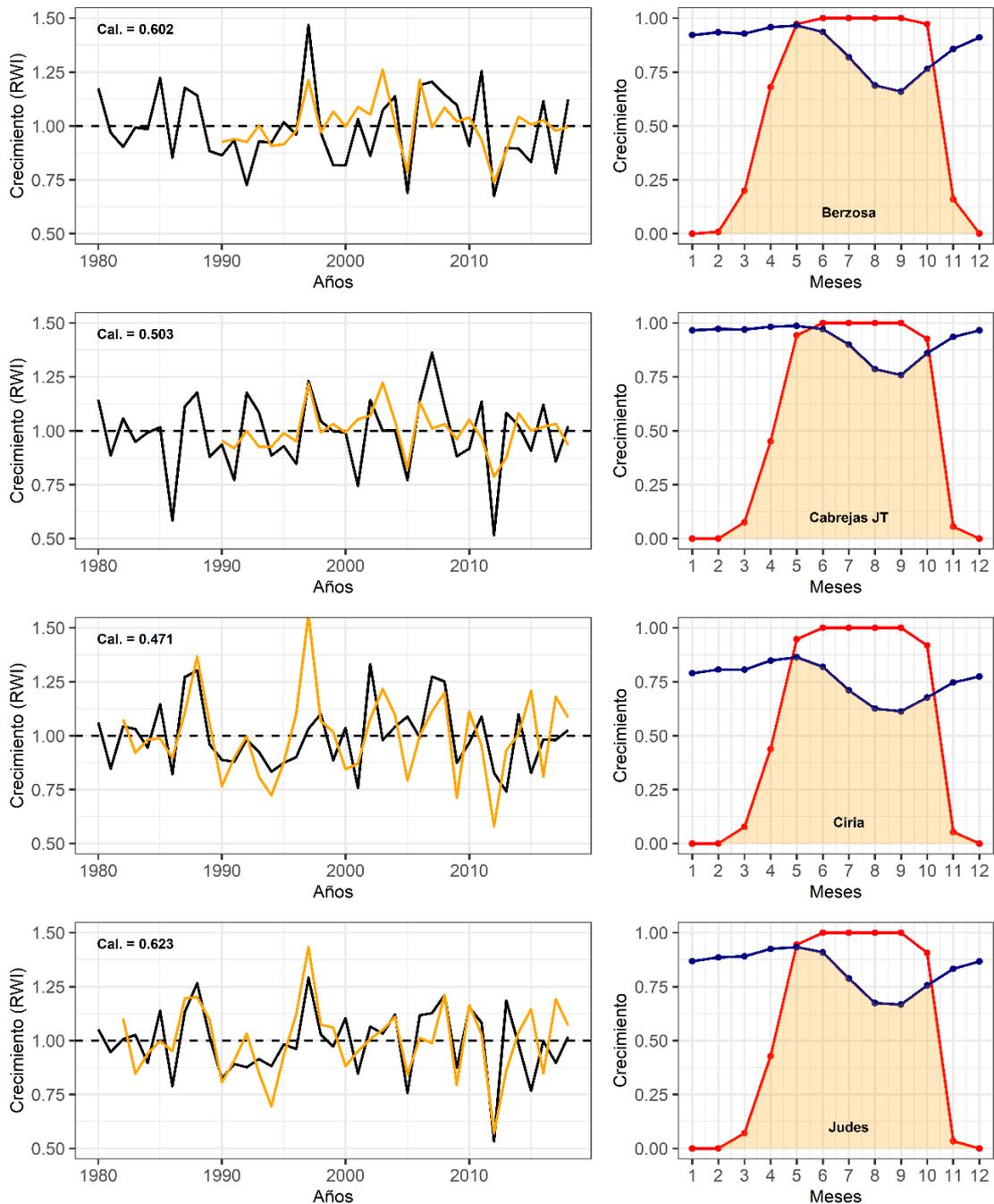


### *Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI*

El análisis de los efectos de la demanda evapotranspirativa a diferentes escalas temporales (*Fig. 5.6*) muestra un efecto significativo de esta en el crecimiento anual, si bien con notables diferencias regionales. La intensidad del efecto va desde muy bajo en Ciria (10.7%) hasta moderado en Cabrejas (22.2%). En las localidades más septentrionales, que se caracterizaban por tener señales significativas de mayo-junio, las señales del SPEI aparecen en junio-julio con un período de acumulación de dos o tres meses, es decir, comenzando en mayo. En estos lugares de primaveras más lluviosas y en suelos más someros, no hay un efecto de acumulación de agua en el suelo sobre las respuestas de los árboles, y responden al balance hídrico únicamente durante el período de crecimiento. Sin embargo, en las localidades más meridionales, este período se amplía. Así en Judes la señal máxima se encuentra en seis meses a partir de agosto (marzo-agosto), mientras que en Berzosa el período es aún más largo, 11 meses a partir también de agosto, es decir, octubre-agosto. Esta señal es coherente con lo que se esperaría de la especie en ambiente más xérico, con suelos más profundos capaces de retener mejor la humedad, y es lo que se observa en otras especies con mayor tolerancia a la sequía como el pino carrasco. Es posible que este sea el comportamiento de los sabinars albares del sudoeste de la provincia sobre materiales blandos.

### *Modelos de crecimiento*

Los modelos de crecimiento Vaganov-Shashkin (*Fig. 5.7*) logran correlaciones moderadas sobre el crecimiento de los árboles (22.2% a 38.1%), si bien no son capaces de capturar todas las variaciones. En general todas las zonas muestran que no es hasta el mes de mayo cuando se consiguen condiciones subóptimas de temperatura (el óptimo siempre es en junio). En Cabrejas del Pinar, las condiciones hídricas medias son favorables hasta el mes de mayo-junio, si bien con una gran variabilidad (no apreciable en la gráfica). En el resto de las localidades hay un déficit desde el inicio de período óptimo de temperatura que va aumentando a lo largo del verano, hasta el mes de septiembre. El inicio de la recuperación hídrica en octubre coincide con un descenso de las condiciones térmicas, por lo que las oportunidades para un crecimiento al final del verano son reducidas, siendo las tasas de crecimiento en este período además mucho más bajas (*Camarero et al. 2010*). Llama la atención el modelo de la población de Berzosa, ya que la limitación hídrica durante el período de reposo parece menor que en otras ubicaciones como Ciria, a pesar de que todo el resto de los análisis sugieren una necesidad de acumulación hídrica durante un período dilatado.



**Figura 5.7.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).

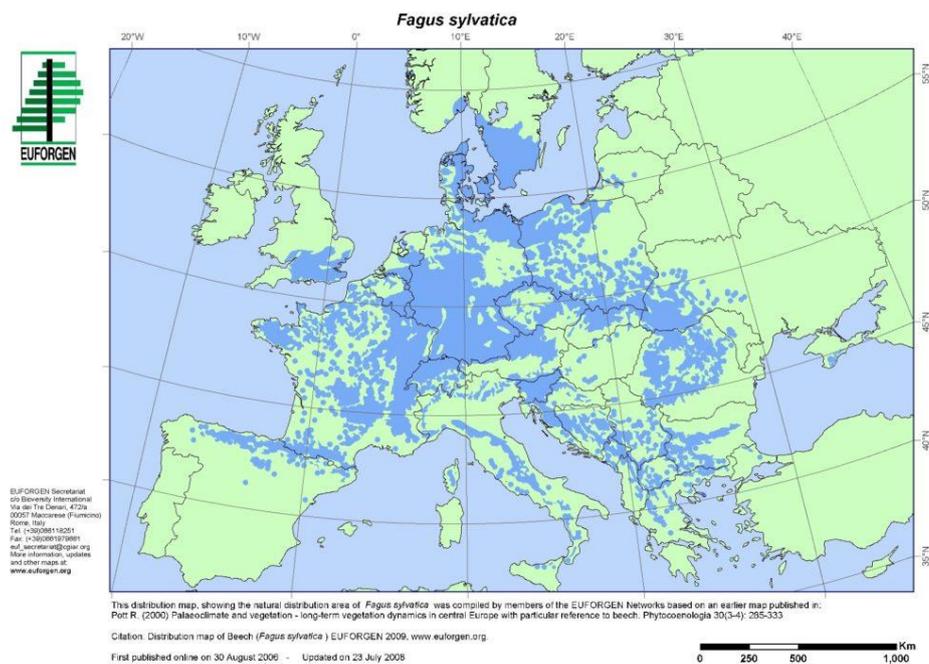


## 5. HAYA (*Fagus sylvatica*)

### Resumen

Los hayedos se encuentran en el límite meridional de su rango de distribución geográfico en la provincia de Soria (al sur de ella solo hay poblaciones aisladas). Es el bosque más exigente en humedad ambiental de todos los estudiados. De hecho, su distribución está fuertemente constreñida por la disponibilidad de agua, especialmente durante el período de crecimiento. Por ello, la mayor parte de estos bosques se refugian en altitudes elevadas y orientaciones norte. Tradicionalmente, los hayedos se han aprovechado para madera, con turnos algo más largos que el pino silvestre con el que conviven, y su aprovechamiento ha sido menos sistemático e intenso. Esto ha permitido la presencia de individuos bastante longevos, por ejemplo, en este trabajo se encontró un individuo de 368 años. Entre las perspectivas futuras de los hayedos planteamos una disminución de su aprovechamiento debido a su rareza y a que se trata de bosques de gran valor ecológico en el contexto regional. Los crecimientos medios de las masas son bajos en sus inicios y dependen de las pautas de manejo. Las cortas intermedias aumentan notablemente el crecimiento de los individuos y favorecen el reclutamiento, si bien las cortas muy intensas no son deseables por poder generar condiciones de excesiva luminosidad dentro de la masa.

El análisis del control climático de la especie arroja resultados sorprendentes. A pesar de ser una especie con su distribución restringida por las condiciones hídricas, no aparecen señales climáticas durante los meses de crecimiento, algo sorprendente en un contexto próximo al mediterráneo. Sin embargo, sí hay un efecto de las condiciones del verano del año anterior, lo que sugiere que el crecimiento depende en gran medida de las reservas acumuladas en el año previo. Sin embargo, los años con crecimientos más bajos aparecen ligados a episodios de heladas primaverales tardías que hacen perder todos los brotes del follaje y con ello el tejido fotosintético. Estos eventos, además, han aumentado en intensidad y en las últimas décadas, especialmente en los hayedos de mayor altitud, debido al calentamiento climático y al aumento de la variabilidad térmica. Los modelos de crecimiento de la especie arrojan resultados muy pobres debido al escaso control de las condiciones del año en curso. Otro aspecto a considerar es el impacto de las cortas intensas sobre la capacidad de regeneración de la especie, al reducir la umbría necesaria para el reclutamiento, y la necesidad de excluir el ganado y los ungulados silvestres de la zona de regeneración.



**Figura 6.1.** Mapa de distribución mundial del haya. Fuente EUFORGEN.



## Contexto de la especie

El haya alcanza su límite sudoccidental de distribución mundial en la Península Ibérica. Los hayedos de la provincia de Soria se encuentran entre los más meridionales de España, siendo superados únicamente por los hayedos aislados y de pequeña extensión del Sistema Central y Puertos de Beceite. Este motivo hace que los hayedos sorianos tengan un gran valor biogeográfico y de conservación por tratarse de un tipo de bosque común en otras latitudes que alcanza en nuestro territorio sus últimas manchas extensas.

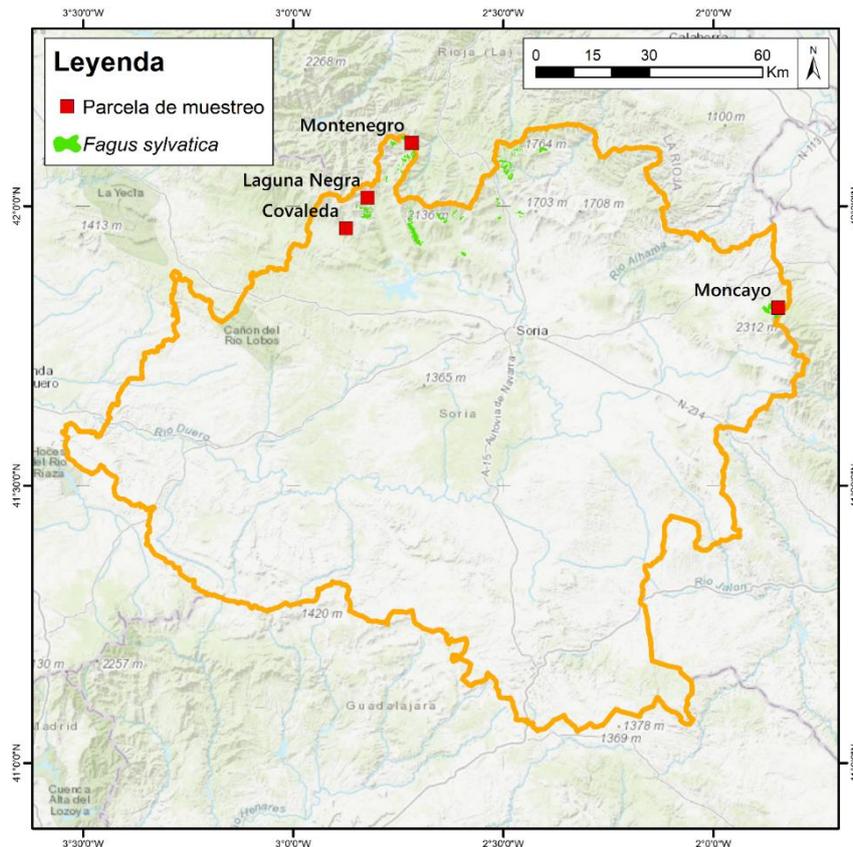


Figura 6.2. Mapa de distribución del haya en la provincia de Soria

Como corresponde a las especies que alcanzan su límite sur de distribución en el norte de la Península Ibérica (Fig. 6.1), la disponibilidad hídrica es el factor que más limita el crecimiento y la persistencia de la especie. Este hecho es muy acusado en el caso del haya que necesita abundantes precipitaciones a lo largo de todo el año, pero sobre todo durante el período de crecimiento vegetativo, con una tolerancia muy baja a la sequía. Por ello, para hacer frente a las limitaciones hídricas características del macroclima mediterráneo, los hayedos sorianos se refugian principalmente en zonas de montaña y orientaciones norte, con mayores precipitaciones y propensas a la aparición de nieblas topográficas que atenúan notablemente la xericidad del clima. Así, los hayedos sorianos aparecen fundamentalmente ligados a zonas elevadas del Sistema Ibérico y Sierra del Moncayo (Fig. 6.2), donde ocupan extensiones significativas llegando en muchos casos hasta la línea arbolada superior de estos sistemas montañosos. La extensión potencial de los hayedos es probablemente mayor, ya que algunos de los pinares de pino silvestre crecen sobre zonas donde podrían desarrollarse los hayedos si cesara la pauta de manejo forestal actual.

El aspecto de los hayedos difiere notablemente de la mayor parte de los bosques mediterráneos. El importante dosel de las hayas limita notablemente la entrada de luz al interior de bosque, por lo que generan ambientes umbríos donde las plantas que se desarrollan son muy escasas, generando espacios abiertos donde resulta fácil caminar.

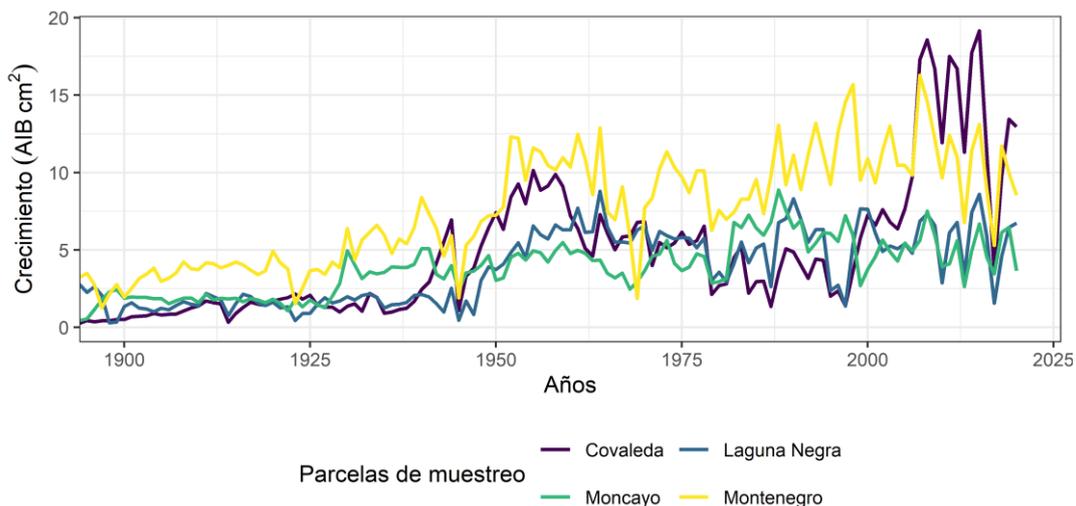


Por otra parte, su elevada producción de hojas genera en otoño una gran cantidad de hojarasca que se acumula en el suelo, a veces con un grosor importante, lo que añade otra limitación adicional para el establecimiento de otras plantas vasculares. Sin embargo, las condiciones de fuerte humedad de los hayedos favorecen el establecimiento de plantas no vasculares, tanto musgos y hepáticas como líquenes, que se desarrollan con profusión sobre troncos y rocas, especialmente en los hayedos en zonas más húmedas y en aquellos con mejor estado de conservación.

Gran parte de los hayedos se han manejado históricamente para la obtención de madera. Los turnos son relativamente largos superiores a los 100 años, aunque parece que la tendencia actual es a un menor aprovechamiento de estos bosques debido a la conciencia de su gran valor ecológico.

