



Universidad  
Rey Juan Carlos

**GRADO EN BIOLOGÍA**  
**Curso Académico 2024/25**  
**Trabajo de Fin de Grado**

**Análisis de impacto de variables  
climáticas en la dinámica  
vegetativa de *Pinus sylvestris*,  
*Quercus ilex subsp. ballota* y  
*Quercus pyrenaica* mediante  
teledetección**

**Autor: Mónica Moreno López**

**Director: Francisco Carreño Conde**

## ÍNDICE

1.	RESUMEN	3
2.	INTRODUCCIÓN	4
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	6
3.1.	Selección de Zonas de Estudio y Especies	6
3.2.	Obtención y Procesamiento de Imágenes	7
3.3.	Datos Climatológicos	8
3.4.	Análisis de Datos	8
4.	RESULTADOS	9
4.1.	Análisis de Resultados de NDVI	9
4.2.	Análisis Estacional de NDVI	13
4.3.	Análisis de Correlación	15
4.4.	Análisis de Correlación Estacional	17
5.	DISCUSIÓN	23
5.1.	<i>Pinus sylvestris</i>	23
5.2.	<i>Quercus ilex subsp. ballota</i>	24
5.3.	<i>Quercus pyrenaica</i>	25
5.4.	Limitaciones encontradas	26
6.	CONCLUSIONES	27
7.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	27
8.	BIBLIOGRAFÍA	28

## 1. RESUMEN

En este trabajo se ha investigado la respuesta vegetativa de tres especies arbóreas (*Pinus sylvestris*, *Quercus ilex subsp. ballota* y *Quercus pyrenaica*) en la Comunidad de Madrid, utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) derivado de imágenes satelitales de Sentinel-2. Las imágenes, obtenidas desde enero de 2016 hasta abril de 2024, se procesaron para analizar la salud y densidad de la vegetación en tres zonas específicas, cada una dominada por una de las especies estudiadas. Se seleccionaron las zonas cercanas a la estación climatológica de Colmenar Viejo para correlacionar los datos de NDVI con variables climáticas y el Índice de Sequía Estandarizado (SPEI). Con el conjunto de datos se utilizaron los softwares de acceso libre QGIS y Rstudio para los análisis, que revelaron diferencias significativas en el NDVI entre las especies y determinaron cómo les afectan las variaciones climáticas. Las tres especies mostraron variabilidad estacional y dependencias significativas con la temperatura, las precipitaciones, la humedad y los índices de sequía a diferentes escalas temporales. *Pinus sylvestris* mostró una mayor estabilidad en sus valores de NDVI, mientras que *Quercus pyrenaica* fue más sensible a los cambios ambientales. Las correlaciones entre NDVI y SPEI fueron especialmente significativas para *Quercus ilex*, subrayando la importancia del estrés hídrico sobre su desarrollo. Estos resultados proporcionan información clave de la dinámica vegetativa en respuesta a las condiciones climáticas, suponiendo una base sólida para futuras investigaciones y estrategias de conservación forestal.

## 2. INTRODUCCIÓN

En un contexto de cambio global, comprender cómo las variables ambientales influyen en los ecosistemas es crucial para su conservación ([IPCC, 2022](#)). A este respecto, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) resulta una herramienta valiosa que permite evaluar la salud y densidad de la vegetación mediante teledetección. Este ofrece una ventaja significativa al permitir un seguimiento continuo y a gran escala, lo que es especialmente útil en estudios de largo plazo y en áreas de difícil acceso ([Piedallu et al., 2019](#) y [Adell et al., 2024](#)).

Aunque en los últimos años los esfuerzos de investigación han permitido grandes avances en el conocimiento sobre la dinámica de la vegetación y su relación con las variables climáticas, existen aún lagunas importantes en la comprensión de las respuestas específicas de diferentes especies a estas variables. En particular, la determinación de especies de especial vulnerabilidad, la identificación de patrones estacionales o un mayor énfasis en factores como el estrés hídrico son de vital importancia para desarrollar estrategias de manejo y conservación adecuadas ([Allen et al., 2010](#)).