**Tabla 6.1. Características de las parcelas muestreadas del haya**

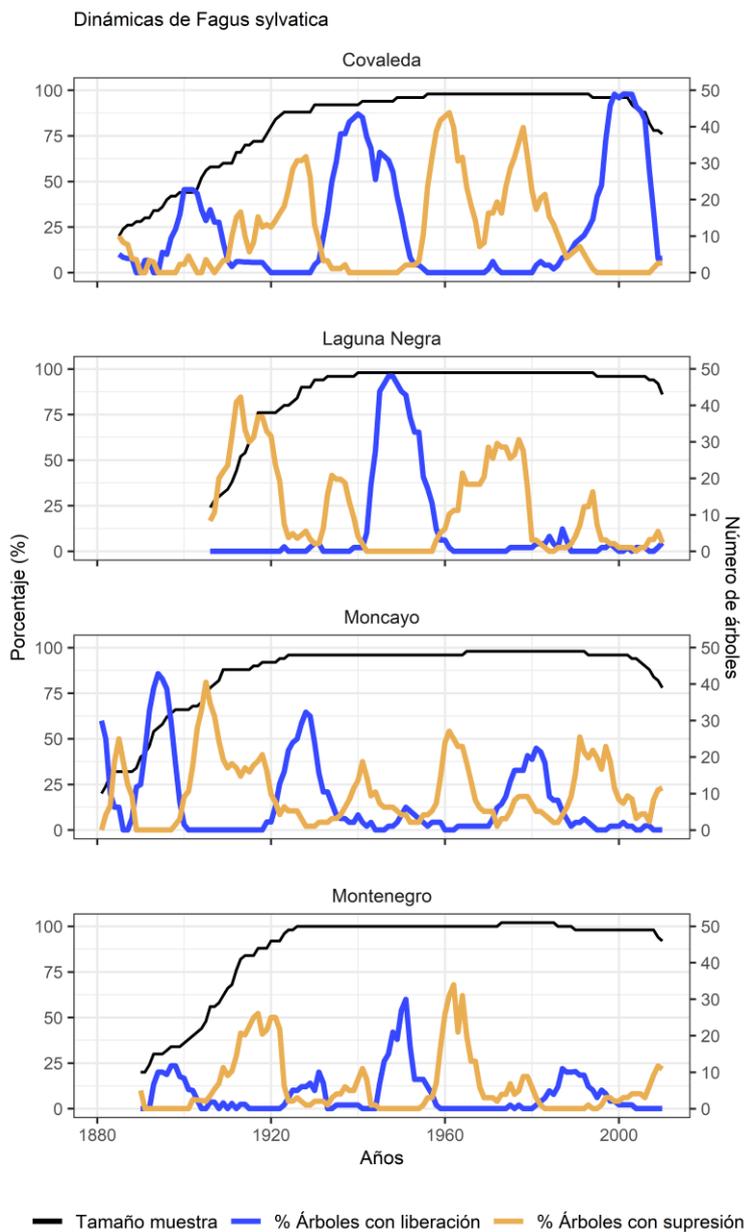
Sitio de muestreo	Altitud (m)	Edad media árboles (Años)	Edad árbol más joven	Edad árbol más viejo
Covaleda	1577	123,4	74 (1947)	137 (1884)
Laguna Negra	1562	125,2	57 (1964)	368 (1653)
Moncayo	1159	135	65 (1956)	163 (1858)
Montenegro	1215	131	57 (1964)	230 (1791)



**Figura 6.3. Evolución del crecimiento medio del haya (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo**

## Selección de las parcelas y características

El muestreo de hayedos ha tratado de reflejar la diversidad de situaciones en que aparecen los hayedos (Fig. 6.2) incluyendo bosques tanto del Sistema Ibérico como del Moncayo. En el Sistema Ibérico se han escogido poblaciones septentrionales y bajas como en Montenegro de Cameros, de orientación sur, como en Covaleda y a altitudes más elevadas como en La Laguna Negra. Las edades medias de estos bosques son bastante elevadas, entre los 120 y 130 años, con algunos árboles extremadamente longevos con un haya con 368 años encontrada en la localidad situada en la carretera de subida a la Laguna Negra (Tabla 6.1). Estas edades tan elevadas en bosques manejados se deben a varios factores: el turno más largo del hayedo, la no aplicación de cortas a hecho sino a la extracción de árboles, a la gran heterogeneidad en el crecimiento de los individuos y por último a un manejo menos sistemático que en los pinares.



Los crecimientos basales medios de los árboles (*Fig. 6.3*) son bajos en la mayor parte de su vida (< 5 cm<sup>2</sup>), aumentando en los períodos en los que los árboles son más grandes (con densidades más bajas). Llamaman la atención los crecimientos en Montenegro y también en Covaleda. En este último caso, se trata de la respuesta a una corta muy intensa que propició una fuerte reducción de competencia.

Los gráficos de liberaciones-supresiones (*Fig. 6.4*) reflejan los aprovechamientos tradicionales de estos bosques que se hacían generalmente por cortas de parte de la masa, generando liberaciones que favorecían un mayor crecimiento de los supervivientes y un mayor reclutamiento de individuos, algo que conducía a periodos de mayor competencia como se observa en las supresiones. Las cortas más intensas se reflejan en mayores crecimientos como por ejemplo en la corta previa a 1950 en la Laguna Negra o la corta en la primera década de los 2000 en Covaleda.

**Figura 6.4.** Eventos de supresión y liberación para las diferentes parcelas del haya.

## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

Las correlaciones crecimiento-clima en hayas resultan muy llamativas por la ausencia de fuertes limitaciones al crecimiento durante el año en curso (*Fig. 6.5*). Sí existen efectos negativos de la precipitación en marzo en Moncayo y Montenegro y positivos de la precipitación de abril y la temperatura de mayo en la

localidad más elevada (Laguna Negra), mientras que en la localidad meridional de Covaleda hay un efecto negativo de la precipitación de enero (en forma de nieve en su mayoría) al igual que ocurre en la Laguna Negra. Por el contrario, llama la atención que en tres de las cuatro localidades las precipitaciones durante junio y julio del año anterior estén asociadas a un mayor crecimiento en el año siguiente. Esta señal que también se ha detectado en otros trabajos (*Olano et al. 2022*) se ha explicado como un efecto positivo de las precipitaciones estivales sobre la actividad fotosintética, y, en consecuencia, sobre la acumulación de reservas (carbohidratos) por parte de los árboles, lo que permitiría una actividad de crecimiento más intensa durante el breve período en que estos árboles crecen en nuestras zonas de estudio (*Martínez del Castillo et al. 2019*). Por ello, el clima tendría un efecto retardado en el crecimiento. Sí hay evidencias de que las condiciones climáticas durante el período de crecimiento tienen un fuerte impacto en las condiciones anatómicas de los vasos, y, por tanto, en sus sistemas de conducción de agua y sales minerales a las hojas.



### Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI

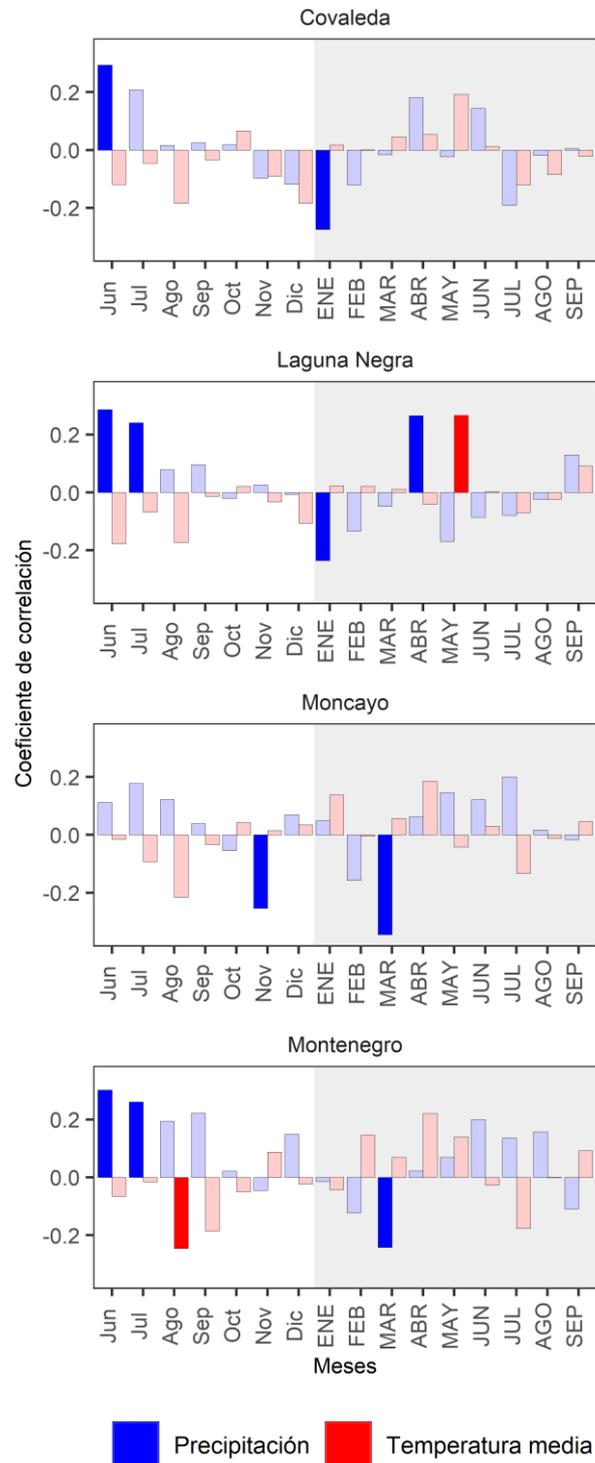
La limitada señal de las condiciones climáticas durante el año en curso se refleja también en las gráficas de SPEI que muestran correlaciones muy bajas y no significativas para tres de las cuatro localidades con un patrón muy errático (Fig. 6.6). Todo esto confirma que las condiciones durante el año en curso no afectan a la variabilidad interanual en el crecimiento de las hayas. Esto no implica que no existan limitaciones climáticas, sino que ocurren durante el año previo como se aprecia en la gráfica de relaciones crecimiento-clima mensuales (Fig. 6.5).

**Figura 6.5.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejas correlaciones estadísticamente significativas. Los meses están divididos en meses pertenecientes al mismo año de crecimiento (letras mayúsculas; área gris) y en meses del año anterior al año de crecimiento (letras minúsculas; área blanca).

### Modelos de crecimiento

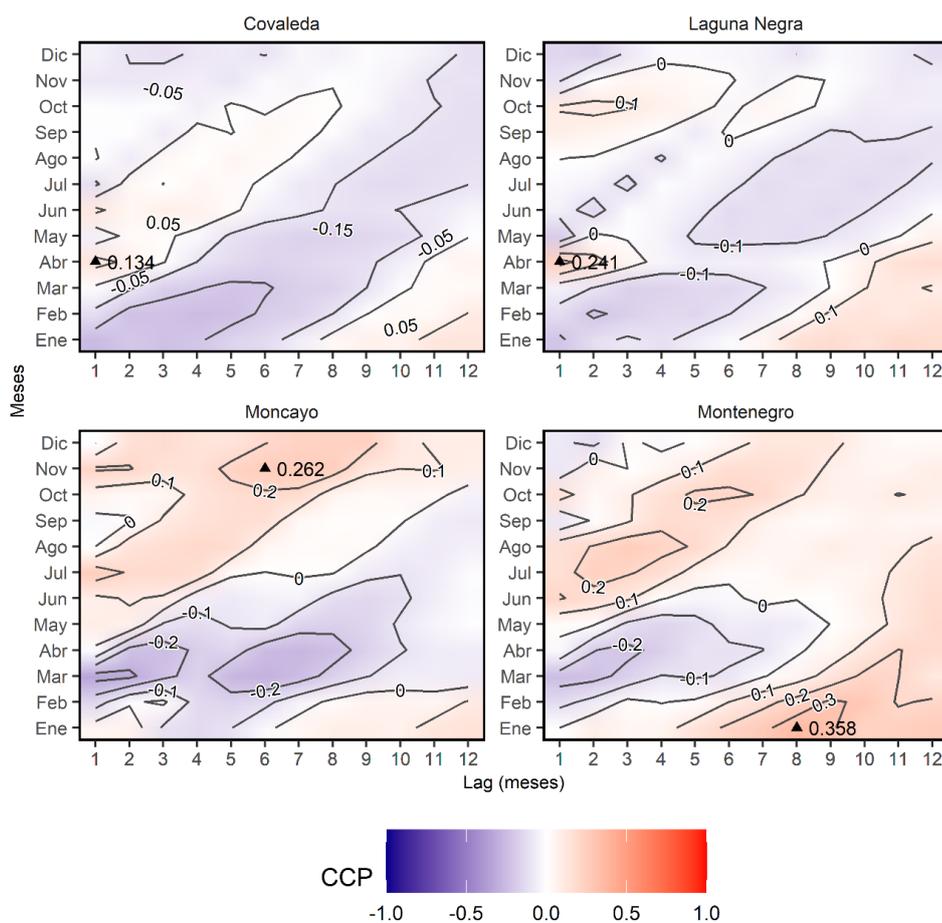
Los modelos de crecimiento de Vaganov-Shashkin corroboran la limitada respuesta del haya a las condiciones climáticas de precipitación u temperatura del año de crecimiento como se observa en los valores de las varianzas explicadas por el modelo, extremadamente bajas, entre el 5.1 y el 12.3%, lo que refleja la total incapacidad de este modelo para predecir los crecimientos. Lo que sí queda bien señalado es la fuerte constricción térmica del crecimiento de estos hayedos con condiciones térmicas que no se tornan óptimas hasta junio, siendo el mes de mayo subóptimo solo en las localidades menos frías (Montenegro y Moncayo) y con un septiembre muy frío para las localidades de Covalada y Laguna Negra (Fig. 6.7). Por el contrario, parece que la precipitación no es un factor limitante en ninguno de los meses, hecho inédito para las otras especies que crecen en Soria y que refleja la preferencia de los hayedos por los hábitats más húmedos.

Esto no implica que en algunos años aparezcan sequías que reduzcan notablemente el crecimiento del año y den lugar a fuertes descensos del crecimiento. Sin embargo, gran parte de la variabilidad en el crecimiento del haya está condicionada en muchos casos por la presencia de heladas tardías que producen la defoliación de toda o gran parte de la copa del árbol durante la primavera lo que se traduce en un crecimiento mucho menor. La literatura muestra heladas tardías en los años 2010, 2013 y 2017 en diferentes hayedos de la zona de estudio (Olano et al. 2021; Sangüesa-Barreda et al. 2021), con una frecuencia que parece que va en aumento debido al efecto combinado del adelantamiento

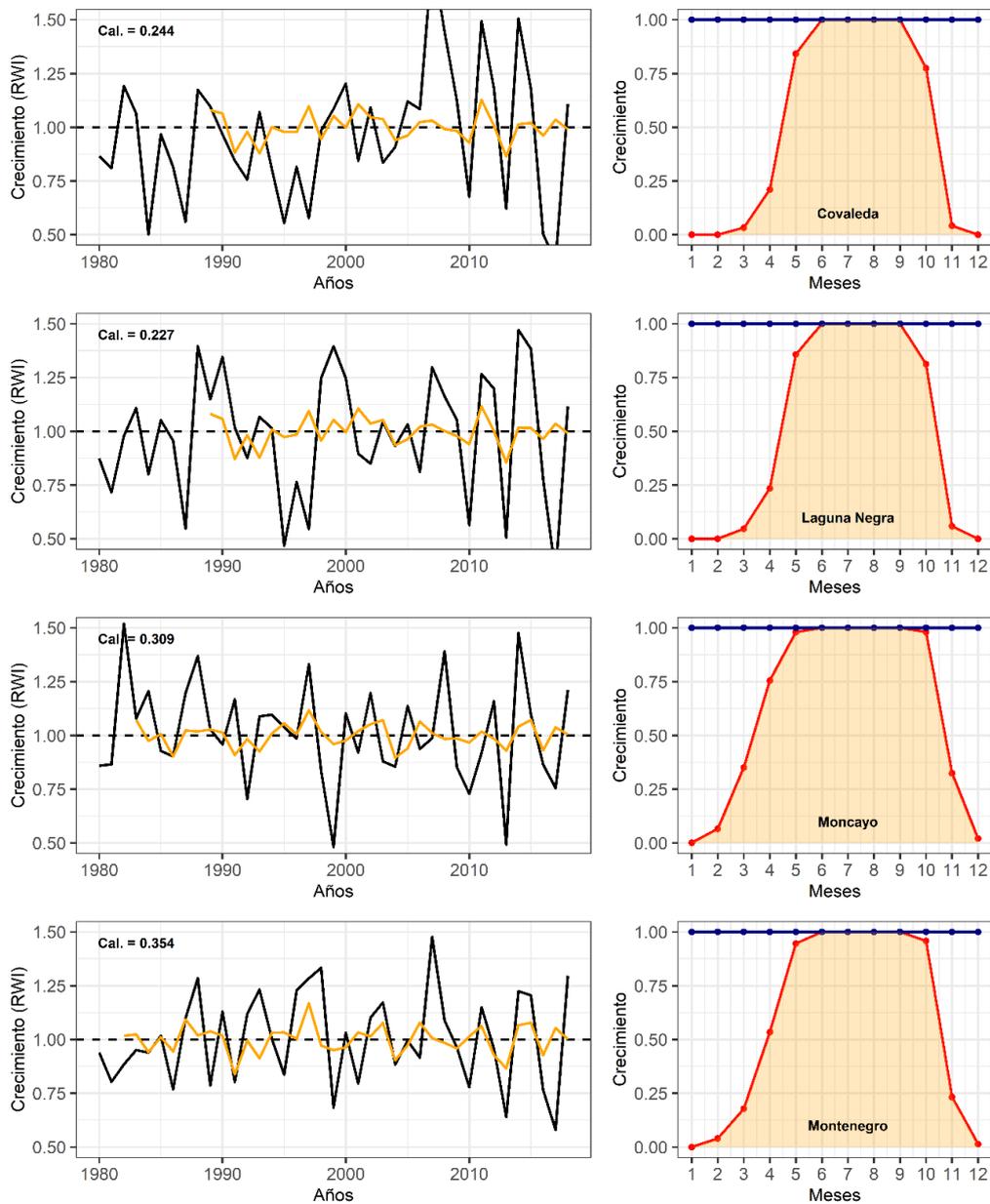




de la primavera y una mayor variabilidad térmica. Por otra parte, es posible que la presencia de estos eventos distorsione la señal climática asociada a las precipitaciones del año en curso, ocultando así potenciales limitaciones hídricas por sequías. Aparentemente la recuperación tras estos eventos de defoliación parece rápida, no obstante, no queda claro si la mayor frecuencia de recurrencia de estas heladas en la última década podría superar la capacidad de recuperación de los individuos y causar daños más graves. Otro aspecto a considerar es el impacto de las cortas muy intensas en los hayedos ya que podrían limitar la regeneración de la especie que necesita condiciones de umbría para garantizar la supervivencia de los pies más jóvenes. En este caso destacan las cortas intensas en el límite sur de la especie en Covaleda donde se redujo excesivamente la densidad del hayedo y, además, tampoco se ha limitado el acceso del ganado lo que se traduce en una presión muy importante sobre la especie.



**Figura 6.6.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad.



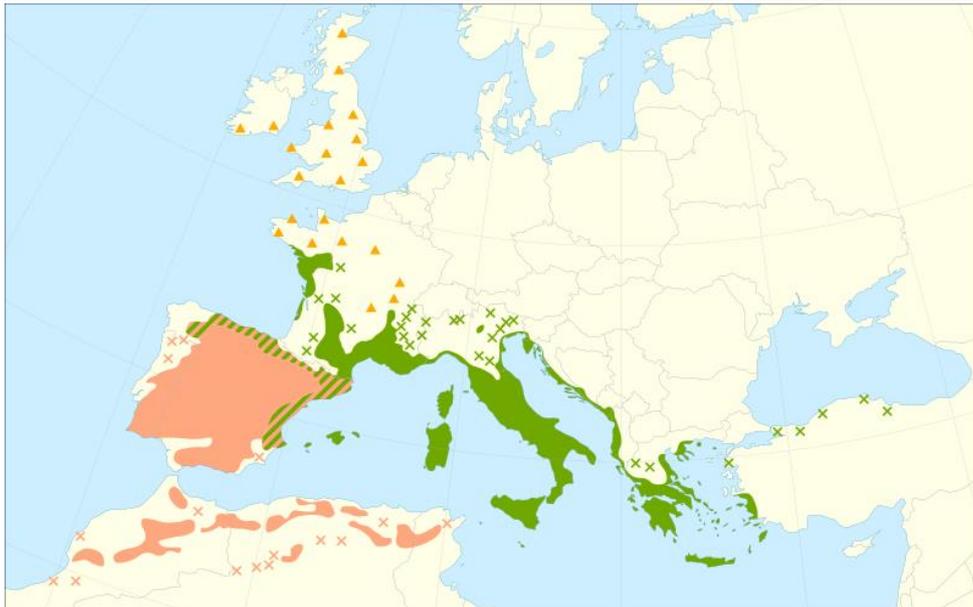
**Figura 6.7.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).



## 6. ENCINA (*Quercus ilex*)

### Resumen

La encina constituye el árbol ibérico del género *Quercus* más tolerante a la sequía. Su capacidad de vivir en los suelos más pobres le ha permitido mantener superficies significativas en la provincia de Soria. Históricamente, estas masas han tenido un uso muy intenso, la mayor parte de ellas se han manejado en forma de monte bajo para la obtención de carbón y leña, y otras masas (las menos) se han gestionado en forma de dehesas, en las cuáles se pueden encontrar ejemplares magníficos. Se trata de la misma situación en la que están las otras quercíneas, un efecto del legado histórico que puede hacer a estos bosques más susceptibles al cambio climático. Modificar la estructura de los montes bajos, con acciones de aclareo intensas que permitan reducir la densidad de pies y aumentar la altura de la masa, debería ser una prioridad si queremos tener formaciones más resilientes (y biodiversas). Los crecimientos de estos encinares son muy bajos a nivel de pie, resultado de procesos de supresión por la densificación de las masas y el cese de las actividades de extracción de pies. La variabilidad interanual del crecimiento es muy importante, y está muy asociada a la disponibilidad hídrica por períodos largos que pueden ir de 7 a 10 meses, destacando frente a otras quercíneas la importancia de las precipitaciones estivales. En este sentido la calidad de los modelos de Vaganov-Shashkin es heterogénea, muy buena para algunas localidades, y de calidad moderada para otras. La encina tiene la capacidad de tolerar niveles de sequía más intensos que lo que ocurre en la provincia de Soria, por lo que la especie tiene capacidad de resistir un aumento de la temperatura e incluso extender su área geográfica.



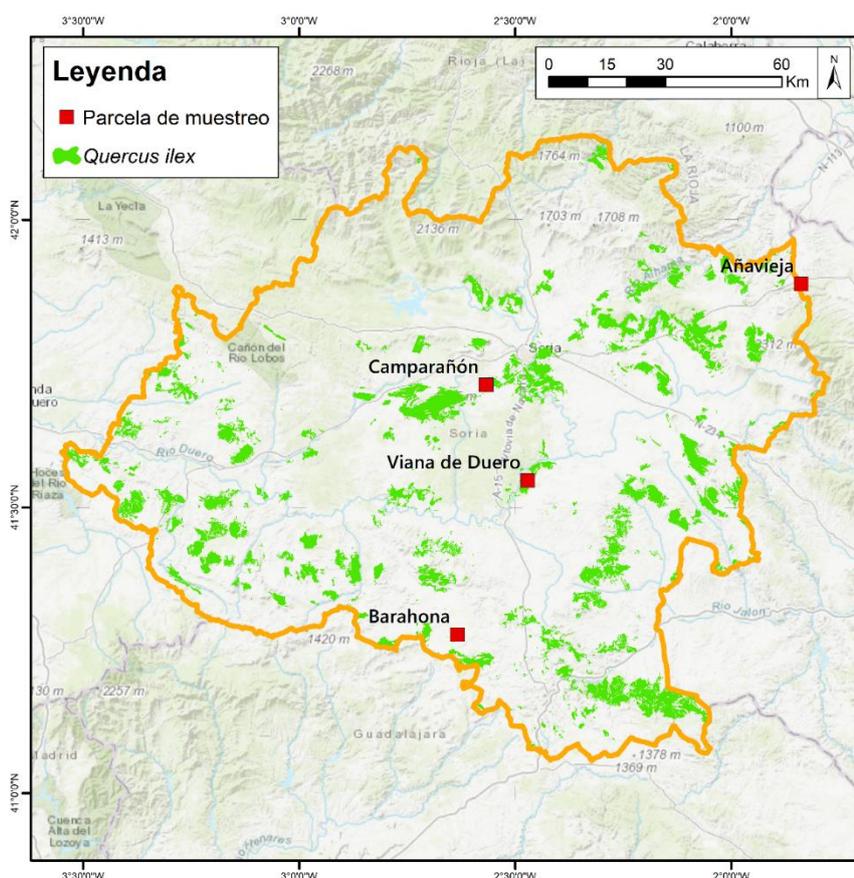
**Figura 7.1.** Distribución mundial de la encina y sus dos subespecies: *Quercus ilex* subsp. *ballota* (naranja) y *Quercus ilex* subsp. *ilex* (verde). Fuente: Wikipedia.

### Contexto de la especie

La encina (*Quercus ilex*) es la especie de frondosa mediterránea más abundante en la Península Ibérica (Fig. 7.1). Se distribuye por toda la costa norte del Mediterráneo, llegando hasta las costas del Egeo, estando presente por todo el Magreb, de Marruecos a Túnez. Puede vivir en la mayor parte de la Península Ibérica, ya que es muy tolerante tanto al frío, como la sequía, además de poder vivir en una gran variedad de sustratos, evitando únicamente las zonas más húmedas del norte y lo más árido del Valle del Ebro y del sudeste Ibérico. Esta amplia valencia ecológica hace que la especie sea muy abundante en la provincia de Soria, escaseando únicamente en el noroeste más húmedo y en algunas zonas de montaña, donde se ve desplazada por



especies más higrófilas. Al igual que ocurría con los robles marcescentes, los encinares han sufrido un uso muy intenso en el pasado del que se están recuperando en la actualidad. La mayor parte de los encinares eran manejados en forma de monte bajo, con cortas periódicas para la obtención de leña. La leña de encina era muy valorada debido a su elevado poder calorífico. Una proporción mucho menor de los encinares se ha mantenido en forma adehesada, con baja densidad de árboles que se podaban por lo alto, llegando hasta nuestros días algunos ejemplares espectaculares, como los que se presentan en las proximidades de Camparañón, Carrascosa o San Felices. Sin embargo, a pesar de la abundancia de encinares en la provincia de Soria, son muy escasos los encinares densos en forma de monte alto ya que prácticamente todos los encinares continuos provienen de bosques que han surgido del rebrote tras el cese de la corta para leña o de encinares abiertos que están comenzando a cerrarse.



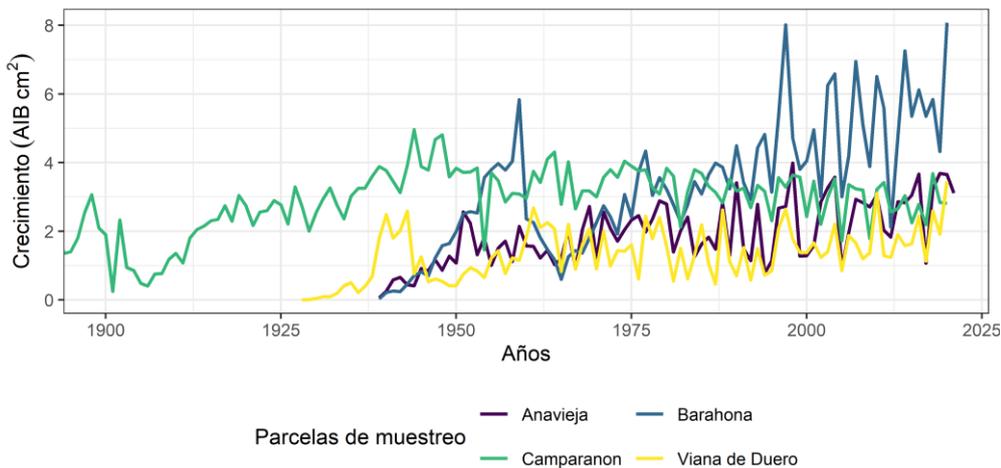
**Figura 7.2.** Distribución de la encina en la provincia de Soria y parcelas de muestreo.

Si bien las encinas pueden alcanzar unos portes muy elevados, como muestran algunos de los ejemplos anteriormente citados, la mayor parte de los encinares tienen portes muy modestos debido a la combinación del carboneo pasado, además de que generalmente han quedado relegados a los suelos más someros. En el contexto soriano, parecen especies tolerantes a un aumento de la temperatura y de la xericidad, pero su respuesta está muy condicionada por el legado de los usos pasados, debiéndose hacer un importante esfuerzo para conseguir que los encinares se recuperen de los legados de manejo histórico. Desde el punto de vista metodológico, los encinares son la especie más compleja para datar de todas las abordadas en este trabajo, ya que

sus anillos no siempre se aprecian con facilidad por lo que la construcción de las cronologías ha sido especialmente compleja.

**Tabla 7.1.** Resumen de las características de las parcelas muestreadas.

Sitio de muestreo	Altitud (m)	Edad media árboles	Árbol más joven	Árbol más viejo
Añavieja	1056	63,3	49 (1972)	82 (1939)
Barahona	1144	49,9	21 (2000)	82 (1939)
Camparañón	1100	90,8	27 (1994)	156 (1865)
Viana de Duero	1046	66,1	60 (1961)	74 (1947)



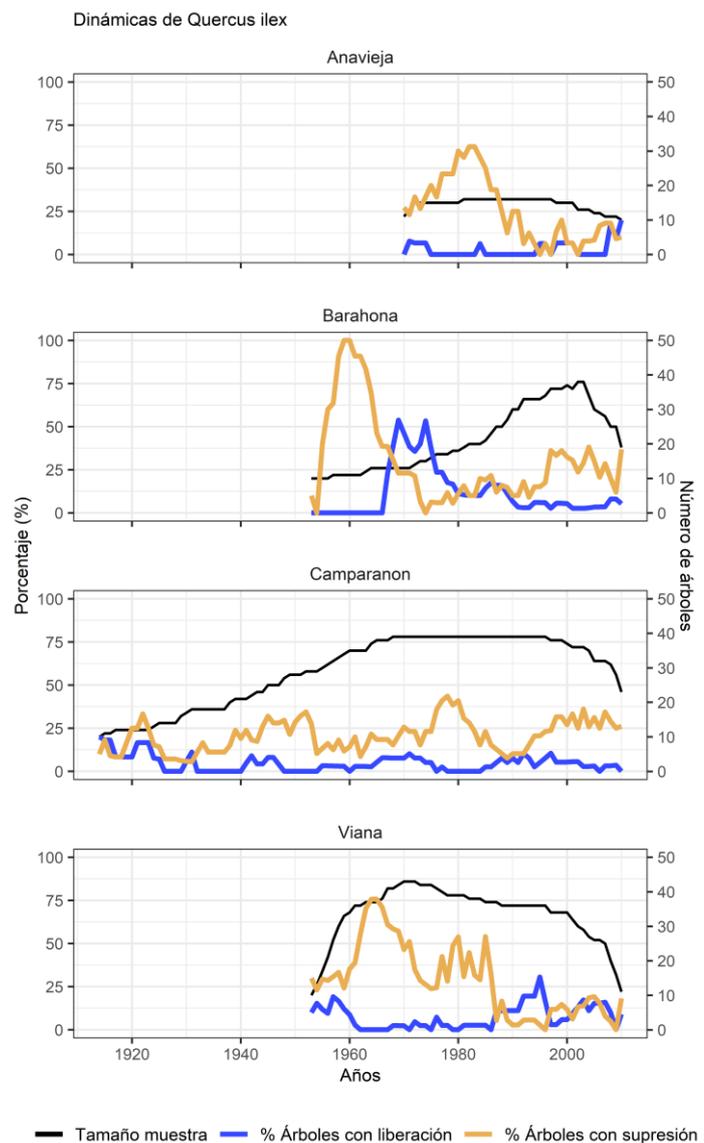
**Figura 7.4.** Evolución del crecimiento medio (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo

### Selección de las parcelas y características

La dificultad de encontrar bosques en forma de monte alto ha constreñido enormemente la selección de parcelas de encinar. Al final hemos escogido zonas donde, a pesar del uso pasado, los árboles estaban comenzando a formar un bosque continuo con troncos de un cierto grosor. Con esa premisa, hemos tratado de muestrear a lo largo de toda la provincia, cubriendo un gradiente latitudinal (Fig. 7.2). Los pies de los árboles muestreados tienen unas edades medias modestas de los 50 años de Barahona a los 91 de Camparañón, que no reflejan la edad de los árboles, sino las de sus troncos, puesto que se refieren a las fechas de las últimas podas (Tabla 7.1). Hay que tener en cuenta que los pies de la mayor parte de los encinares en forma de monte bajo que hay en la provincia de Soria son mucho más jóvenes.

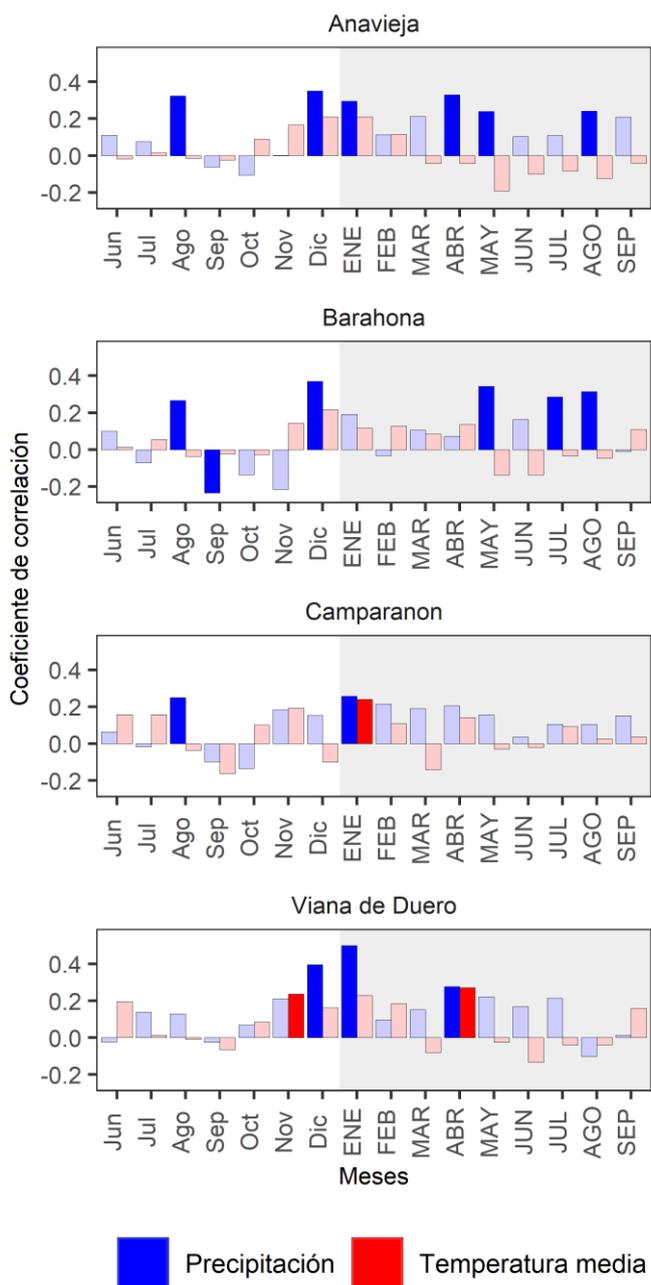
**Figura 7.3.** Crecimiento medio en las parcelas de muestreo de la encina

Los crecimientos medios de las encinas son bajos (Fig. 7.3). La localidad con mejores crecimientos (Barahona), que oscila entre los 4 y los 8 cm<sup>2</sup> anuales de media, mientras que el resto de los lugares tiene medias por debajo de los 3 cm<sup>2</sup> anuales. Es la especie de la provincia con los crecimientos radiales más bajos. Es muy posible que estos crecimientos tan bajos, se deban, no solo a las características de la





especie, sino también a la historia de estos pies que fueron sometidos a un manejo intenso por carboneo en el pasado y con varios pies surgiendo del mismo tronco. Es por ello que, probablemente, estemos infravalorando el potencial de la encina. La dinámica de estos bosques refleja un cierre paulatino y un aumento de la densidad de la masa, con supresiones tras el evento formador de los pies (Fig. 7.4), probablemente la última corta, si bien en Barahona parece que hubo una corta parcial posterior (posiblemente una extracción de leña). En el caso de la localidad con los troncos más viejos (Camparañón), no se aprecian actuaciones, sino una densificación paulatina de la masa.



(Barahona y Anavieja). La señal positiva de la precipitación de agosto del año anterior aparece en tres de las localidades.

## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

La respuesta climática de la encina refleja claramente que crece en un ambiente de fuerte limitación hídrica (Fig. 7.5). No solo por cuestiones climáticas, sino también el hecho de que suele ocupar los suelos menos profundos donde la capacidad del sustrato para almacenar agua, y así amortiguar el efecto de las sequías, se reduce considerablemente.

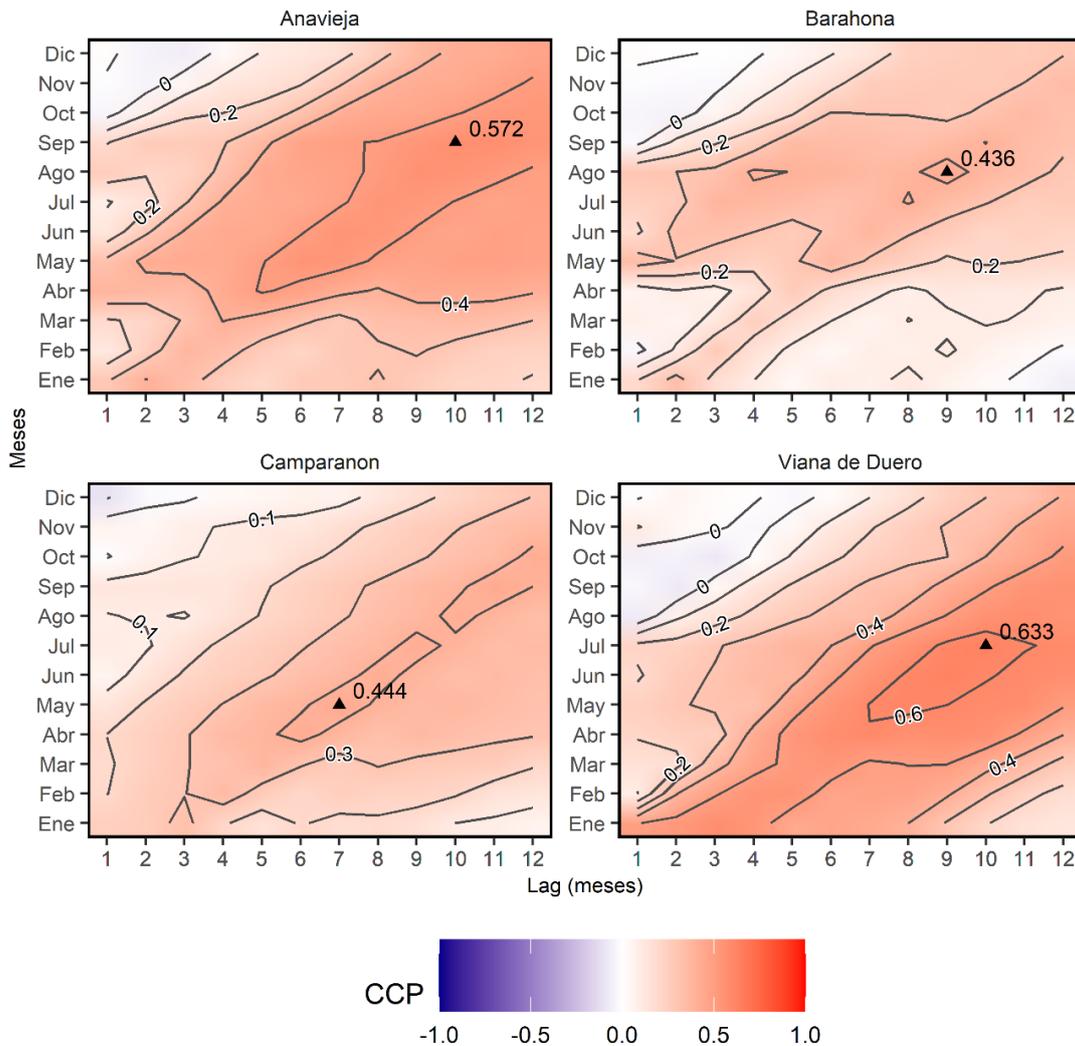
**Figura 7.5.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejan correlaciones estadísticamente significativas. Los meses están divididos en meses pertenecientes al mismo año de crecimiento (letras mayúsculas; área gris) y en meses del año anterior al año de crecimiento (letras minúsculas; área blanca).

La precipitación favorece el crecimiento de la encina casi en cualquier época del año, mientras que la temperatura juega un rol muy secundario. Al igual que quejigos y melojos, la precipitación invernal tiene un efecto muy positivo sobre su crecimiento, con señales positivas a diciembre-enero. En este caso, no queda claro que se trate únicamente de saturación de suelo, ya que la encina suele vivir en zonas de suelos poco profundos, y también porque a diferencia de las especies anteriores, la encina es una especie perennifolia que potencialmente puede aprovechar condiciones favorables para la activar la fotosíntesis en casi en cualquier momento del año. La primavera (abril-mayo) es otro período con fuerte respuesta a la precipitación, algo comprensible dado que las primaveras húmedas suponen una menor limitación hídrica en un período en el que la fotosíntesis es muy activa. Finalmente, la encina se diferencia de los quejigo y melojos por responder positivamente a las precipitaciones estivales en dos de las localidades



### Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI

La respuesta a la señal de SPEI corrobora las observaciones de los datos mensuales (Fig. 7.6). Las encinas muestran respuestas de moderadas a altas (desde  $R^2 = 19\%$  a  $40\%$ ) a la evapotranspiración acumulada. El pico de la señal puede apreciarse tan tardíamente como septiembre en Añaveja, siendo más temprano, mayo, en Camparañón, con situaciones intermedias en Barahona y Viana de Duero. Los períodos acumulados van de 7 a 10 meses, lo que hace que el inicio de la señal se halle en octubre-noviembre, indicando que hay una **respuesta positiva a la precipitación desde el inicio del otoño**.

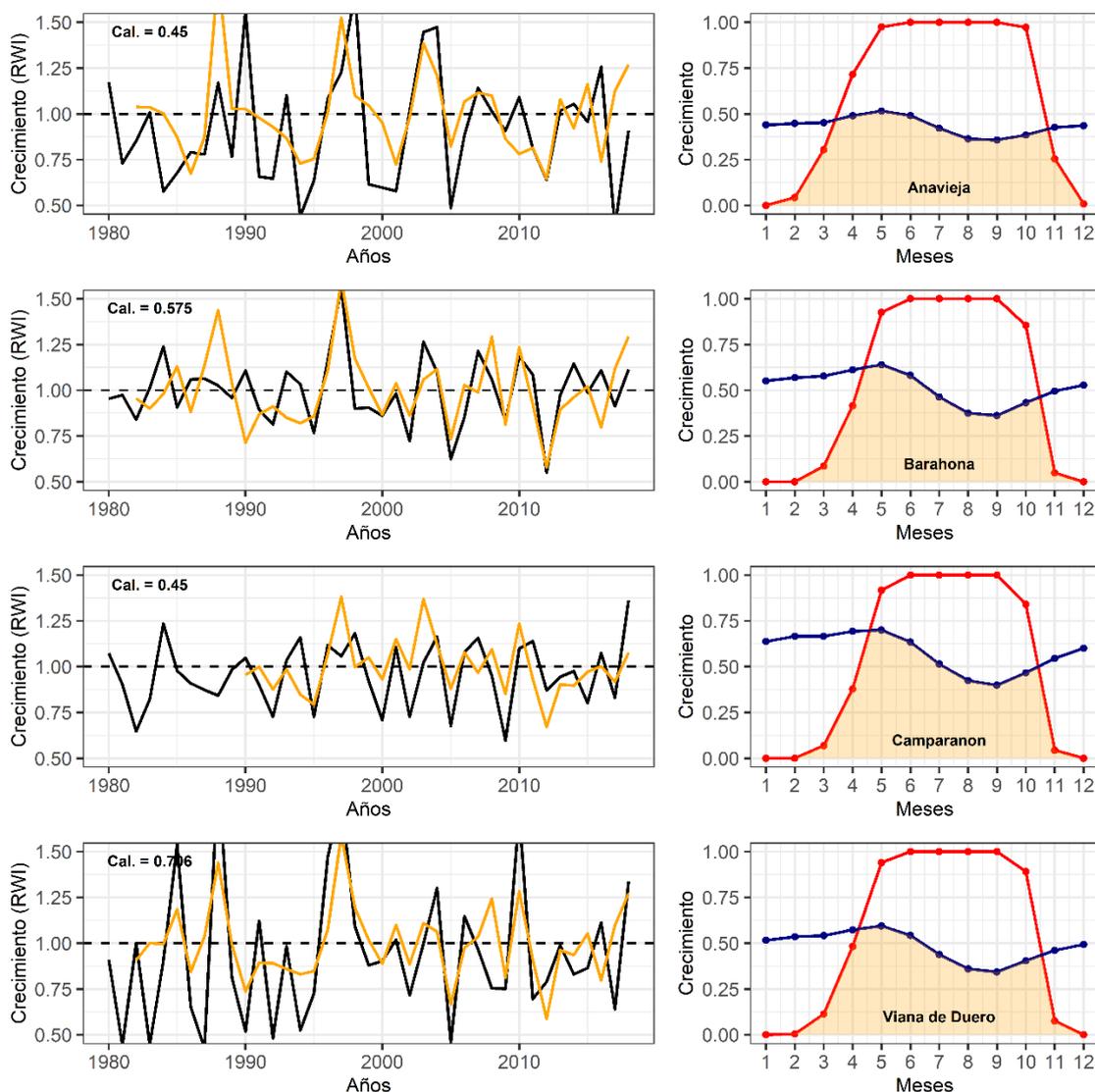


**Figura 7.6.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad.



### Modelo de Vaganov-Shashkin

El modelo de Vaganov-Shashkin muestra la mayor limitación hídrica de todas las especies de árboles analizadas (Fig. 7.7), incluso los pinos carrascos, que son considerados más xerófilos, muestran menores limitaciones hídricas que las encinas. Los ajustes del modelo van de moderados  $r = 0.450$  a altos  $r = 0.706$ . Las encinas no llegan a alcanzar 3/4 de sus necesidades hídricas ni en los meses más húmedos, siendo particularmente secas las localidades de Añavieja y Viana de Duero. Esto explica la importante respuesta de la encina a la precipitación a lo largo de todo el año que se han observado en los esquemas anteriores (Fig. 7.5). La limitación de la actividad cambial por parte de la temperatura se asemeja mucho al resto de las especies: mayo es el primer mes en que las condiciones térmicas son subóptimas y no es hasta junio cuando desaparecen las limitaciones térmicas, que en cualquier caso son menores que las hídricas en todo el período de crecimiento.



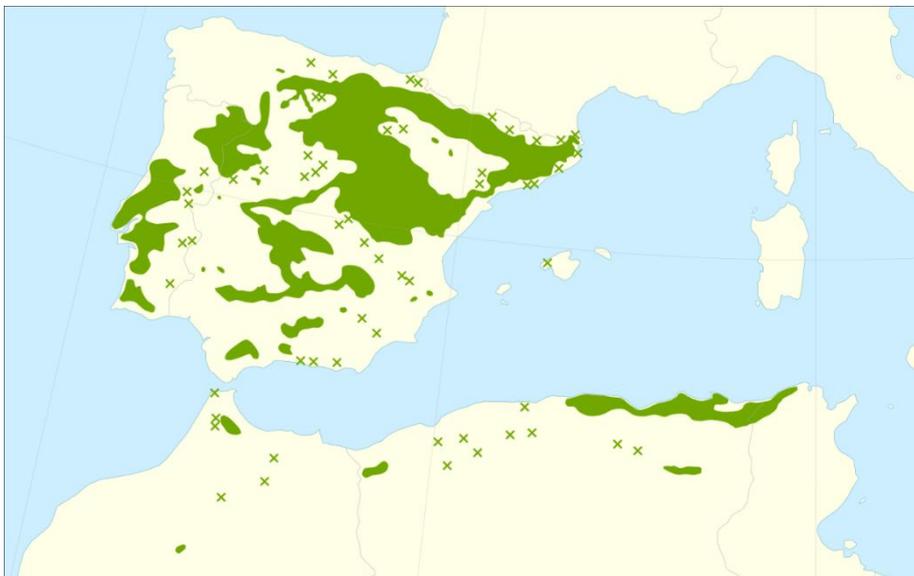
**Figura 7.7.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).



## 7. QUEJIGO (*Quercus faginea*)

### Resumen

El quejigo (*Quercus faginea*) es una quercínea marcescentes característica del Mediterráneo Occidental. Por sus características biogeográficas y climáticas, se asemeja mucho al melojo (*Quercus pyrenaica*), si bien se distinguen por aprovechar suelos de naturaleza muy diferente, ácidos el melojo, básicos el quejigo). Esta apetencia por suelos más ricos ha hecho que el área actual del quejigo sea mucho más reducida, por cuanto mucha de su área potencial se ha transformado en terreno agrícola, siendo su presencia en la provincia más esporádica. El quejigo también comparte con el melojo la transformación de muchas de sus masas originarias en montes bajos, destinado a leña y carbón y montes adehesados. Ambas prácticas, ya en desuso, condicionan sin embargo la estructura actual de las masas de quejigo, y pueden ser un problema serio para la adaptación de estos bosques a nuevos escenarios climáticos. Al igual que ocurre con los bosques de melojo, el manejo de la mayor parte de estas masas es muy reducido, y no existe, como sí ocurre en los pinares, sistemas de ordenación que velen por el vigor de la masa. Por tanto, es relativamente común encontrarse pies con crecimientos estancados que únicamente son capaces de producir madera temprana. En estos casos la productividad anual por árbol es muy baja. En relación a la respuesta climática, tenemos similitudes con lo que se verá en el melojo. Los quejigares dependen de la precipitación acumulada en los meses previos a la estación de crecimiento, desde invierno hasta primavera. Estos árboles son capaces de desplegar profundas raíces y tienen cierta preferencia por suelos desarrollados, por lo que dependen de un cierto nivel de rellenado de los niveles hídricos en las capas más profundas del suelo para poder sostener el crecimiento primaveral. En este sentido se aprecia cómo es el balance de evapotranspiración a períodos largos el que determina el crecimiento, y cómo el papel de las precipitaciones durante el periodo de crecimiento (mayo-junio) es muy marginal. Los modelos se ajustan muy bien en las localidades septentrionales, pero son más modestos para las zonas más secas de Serón y Losana, que también son las que tienen mayor número de árboles con procesos de supresión y posiblemente su crecimiento esté más dominado por fenómenos de competencia que por factores climáticos.

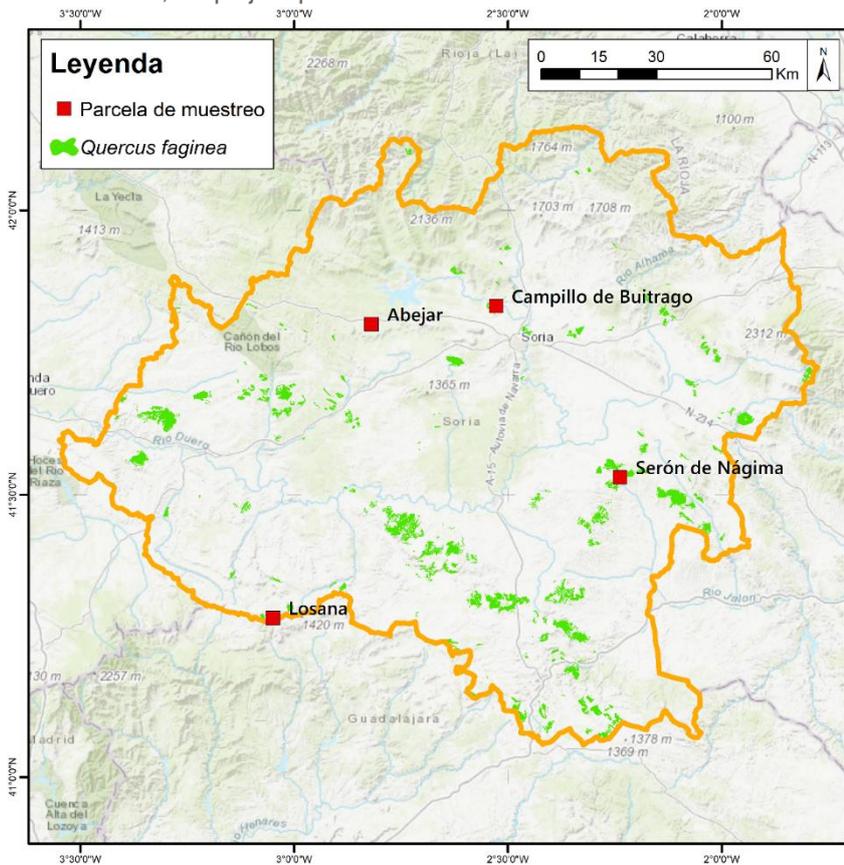


**Figura 8.1.** Distribución mundial del quejigo. Fuente: Wikipedia



## Contexto de la especie

El quejigo (*Quercus faginea*) es un endemismo del Mediterráneo Occidental (Fig. 8.1) que cuenta con sus mayores poblaciones en la Península Ibérica, y, marginalmente, en ubicaciones más dispersas por el norte Marruecos y Argelia, sobre todo en las zonas costeras más húmedas. A pesar de lo reducido de su extensión, la especie cuenta con dos subespecies muy diferenciadas morfológica y ecológicamente (subsp. *faginea* y subsp. *broteroi*). Tanto las poblaciones de Soria como todas las del norte de España pertenecen a la subespecie *faginea*. Esta subespecie prefiere condiciones ambientales subhúmedas, lo que le convierte en un roble transicional entre los robles atlánticos (*robur* y *petraea*) y los *Quercus* perennifolios como la encina. En este sentido juega un papel muy similar al del melojo (*Quercus pyrenaica*), con la diferencia principal en el tipo de sustrato preferido. Mientras el melojo suele tener una marcada preferencia por suelos ácidos pobres en nutrientes, el quejido prefiere suelos ricos en bases.



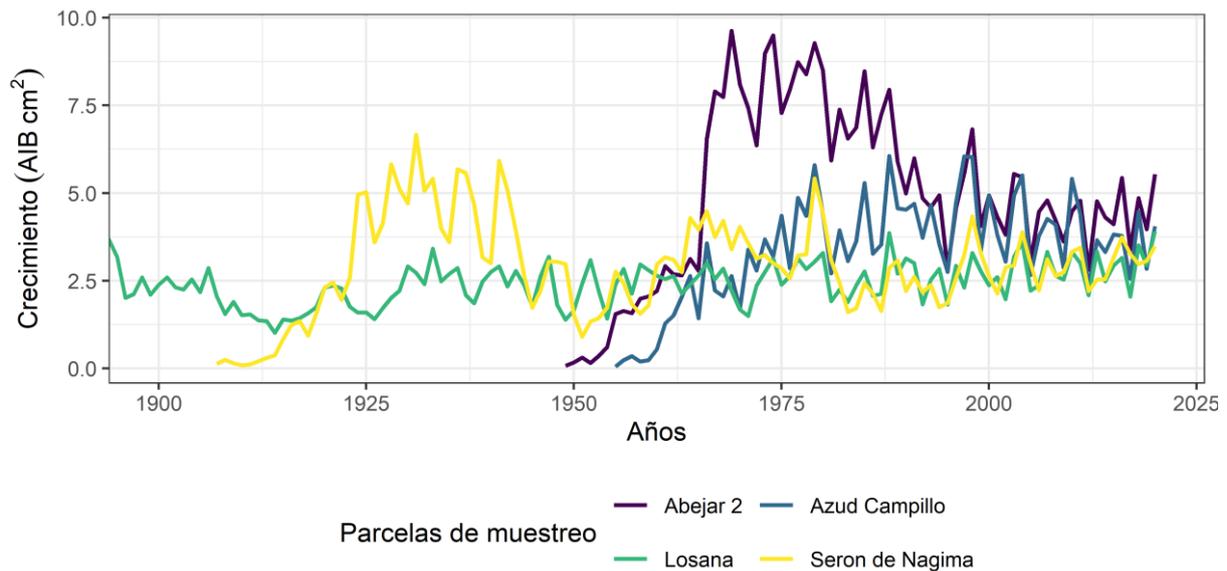
**Figura 8.2.** Distribución del quejigo y las parcelas de muestreo en Soria.

Esta diferencia, así como una menor capacidad de rebrote postcorta, ha hecho que la superficie de quejido se haya visto diezmada en gran parte de la Meseta Norte. Los quejigos ocupaban suelos ricos en bases y en muchas ocasiones zonas de suelos profundos, donde se retenía más humedad, compensando la xericidad del clima. Estas zonas coincidían con muchos de los suelos más fértiles, porque muchos quejigares fueron transformados tempranamente en campos de cultivo, lo que hace que la presencia actual de los quejigares en el paisaje soriano esté muy reducida. Por otra parte, al igual que ocurre con las otras quercíneas, su uso tradicional ha hecho que la mayor parte de los quejigares no se presenten como bosques, sino como formaciones adehesadas o de monte bajo, si

bien esto último en menor medida que en el caso de la encina y el melojo, dada su menor capacidad de rebrote, pero habiendo extensiones muy importantes en algunas zonas como los quejigares del Puerto de la Bigornia. La problemática es la misma que la desarrollada con más extensión en el apartado del melojo, con la necesidad de hacer una gestión específica para montes bajos y zonas adehesadas, cuya respuesta al cambio climático desconocemos, pero que prevemos que sea más sensible que en las formaciones de monte alto.

**Tabla 8.1.** Tabla de las características de las parcelas de muestreo de la sabina albar.

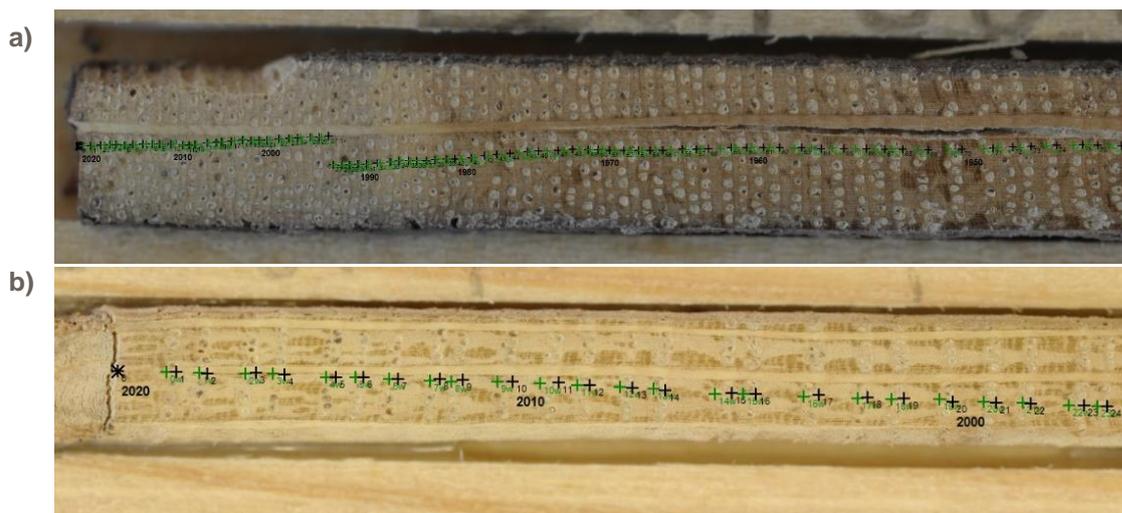
Localidad	Altitud (m)	Edad media	Árbol más joven	Árbol más viejo
Abejar	1200	60	47 (1974)	72 (1949)
Campillo de Buitrago	1050	58	45 (1976)	66 (1955)
Losana	1337	97	35 (1986)	161 (1860)
Serón de Nágima	1017	69	35 (1986)	114 (1907)



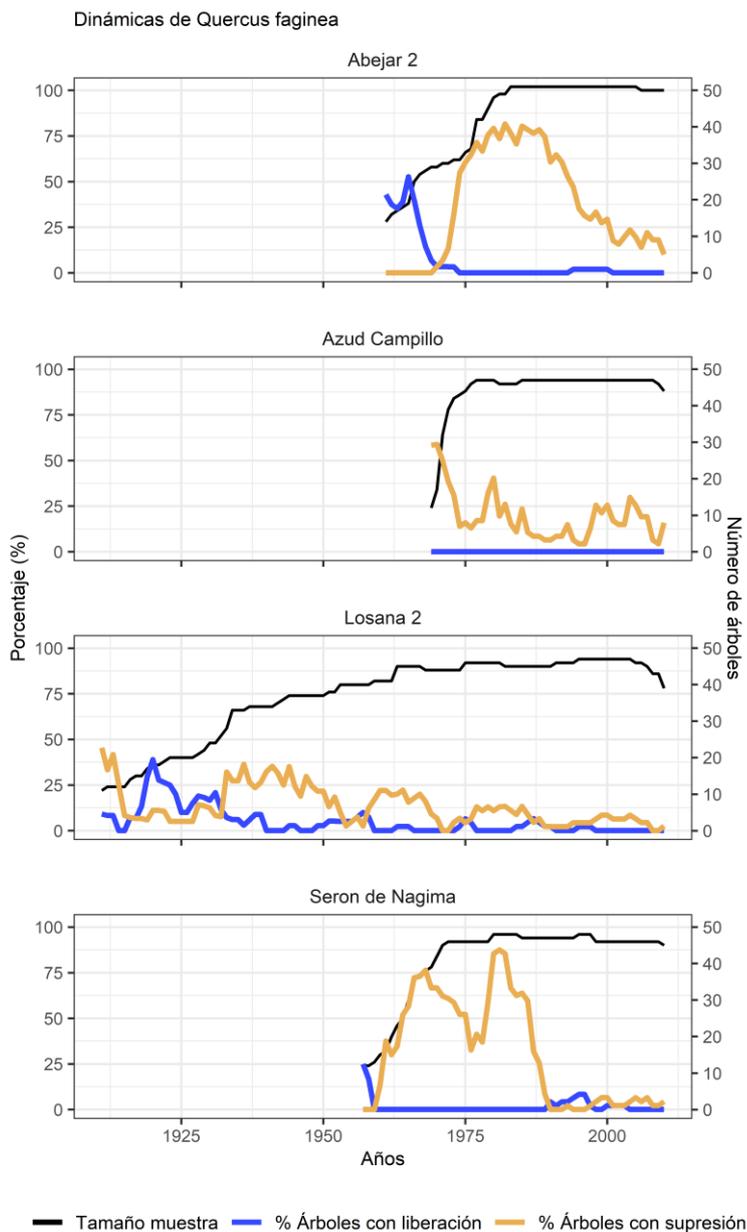
**Figura 8.3.** Evolución del crecimiento medio (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo de quejigo.

### Selección de las parcelas y características

El muestreo de quejigares ha tratado de cubrir las diferentes zonas donde está presente en la provincia, pero seleccionando bosques en monte alto y con masas de la mayor madurez posible, lo que no siempre ha sido fácil (Fig. 8.2). Se han conseguido bosques con edades medias entre 58 y 97 años, lo que es un rango de edades importante considerando el estado de los quejigares en la provincia (Tabla 8.1). Edades mayores se hubieran encontrado muestreando zonas de dehesa, pero, como hemos indicado anteriormente, este tipo de formaciones deben tratarse de un modo diferenciado por los legados que supone su manejo pasado.

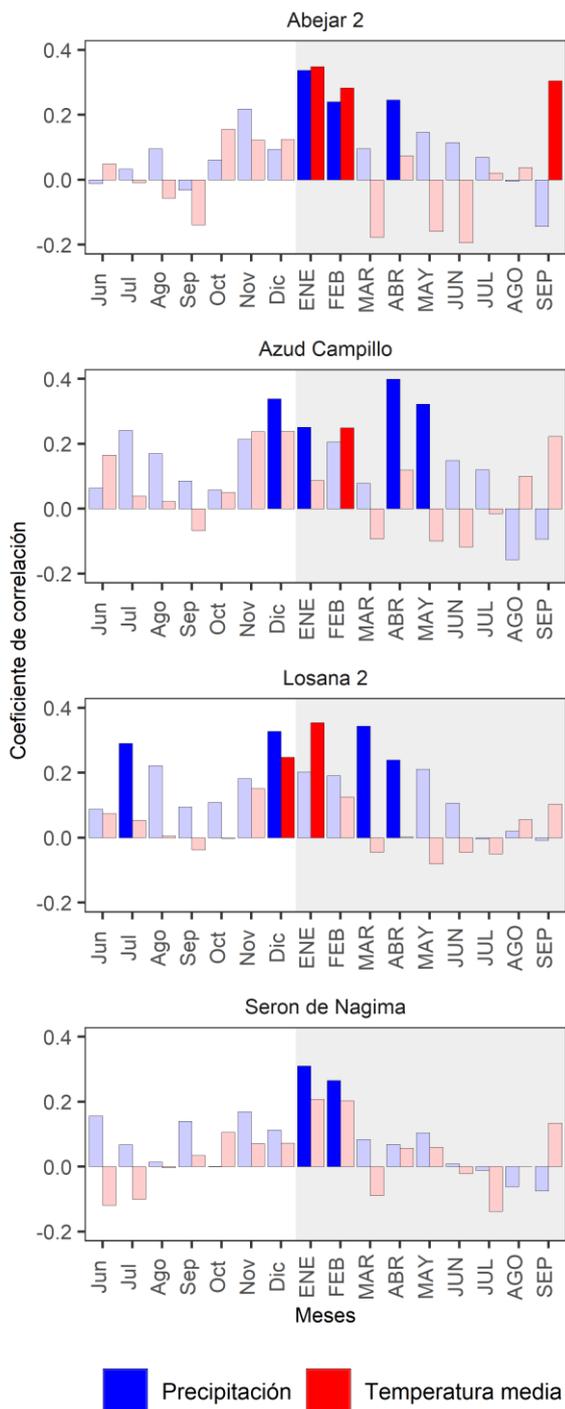


**Figura 8.5.** Ejemplares de quejigo con crecimiento (a) suprimido (Losana) y (b) no suprimido (Abejar).



El crecimiento medio de los árboles de quejigo es muy moderado (2.5 a 5 cm<sup>2</sup> año), incluso menor que el crecimiento de los melojares. Con crecimientos actuales que prácticamente no difieren entre parcelas (Fig. 8.3). En tres de las localidades los árboles se establecen de un modo muy sincrónico (Fig. 8.4), probablemente tras la corta de un bosque anterior, algo que se puede corroborar en el caso de Abejar ya que tal evento coincide con la corta del melojar colindante (ver Fig. 9.4). El bosque de Losana muestra una historia más larga, con árboles que ya estaban presentes en la segunda mitad del siglo XIX. Apenas hay fenómenos de liberación, solo en los estados iniciales de la masa en Abejar y en Serón de Nágima (Fig. 8.4), donde aparece también otro evento de liberación alrededor de 1920 y a comienzos de los sesenta. Exceptuando esas liberaciones, los bosques muestran unos procesos de supresión y reducción paulatina del crecimiento. A veces estas supresiones son bruscas (Serón y Abejar) tras la instalación de los árboles, en otros casos (Azud y Losana) ocurren de un modo más paulatino. Un análisis más fino, encaminado a detectar árboles individuales con supresiones severas (producción únicamente de madera temprana, ver Fig. 8.5), muestra un estado más vigoroso en las masas de Abejar y Azud de Buitrago donde este tipo de árboles es muy escaso. Por el contrario, Serón y Losana muestran un número importante de árboles con supresiones severas, que ocurren de un modo muy brusco en Serón y más paulatino en Losana.

**Figura 8.6.** Dinámicas forestales en las parcelas de muestreo del quejigo



## Efecto del clima en el crecimiento

### Respuestas mensuales

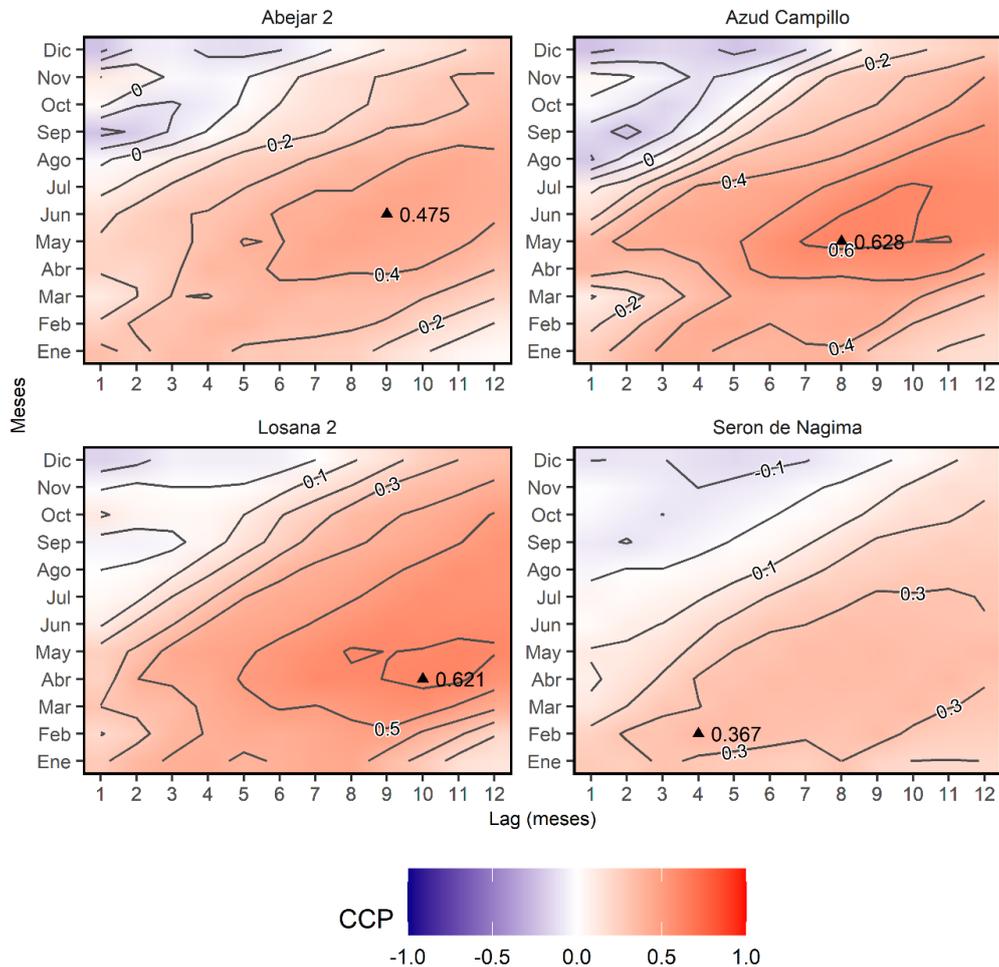
La respuesta de los quejigares a la precipitación y temperatura mensuales es muy semejante a la experimentada por la otra especie de roble marcescente. El crecimiento de la especie está limitado principalmente por las precipitaciones durante el período invernal y la primavera. La señal comienza en diciembre-enero y se extiende hasta abril-mayo, excepto en Serón de Nágima, donde la señal se restringe a enero-febrero. Al igual que en el caso del melojo, se trata de un resultado bastante sorprendente, porque la mayor parte de las especies estudiadas muestran un control climático que incluye el período de crecimiento activo (mayo-julio). Sin embargo, en los quejigos, la señal climática sobre el crecimiento se centra fundamentalmente en la precipitación acumulada antes o justo en el inicio del período de crecimiento. Otro aspecto remarcable es el efecto positivo de la temperatura invernal. Esta señal contrasta con la observada en zonas más cálidas, donde la temperatura invernal ejerce un efecto negativo por aumentar las tasas de respiración celular en un periodo en el que la especie no puede realizar la fotosíntesis, reduciendo, por tanto, la disponibilidad de carbohidratos para el crecimiento futuro. En nuestro caso, el efecto positivo de las temperaturas medias invernales puede deberse a un menor daño por heladas durante el invierno, así como al efecto positivo de las temperaturas invernales sobre el inicio del crecimiento primaveral.

**Figura 8.7.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejan correlaciones estadísticamente significativas. Los meses están divididos en meses pertenecientes al mismo año de crecimiento (letras mayúsculas; área gris) y en meses del año anterior al año de crecimiento (letras minúsculas; área blanca)

### Respuesta climática a la evapotranspiración acumulada

Como en la mayor parte de las especies analizadas en la provincia, la limitación hídrica es el principal factor que determina la variación interanual en el crecimiento secundario. En este sentido, los valores observados de SPEI van de bajos  $R^2 = 13.5\%$  a moderados  $R^2 = 39.4\%$ , corroborando el gran peso del control del crecimiento asociado a las condiciones climáticas durante el período

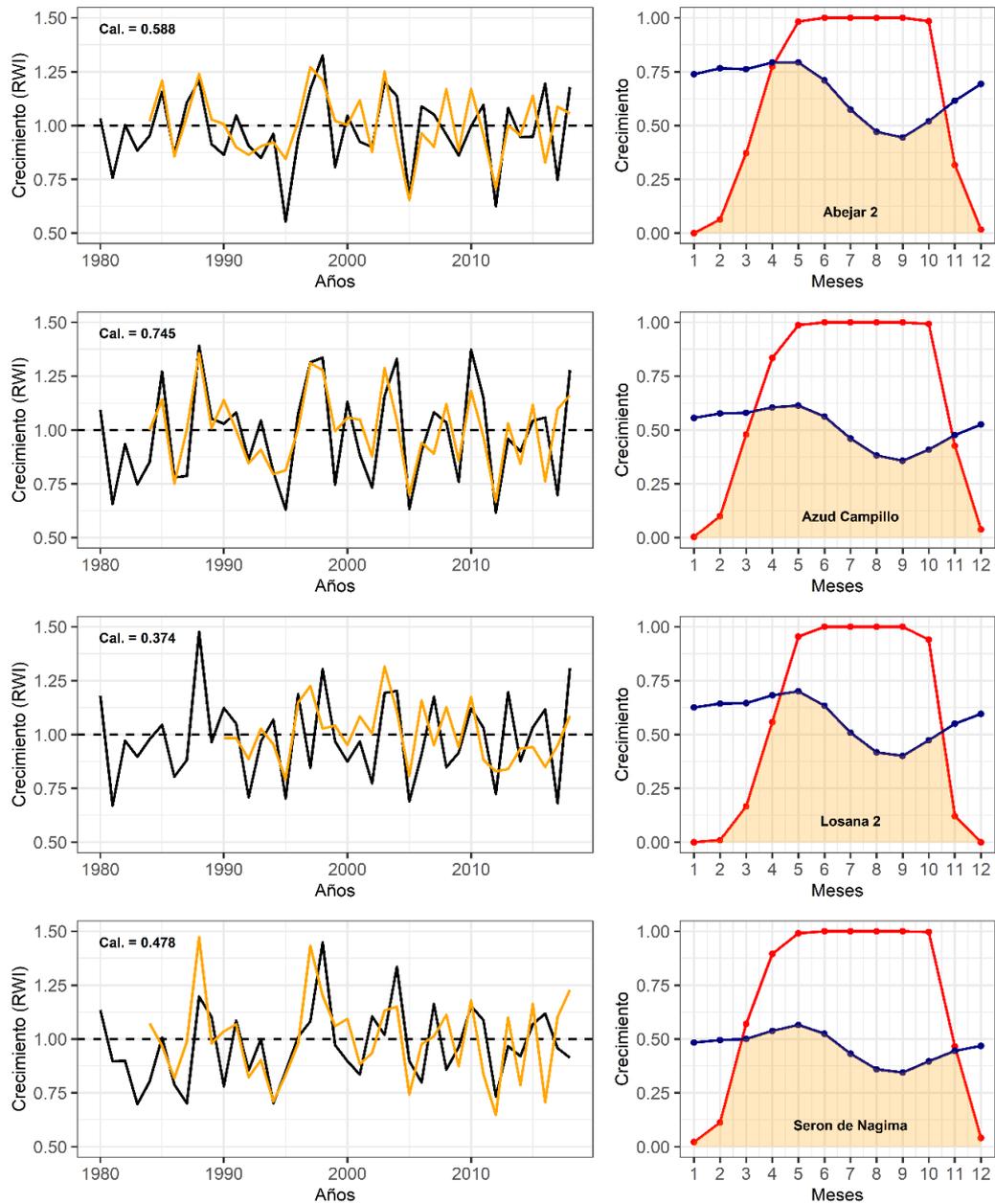
previo al crecimiento secundario (Fig. 8.8). En la localidad de Abejar, la señal llega al mes de junio, pero en el resto de las localidades el pico de la señal se encuentra en mayo, abril o incluso febrero en Serón, si bien este último valor es excesivamente temprano. Las señales son también muy largas de 4 a 10 meses, extendiéndose desde julio a noviembre del año anterior, indicando que la acumulación de agua en el suelo responde a un proceso muy largo.



**Figura 8.8.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad

#### Modelo de Vaganov-Shashkin

El modelo de Vaganov-Shashkin corrobora la importante limitación hídrica en la que crecen los quejigares sorianos (Fig. 8.9). Los modelos son muy buenos en Abejar y Azud en el norte con varianzas explicadas de  $R^2 = 34.6 - 55.5\%$ , pero son peores en las localidades más meridionales de Losana y Serón donde van de  $R^2 = 14 - 22.8\%$ . Ninguna de las cuatro localidades muestra meses en que las condiciones hídricas sean óptimas para el crecimiento, por lo que el crecimiento va a ser siempre subóptimo o depender de las precipitaciones previas a la estación de crecimiento para que saturen el suelo de agua, especialmente en la más oriental de Serón. Por otra parte, las condiciones óptimas desde el punto de vista térmico se encuentran en mayo, extendiéndose hasta octubre (septiembre en Losana), por lo que en teoría hay cinco a seis meses con condiciones térmicas favorables. Sin embargo, a partir del mes de julio existe una fuerte deficiencia hídrica, por lo que la mayor parte del crecimiento debe desarrollarse entre mayo y junio (julio).



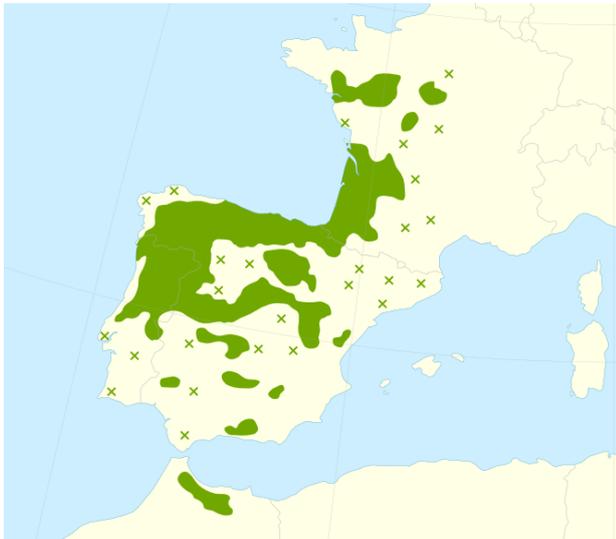
**Figura 8.9.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada).



## 8. MELOJO (*Quercus pyrenaica*)

### Resumen

El melojo (*Quercus pyrenaica*) es una especie muy adaptada a crecer en suelos ácidos bajo climas mediterráneos húmedos y subhúmedos. En Soria la mayor parte de los bosques de melojo han sido utilizados como dehesas o bien como monte bajo para la obtención de leñas, habiendo relativamente pocos ejemplos de melojares en forma de monte alto. Esto hace que la problemática de esta especie ante el cambio climático, como la de todas las quercíneas, sea compleja, ya que no solo hay que gestionar las incertidumbres de un contexto climático diferente, sino que también hay que resolver los problemas asociados a los cambios de manejo que en muchas situaciones han generado formaciones forestales mucho más susceptibles a la sequía. La mayor parte de los bosques muestreados reflejan la juventud de los pies (que no de los individuos), y solo en un caso (Abejar) tenemos un equivalente a un monte alto con pies que en algunos casos superan los 100 años de edad. No se han muestreado bosques adeshados donde los pies sí que tienden a ser mucho más viejos, sin embargo, los posibles periodos de ausencia de manejo, asociados en parte a la despoblación del medio rural, serían muy complejos de analizar a largo plazo e interferirían con las señales climáticas. Los resultados en los análisis de las dinámicas de las masas son fruto de este manejo histórico tan característico, en el que se aprecian varios sitios en los que el establecimiento de los árboles fue una consecuencia de una intervención sobre la masa previa. Además, es muy común encontrar en la misma masa una mezcla de pies suprimidos y otros sin supresión, lo que denota una gran heterogeneidad en el crecimiento de estos árboles, haciendo que el valor medio de las parcelas de muestreo no sea un buen indicativo del crecimiento real de los árboles. A pesar de cierta disparidad en la respuesta climática, los melojos comparten una respuesta a la disponibilidad hídrica durante un período muy largo, siendo clave en todos ellos las precipitaciones de invierno,



lo que se refleja en la respuesta agregada al balance evapotranspirativo, con respuestas intensas y a períodos largos de entre 9 y 12 meses. Por tanto, se trata de una especie que necesita un relleno anual de la humedad de los suelos. En este sentido, los modelos Vaganov-Shashkin son muy satisfactorios, salvo en el caso de Abejar, que tiene ajustes bastante peores. Al margen de los aspectos climáticos, el futuro de estos bosques va a estar determinado por nuestra capacidad de gestionar adecuadamente la transformación de montes bajos en montes altos y la capacidad de o bien seguir gestionando los bosques de árboles trasnochos o bien favorecer su transformación en montes más densos donde la regeneración de pies jóvenes en estas masas esté favorecida.

**Figura 9.1.** Rango de distribución mundial del melojo. Fuente: Wikipedia.

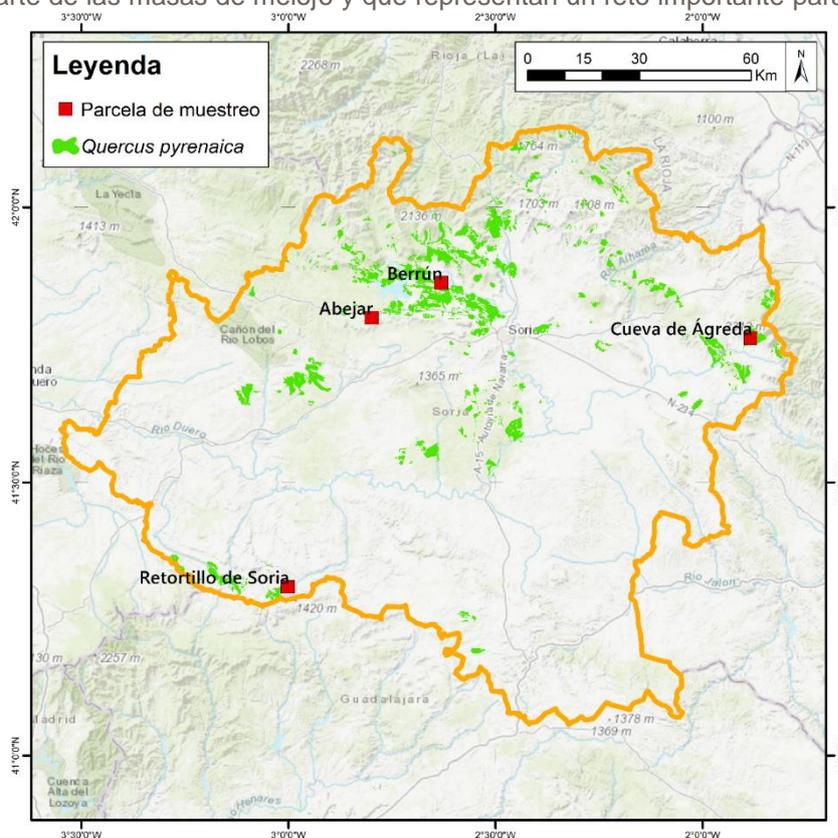
### Contexto de la especie

El melojo (*Quercus pyrenaica*) es una especie endémica del suroeste de Europa y norte de Marruecos (Fig. 9.1), con preferencia por climas en la transición atlántico-mediterránea y una asociación muy clara a los suelos de naturaleza ácida. Así, en la provincia de Soria es más abundante en el norte de la provincia donde se establece en los piedemontes del Sistema Ibérico, Moncayo y estribaciones sorianas del Sistema Central (Fig. 9.2). Es también muy común en la Comarca de Almazán. Aunque su preferencia por suelos ácidos, de menor interés para la agricultura, ha facilitado históricamente la preservación de muchas de sus formaciones, bastantes de ellas han sido transformadas en formaciones de pinar, más productivas desde un punto de vista económico. En las zonas más húmedas ha sido sustituido por pinares de pino silvestre, para producción de madera, y recientemente en las más secas por el pino negral debido a una transformación para



aprovechamientos resineros. Este cambio no implica que los melojares no fueran utilizados de una forma intensa en el pasado. De hecho, la mayor parte de los melojares sorianos, al igual que la mayor parte de los *Quercus* sorianos, han sido transformados en dos direcciones: montes bajos y formaciones de trasmochos. Se trata de actuaciones que prácticamente han desaparecido, pero cuyos legados siguen y seguirán determinando el futuro de la mayor parte de las masas de melojo y que representan un reto importante para la silvicultura.

**Figura 9.2.** Parcelas de muestreo y distribución del melojo en la provincia de Soria



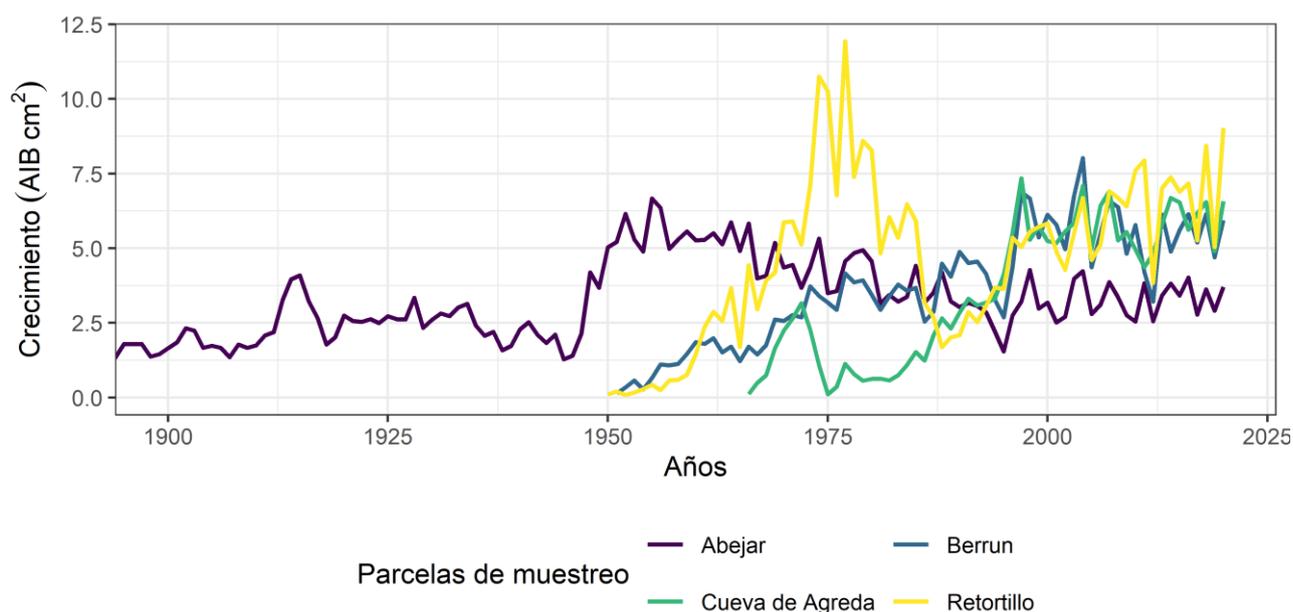
El melojo tiene una gran capacidad de rebrote de cepa, por lo que era común que se explotara la especie en forma de monte bajo para la obtención de leñas, produciendo individuos formados por numerosos rebrotes. A pesar de que el butano se implantó como combustible a partir de los años 70 del siglo pasado, los efectos de los aprovechamientos para leña y carbón de estas siguen siendo muy palpables en la estructura de estos bosques. El abandono del carboneo permitió un crecimiento repentino en los árboles, pero siguen manteniendo muchos pies fruto de rebrotes que están asociados a un solo sistema radical, que además suele ser muy viejo. Este fenómeno de rebrotes de cepa ha estado asociado a una menor capacidad de crecimiento en los pies, con frecuentes crecimientos suprimidos y árboles de menor porte, debido a que los carbohidratos sintetizados por el organismo han de repartirse entre varios pies. Se trata de una situación poco deseable en un contexto de aumento de la xericidad, por cuanto muchas de estas formaciones pueden ser más sensibles a las sequías. Para evitar esto se han aplicado técnicas de resalveo, esto es, la eliminación de parte de los pies de una cepa para favorecer el crecimiento de los de mayor vigor o tamaño. Se trata de una técnica que se ha revelado efectiva en algunas zonas cercanas con el Moncayo aragonés (Arrechea 2015), mejorando el crecimiento de las masas y reduciendo el puntisecado. Esta técnica implica un manejo postcorta, introduciendo ganado para reducir los nuevos brotes basales y controlando para el mantenimiento de la dominancia. Este tipo de actividad parece una prioridad si queremos que este tipo de masas haga frente con éxito al cambio climático.

**Tabla 9.1.** Características físicas de las parcelas de muestreo del melojo.

Sitio de muestreo	Altitud (m)	Edad media árboles	Árbol más joven	Árbol más viejo
Abejar	1200	105,9	60 (1961)	176 (1845)
Berrún	1023	45	23 (1998)	70 (1951)
Cueva de Ágreda	1327	36,6	24 (1997)	55 (1966)
Retortillo de Soria	1255	39	24 (1997)	71 (1950)



Las formaciones trasmochas constituyen otro porcentaje muy importante de los melojares que se preservan en la provincia. Este tipo de uso se asemeja bastante al monte bajo, con la diferencia de que en este caso las cortas se realizan a cierta altura (generalmente por encima de los dos metros), manteniendo un tronco principal. El manejo del trasmucho, generalmente asociado a formaciones adehesadas, permitía el mantenimiento de un pastizal bajo protegido a la sombra de una cubierta arbórea que evita las pérdidas de agua mediante la evaporación, lo que alargaba el período productivo de este. Los árboles a su vez producían otros bienes, desde madera que podría ser incluso de diámetros notables, hasta el ramón que servía de alimento al ganado en períodos donde la disponibilidad de hierba era escasa, como el estío, y eventualmente la producción de bellotas. Este tipo de usos, que fue muy común en toda Europa, se ha ido abandonando paulatinamente debido a lo laborioso de realizar las cortas en altura. Como consecuencia del cese de estas actividades, las ramas por encima de la zona de corta se han desarrollado notablemente, comprometiendo en muchos casos la estabilidad y viabilidad del árbol debido a lo descompensado de su copa. Esto provoca que algunas ramas se desgarran, produciendo grandes heridas en el árbol que, en algunos casos, llevan al árbol a la muerte. Como ocurría en el caso de los montes bajos, este tipo de manejos deja un legado que va más allá de la actuación humana. En este caso, el cese del manejo de poda en altura genera una situación que inexorablemente va a conducir a la muerte prematura de los árboles. Esta situación es muy sensible desde el punto de vista de la gestión forestal por cuantas particularidades tiene este tipo de manejo.

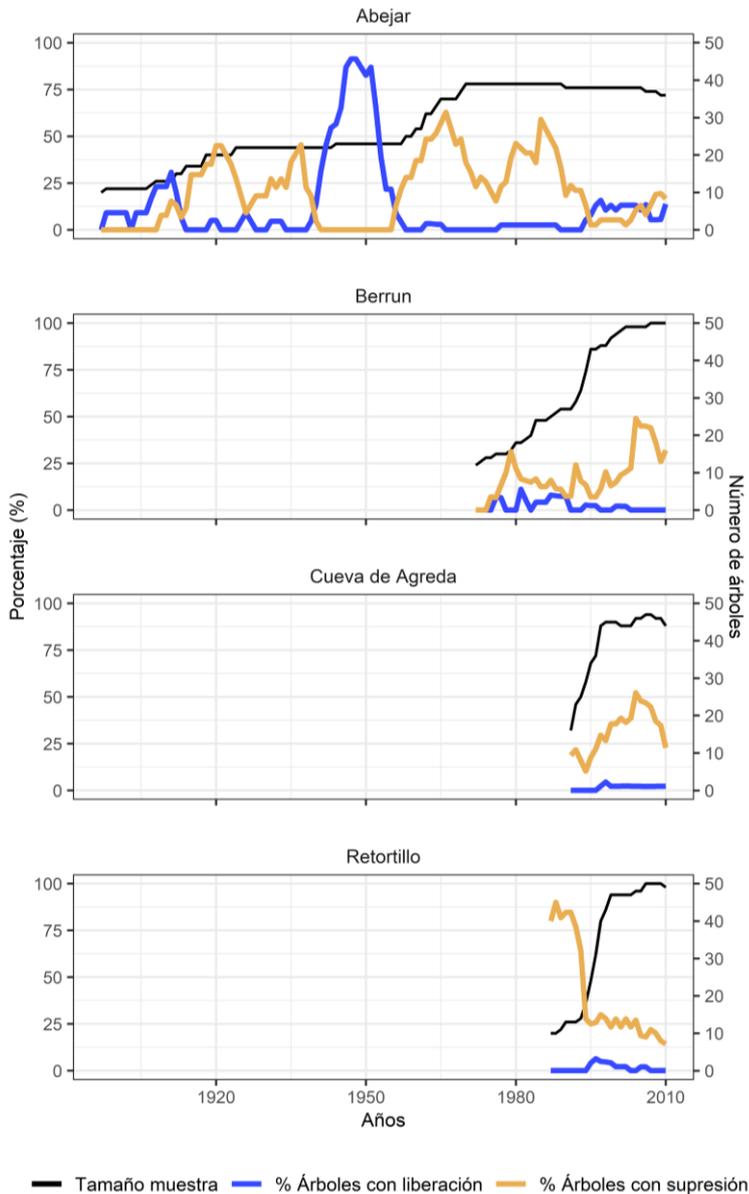


**Figura 9.3.** Evolución del crecimiento medio (AIB: Área de Incremento Basal) en las parcelas de muestreo

Sin embargo, hay numerosas características de los paisajes de trasmochos que los convierten en un reservorio de biodiversidad. En primer lugar, son árboles que tienen una longevidad muy superior a la del resto de árboles circundantes dado que este tipo de manejo mantiene el árbol bien definido. Además, suelen tener grandes diámetros debido al desarrollo de fustes tenaces para sujetar las ramas y la copa. Las cortas recurrentes provocan heridas que a veces no llegan a cicatrizar y es frecuente que den lugar a zonas con madera muerta y numerosas cavidades, no siendo raro que la parte central esté podrida, lo que genera numerosos microhábitats para fauna tanto de especies que se refugian en estas cavidades: mamíferos, aves, fauna xilófaga, y todos sus potenciales depredadores, sin olvidar a los hongos de la madera. La pérdida paulatina de estas masas, que supondría un grave problema ambiental, se produce fundamentalmente o bien por la densificación causada por la regeneración de árboles jóvenes en sus claros o bien por la transformación hacia formaciones más abiertas ocasionadas por la pérdida de los árboles trasmochados. Son notables, las actuaciones que desde diferentes instituciones se han realizado para mantener el trasmucho y así revitalizar a estos árboles, sin embargo, dadas la gran extensión de estas formaciones, no parece viable el



mantenimiento de las labores de trasmochado en todas las masas de este tipo. Por el contrario, no sabemos prácticamente nada de cómo responden este tipo de árboles al cambio climático, pero es previsible que, a los problemas mecánicos derivados de una descompensación de las copas se le añada una mayor sensibilidad a las sequías extremas como indican algunos fenómenos de puntisecado. En este proyecto no hemos podido abordar este aspecto, ya que nos hemos centrado en bosques dominados por árboles no trasmochados y que tengan la apariencia de un monte alto.



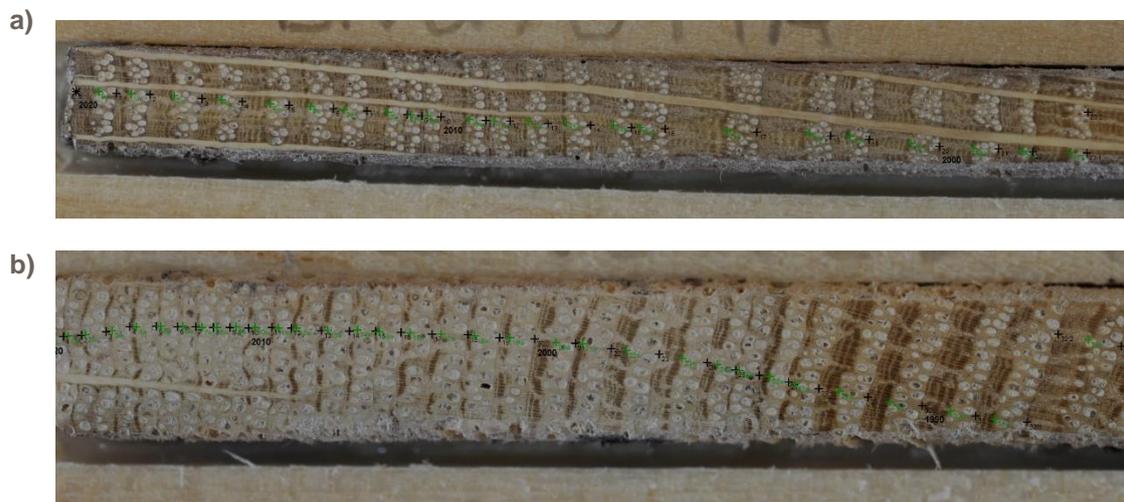
**Figura 9.4.** Eventos de supresión y liberación en las parcelas del melojo

## Selección de las parcelas y características

El muestreo de melojares ha tratado de reflejar la distribución de estas formaciones en los piedemontes de los principales sistemas montañosos de Soria (Fig. 9.2), incluyendo formaciones tanto del Sistema Ibérico, como del Moncayo y del Sistema Central. Como hemos indicado anteriormente, hemos tratado de buscar zonas con aspecto de monte alto, pero incluso muchos de los bosques con este aspecto provienen de monte bajo dada la intensa explotación de los bosques de la provincia en el pasado. Así, la edad de los pies (que no de los sistemas radicales) es sumamente joven en la mayor parte de las localidades, alrededor de 40 años, y solo hay una localidad en las proximidades de Abejar donde encontramos una edad media que supera el siglo. Los incrementos en términos de área basal (Fig. 9.3) son bastante similares entre poblaciones, pudiendo considerarse como moderados, entre 2.5 y 7.5 cm<sup>2</sup> anuales.

La historia de las masas (Fig. 9.4) es bastante heterogénea. Entre la masa más jóvenes, Retortillo, muestra una fuerte supresión inicial que sería resultado de una liberación previa (Fig. 9.3), posiblemente de una corta, pero que no se aprecia ya que afecta a un número más reducido de árboles. Sugiere la presencia de un evento que redujo la densidad previa de la masa,

pero que tuvo efecto en el crecimiento de los árboles, que aumentó poco. Por el contrario, Berrún y Cueva de Ágreda muestran una dinámica de aumento progresivo de la densidad como se aprecia en un número reducido, pero significativo, de árboles que se suprimen según se densifica la masa (Fig. 9.4). Sin embargo, este fenómeno no tiene un impacto en el crecimiento medio de las masas (Fig. 9.3), lo que indica una cierta heterogeneidad en el crecimiento de los árboles de la masa, en el que los árboles suprimidos experimentan tasas de crecimiento muy bajas en comparación con el crecimiento de los árboles sin suprimir (Fig. 9.5).



**Figura 9.5.** Muestras dendrocronológicas de dos árboles de *Quercus pyrenaica* en la masa de Berrún donde se aprecian las diferencias entre un árbol con crecimiento normal (A) y otro árbol que experimenta una supresión (B)

La parcela de Abejar, bastante más longeva, tiene una historia más compleja. Hubo una primera corta alrededor de 1910 que coincide con el establecimiento de varios individuos, seguido de una progresiva densificación de la masa que originó eventos de supresión. Los árboles supervivientes probablemente estaban dominados, lo que explicaría el bajo crecimiento medio de la masa hasta 1950 (Fig. 9.3). Un segundo evento, no necesariamente más intenso pero que sí afectó a casi la totalidad de árboles que han sobrevivido hasta la actualidad, ocurre a final de los años cuarenta del siglo pasado. Este evento promovió el reclutamiento de una cuarta parte de los árboles y aumentó el crecimiento medio de la masa hasta que los efectos de la densificación y supresión se hicieron más evidentes, condiciones que han perdurado hasta el presente donde tenemos una masa con crecimientos anuales muy reducidos.

## Efecto del clima en el crecimiento

### *Respuestas mensuales*

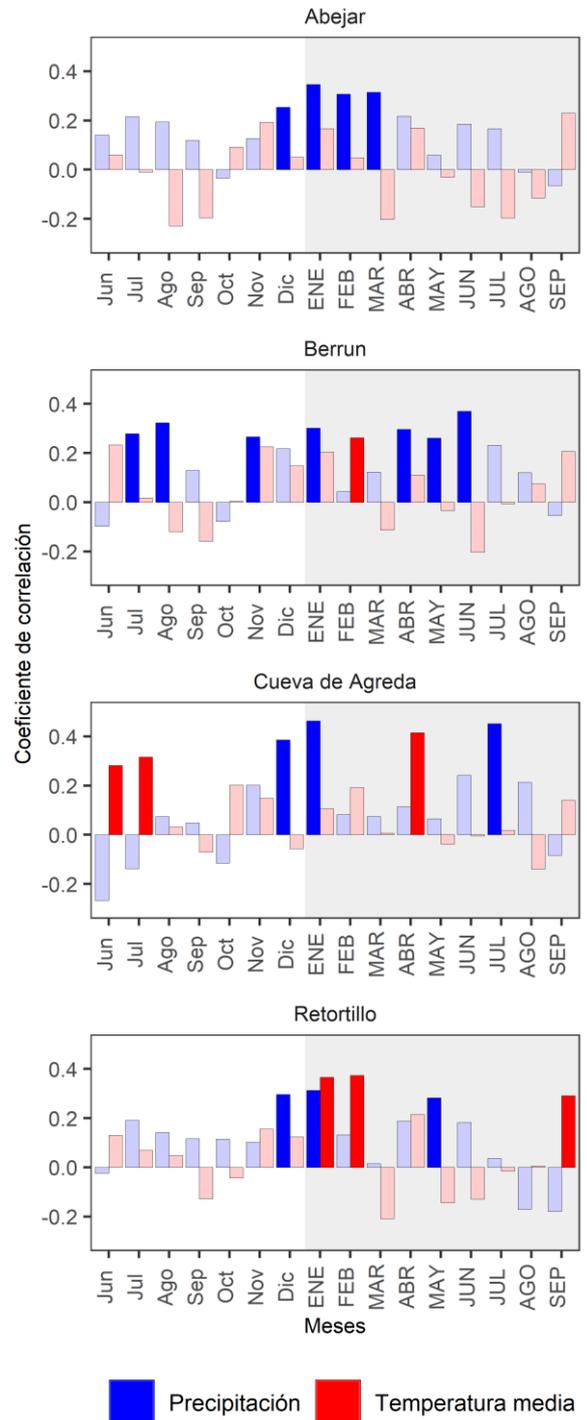
A pesar de la aparente disparidad de la respuesta climática de los bosques de *Quercus pyrenaica*, todos ellos tienen en común verse afectados por la disponibilidad hídrica en un período muy largo (Fig. 9.6), siendo clave en todos ellos las precipitaciones durante el período de invierno, desde diciembre hasta marzo (Abejar). Sorprendentemente, el efecto de las condiciones climáticas durante el período en que los árboles están con hojas es mucho menor, solo siendo significativos los meses de julio en Cueva de Ágreda, mayo-junio en Berrún y mayo en Retortillo. Las señales de temperatura son más escasas y dispersas. Aparecen en abril en Cueva de Ágreda, probablemente estimulando una brotación de las hojas más temprana, en invierno en Berrún y Retortillo, y una sorprendente señal positiva de junio-julio del año anterior. La señal positiva de la temperatura de septiembre en Retortillo es sorprendente, ya que en dichas fechas apenas debería producirse crecimiento secundario.

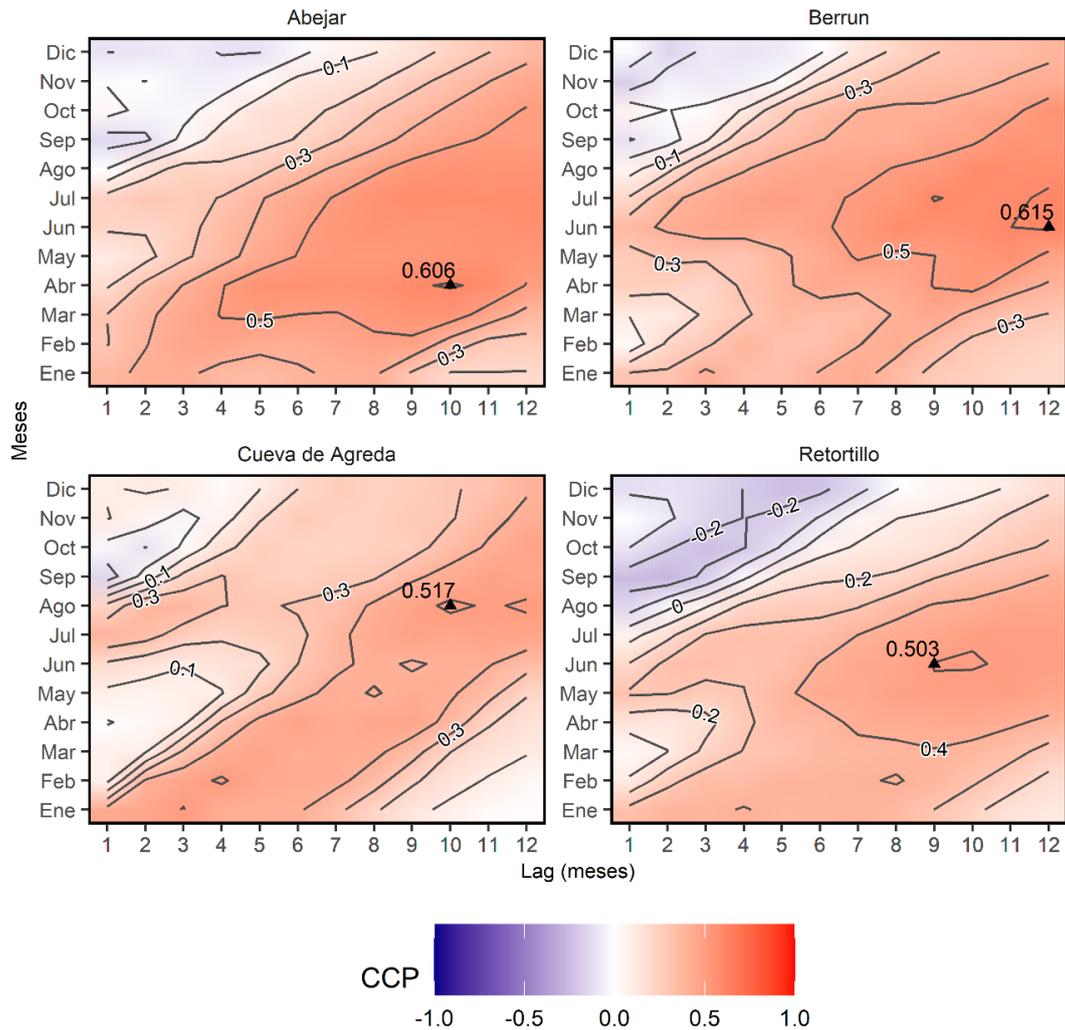


**Figura 9.6.** Correlaciones del crecimiento con la precipitación total mensual (colores azules) y la temperatura media mensual (colores rojos). Las barras con colores vivos reflejan correlaciones significativas. Los meses del mismo año de crecimiento en letras mayúsculas; área gris y minúsculas; área blanca para los del año anterior

**Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI**

La respuesta al SPEI confirma que el balance evapotranspirativo es clave en el crecimiento del melojo. Todos los valores son altos ( $R^2 = 25.3 - 37.8\%$ ) (Fig. 9.7) y se asocian con respuestas a períodos muy largos, de un mínimo de nueve meses en Retortillo hasta los doce meses en Berrún. Los períodos abarcan desde julio del año anterior, en Berrún o Abejar, a octubre en Retortillo o noviembre en Cueva de Ágreda. Es decir, la precipitación acumulada, desde la estación de crecimiento del año anterior es clave para el crecimiento del año en curso, lo que sugiere la necesidad de mantener un nivel elevado de agua en el suelo, incluso en períodos sin actividad fotosintética. Por otra parte, salvo en Abejar, en todo el resto de localidades estas señales incluyen el período de crecimiento del árbol, llegando desde junio en Retortillo y Berrún hasta el mes de agosto en Cueva de Ágreda. Llama notablemente la atención que las señales sean mucho más largas que en especies de ambientes mucho más secos, como el pino carrasco o la sabina albar. Esto pudiera deberse a la preferencia de esta especie por suelos más profundos en donde la capacidad del suelo para retener agua es mayor, lo que hace que la influencia de las precipitaciones sea más alargada en el tiempo debido a que esta se infiltra y almacena en los estratos más profundos del sustrato.



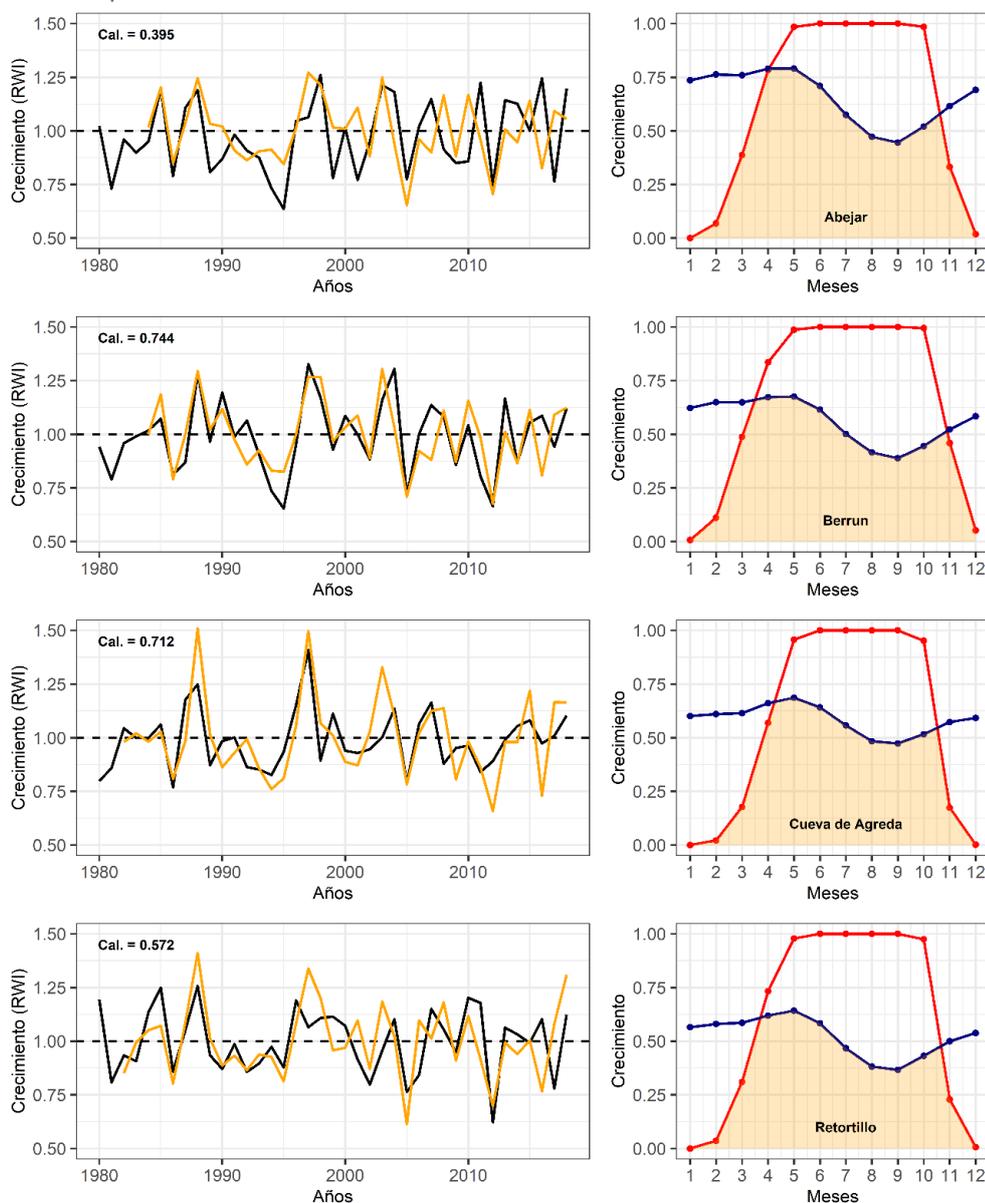


**Figura 9.7.** Mapas de calor con los valores de correlación (Cociente de Correlación de Pearson, CCP) entre el índice de sequía (SPEI) y el crecimiento. Las líneas grises representan las líneas imaginarias que unen todos los puntos con un mismo valor de correlación. El máximo valor de SPEI está señalado por un punto triangular. Los SPEI se han calculado cada mes (eje izquierdo) y para diversos grados de influencia de las condiciones climáticas de los meses previos (eje inferior: Lag). Por ejemplo, un SPEI calculado para junio con un Lag de 3 meses muestra el índice de sequía registrado para el mes de junio teniendo en cuenta las condiciones climáticas ocurridas hasta 3 meses con anterioridad.



### Respuesta agregada a la evapotranspiración mediante SPEI

Los modelos de crecimiento de Vaganov-Shashkin manifiestan la fuerte limitación hídrica del melojo. Los modelos son bastante buenos, superando el 50% de varianza explicada en dos localidades, si bien en Abejar, en la población más longeva, el modelo apenas explica un 15.6% de la varianza. Desde el punto de vista térmico, todas las localidades coinciden que hasta mayo no se alcanzan las condiciones térmicas adecuadas. De hecho, es a lo largo de este mes cuando las hojas del melojo brotan y se desarrollan, generalmente no estando completamente formadas hasta la segunda quincena de mayo o primera semana de junio. El crecimiento radial comienza un poco antes, ya que cuando brotan las hojas ya está madura la primera fila de vasos (Pérez de Lis et al. 2016). Las temperaturas se mantienen óptimas hasta octubre-noviembre, momento en que las hojas ya no son funcionales. La disponibilidad hídrica es limitada a lo largo de todo el año, aumentando esta limitación de Abejar a Retortillo. Esta fuerte limitación hídrica explica la necesidad de precipitaciones adecuadas a lo largo de un período de tiempo muy largo para poder disponer de reservas en el suelo que se ha señalado anteriormente.



**Figura 9.8.** Izquierda: crecimiento modelizado VS-Lite (línea naranja) ajustado sobre el crecimiento real (línea negra). Este modelo se ha aplicado sobre el crecimiento real durante el periodo 1980 - 2018 para calibrar los parámetros del modelo VS-Lite. Derecha: respuesta del crecimiento a la temperatura mensual (color rojo) y a la humedad de suelo mensual (azul) durante los meses del año (eje inferior). Los valores más altos denotan un crecimiento mayor. El gráfico muestra cómo el clima limita la respuesta del crecimiento, de forma que el árbol solo puede crecer hasta que o bien la temperatura o la humedad del suelo se vuelven un factor limitante (área anaranjada)



## REFERENCIAS CITADAS EN LAS FICHAS

- Arrechea, E., 2015. Los efectos de las intervenciones selvícolas en las masas de monte bajo de *Quercus pyrenaica* en los montes públicos de la Sierra del Moncayo en Aragón. En: Herrero, A. y M.A. Zavala (Ed.). Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. Pp. 535-542
- Arzac, A., Rozas, V., Rozenberg, P., & Olano, J. M. (2018). Water availability controls *Pinus pinaster* xylem growth and density: A multi-proxy approach along its environmental range. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250, 171-180
- Camarero, J. J., Olano, J. M., & Parras, A. (2010). Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *New Phytologist*, 185(2), 471-480
- Camarero, J. J., Rozas, V., & Olano, J. M. (2014). Minimum wood density of *Juniperus thurifera* is a robust proxy of spring water availability in a continental Mediterranean climate. *Journal of biogeography*, 41(6), 1105-1114
- García-Amorena, I., Rubiales, J. M., Amat, E. M., González, R. I., & Gómez-Manzanaque, F. (2011). New macrofossil evidence of *Pinus nigra* Arnold on the Northern Iberian Meseta during the Holocene. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 163(3-4), 281-288
- Hernández-Alonso, H., Madrigal-González, J., & Silla, F. (2021). Differential growth responses in *Pinus nigra*, *P. pinaster* and *P. sylvestris* to the main patterns of climatic variability in the western Mediterranean. *Forest Ecology and Management*, 483, 118921
- Martinez del Castillo E, Longares L, Serrano-Notivoli R, Sass-Klaassen U, De Luis M (2019). Spatial patterns of climate–growth relationships across species distribution as a forest management tool in Moncayo Natural Park (Spain). *European Journal of Forest Research* 138: 299–312.
- Olano JM, Hernández-Alonso H, Sangüesa-Barreda G, Rozas V, García-Cervigón AI, García-Hidalgo M (2022). Vessel area and secondary growth respond to precipitation at different temporal domains along *Fagus sylvatica* rear edge distribution. Manuscrito enviado para publicar.
- Olano JM, García-Cervigón AI, Sangüesa-Barreda G, Rozas V, Muñoz-Garachana D, García-Hidalgo M, García-Pedrero A (2021) Satellite data and machine learning reveal the incidence of late frost defoliations on Iberian beech forests. *Ecological Applications* 31: e02288
- Olano JM, Rozas V, Bartolomé D, Sanz D (2008) Effects of changes in traditional management on height and radial growth patterns in a *Juniperus thurifera* L. woodland. *Forest Ecology and Management* 255 (3-4), 506-512.
- Olano JM, Zavala MA, V Rozas V (2011) Disruption of *Juniperus thurifera* woodland structure in its northwestern geographical range: potential drivers and limiting factors. *European Journal of Forest Research*, 1-8
- Olsson, S., Grivet, D., Cattonaro, F. et al. Evolutionary relevance of lineages in the European black pine (*Pinus nigra*) in the transcriptomic era. *Tree Genetics & Genomes* 16, 30 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11295-020-1424-8>
- Pérez-de-Lis G, Rossi S, Vázquez-Ruiz RA, Rozas V, García-González I (2016) Do changes in spring phenology affect earlywood vessels? Perspective from the xylogenesis monitoring of two sympatric ring-porous oaks. *New Phytologist* 209: 521–530
- Sangüesa-Barreda G, Di Filippo A, Piovesan G, Rozas V, Di Fiore L, García-Hidalgo M, García-Cervigón AI, Muñoz-Garachana D, Baliva M, Olano JM (2021) Warmer springs have increased the frequency and extension of late-frost defoliations in southern European beech forests. *Science of the Total Environment* 775: 145860.
- Trabaud, L., Michels, C., & Grosman, J. (1985). Recovery of burnt *Pinus halepensis* Mill. forests. II. Pine reconstruction after wildfire. *Forest Ecology and management*, 13(3-4), 167-179



# GLOSARIO

## *Aclareo/Labores de clara*

Actuación de manejo forestal que consiste en la corta y extracción de parte de los pies de la masa principal. Esto se realiza con el objetivo de reducir la competencia entre los árboles, y fomentar el crecimiento de los árboles.

## *Actividad cambial*

Relativo a la actividad del cámbium, el tejido vegetal que se encuentra situado entre la corteza y la madera, y desde el que se originan los vasos del floema y la xilagénesis.

## *Área basal/Área de Incremento Basal*

El área basal es la superficie que ocupa el tronco de un árbol. Suele utilizarse el área basal por hectárea como medida de la cantidad de madera en una masa. Esta área se suele medir a la altura del pecho (habitualmente 1,3 m). El valor se obtiene de medir el diámetro de un árbol y aplicar la fórmula del área de un círculo ( $\pi \cdot r^2$ ), asumiendo que la sección del tronco de un árbol es circular.

El área de incremento Basal (AIB) es el incremento de área basal de un árbol expresado por año. El AIB se puede calcular a través de la medición de la anchura de los anillos de crecimiento de los árboles, pudiéndose reconstruir el diámetro que ha tenido el árbol a lo largo de su vida. El AIB se utiliza a menudo como una medida del crecimiento de los árboles ya que elimina en parte la tendencia de la edad del árbol en su crecimiento. Además, representa mejor la realidad debido a que las anchuras de anillos se miden en unidades de una sola dimensión y los AIB en dos dimensiones (mm frente a mm<sup>2</sup>).

## *Corta a hecho*

Tipo de corta de una masa forestal que consiste en la eliminación de todos o gran parte de los pies. Estas cortas típicamente se realizan cuando una masa ha llegado a su turno óptimo de producción.

## *Crecimiento sincrónico/asincrónico*

Hablamos de fenómenos de sincronía/asincronía cuando la variabilidad interanual de los crecimientos entre árboles de una parcela, o entre parcelas son muy parecidos/distintos. Es de esperar que los bosques formados por árboles de especies sensibles al clima y que no han sido manejados muestren valores altos de sincronía.

## *DAP*

Diámetro de un árbol medido a la altura del pecho, usualmente 1,3 m sobre el nivel del suelo. Es una de las medidas más comunes en silvicultura junto con la altura de los árboles.

## *Modelo VS-Lite*

Modelo propuesto por los autores E.A. Vaganov y V.A. Shashkin que permite la simulación del crecimiento de los árboles. La versión VS-lite calcula el crecimiento mensual de los árboles en base a la interacción de dos parámetros ambientales: temperatura media y la humedad del suelo ([Vaganov et al. 2006](#)).

## *Reclutamiento*

Proceso con el que se denomina la adición de individuos (árboles) a una población (bosque). Se suele considerar que un árbol ha sido efectivamente reclutado cuando adquiere cierta talla, por ejemplo, más de 2 metros de altura o más de 5 cm de DAP.

## *Regeneración*

Se refiere al reclutamiento de nuevos árboles al bosque.



### *SPEI (Índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado)*

Propuesto por Vicente-Serrano *et al.* (2010), el SPEI es uno de los índices de sequía más utilizados. Se calcula con los datos de precipitación y evapotranspiración potencial que presenta un mes teniendo en cuenta las condiciones climáticas mensuales previas agregadas. En este trabajo el periodo de tiempo que se ha considerado oscila entre 1 y 12 meses. Valores de SPEI positivos/negativos definen condiciones climáticas húmedas/secas.

### *Supresión/liberación del crecimiento*

Se refiere a cambios bruscos en las tasas de crecimiento de los árboles que se mantienen por un período de tiempo. En este caso se considera supresión/liberación cuando el crecimiento de un período de 10 años es un 50% inferior/superior a la década anterior. Suelen estar causados por fenómenos que alteran la competencia, aumentándola (densificación de la masa) o reduciéndola (por corta de otros individuos).

### *Variación intraanual/interanual*

Aquello que varía dentro del mismo año (intraanual) o entre distintos años (interanual).

### *Xérico/xericidad*

Sinónimo de seco o árido. También se dice de una especie que tolera o es afín a las condiciones o climas secos.

### *Xilogénesis*

Proceso de formación de la madera.

Monte alto/monte bajo.



LIFE SORIA

# ForestAdapt

[www.soriaforestadapt.es](http://www.soriaforestadapt.es)  
[info@soriaforestadapt.es](mailto:info@soriaforestadapt.es)



CON LA CONTRIBUCIÓN DEL INSTRUMENTO FINANCIERO LIFE DE LA UNIÓN EUROPEA