Por todo ello, este estudio se ha centrado en analizar la respuesta vegetativa de tres especies arbóreas en la Comunidad de Madrid: *Pinus sylvestris*, *Quercus ilex subsp. ballota* y *Quercus pyrenaica*. Estas fueron elegidas por su alto valor tanto ecológico como económico. Siendo que las dos especies de *Quercus* son consideradas Hábitats de Interés Comunitario ([Rodà, Vayreda y Ninyerola, 2009](#) y [García y Jiménez, 2009](#)) y el pino albar, aún sin serlo, reúne las características necesarias y está considerada una especie de singular importancia dado su uso en reforestación y manejo forestal, así como su singularidad genética ([Rodà et al., 2009](#)).

Partiendo de imágenes satelitales de Sentinel-2 desde enero de 2016 hasta abril de 2024, se tuvieron en cuenta los datos de NDVI de las zonas de estudio de cada especie para analizar su estado vegetativo. Por su lado, los datos climatológicos de temperaturas (medias, mínimas y máximas), precipitaciones y humedad se obtuvieron de la estación de Colmenar Viejo. A partir de los cuales se calculó e incluyó el Índice de Sequía Estandarizado (SPEI) que integra información sobre precipitación y evapotranspiración, proporcionando una medida de déficit hídrico útil para evaluar el impacto del estrés hídrico en la vegetación ([Vicente-Serrano et al., 2010](#)), un enfoque poco común en estudios de teledetección en este país, pero igualmente prometedor dada su capacidad para incluir el déficit hídrico como variable sin disponer de datos edafológicos ([Jones y Vaughan, 2010](#) y [Almeida-Ñauñay et al., 2022](#)).

En este contexto, la elección de bases de datos de libre acceso tanto para la obtención de los productos satelitales como los datos climáticos, así como el uso de *software* de código abierto como QGIS y RStudio resulta un pilar fundamental en el proceso de este estudio. No solo porque facilitan el acceso y procesamiento de datos de alta calidad a mínimo coste, sino también porque representan un compromiso con la transparencia y la replicabilidad del trabajo. Siendo esto especialmente importante en materia de conservación, donde evaluar y adaptar múltiples estrategias es esencial para desarrollar metodologías válidas y sostenibles.

Así pues, el objetivo principal es identificar y cuantificar cómo estas especies responden a diferentes variables climáticas y al Índice de Sequía Estandarizado (SPEI), proporcionando información relevante para estrategias de gestión y conservación. Primero analizando las variaciones temporales del NDVI para identificar patrones como estabilidad y estacionalidad. Y después analizando la relación de las variables climáticas con dichas variaciones, evaluando así el impacto individual y general sobre la vegetación de cada una de ellas.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Selección de Zonas de Estudio y Especies

Las zonas de estudio y los datos de las mismas se obtuvieron usando el Mapa Forestal de España (MFE25), ya que se trata de un documento de libre acceso con datos actualizados y constatados por el Ministerio de España para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (Abad y Labarga, 2009 y Alberdi et al., 2016). Asegurando una ocupación del 100% de cada especie y teniendo en cuenta que todas las zonas estuvieran contenidas en un *buffer* de 25 km desde la estación climatológica de Colmenar Viejo, se seleccionaron: Un pinar de pino albar (*Pinus sylvestris*), un encinar adeshado (*Quercus ilex subespecie ballota*) y un melojar (*Quercus pyrenaica*). Para todo ello además de para delimitar las áreas y crear capas vectoriales que permitieran recortar las imágenes satelitales a los límites de las zonas de estudio se utilizó el programa QGIS. En el mapa presentado a continuación se detalla la localización de las 3 zonas de estudio seleccionadas en la Comunidad de Madrid.

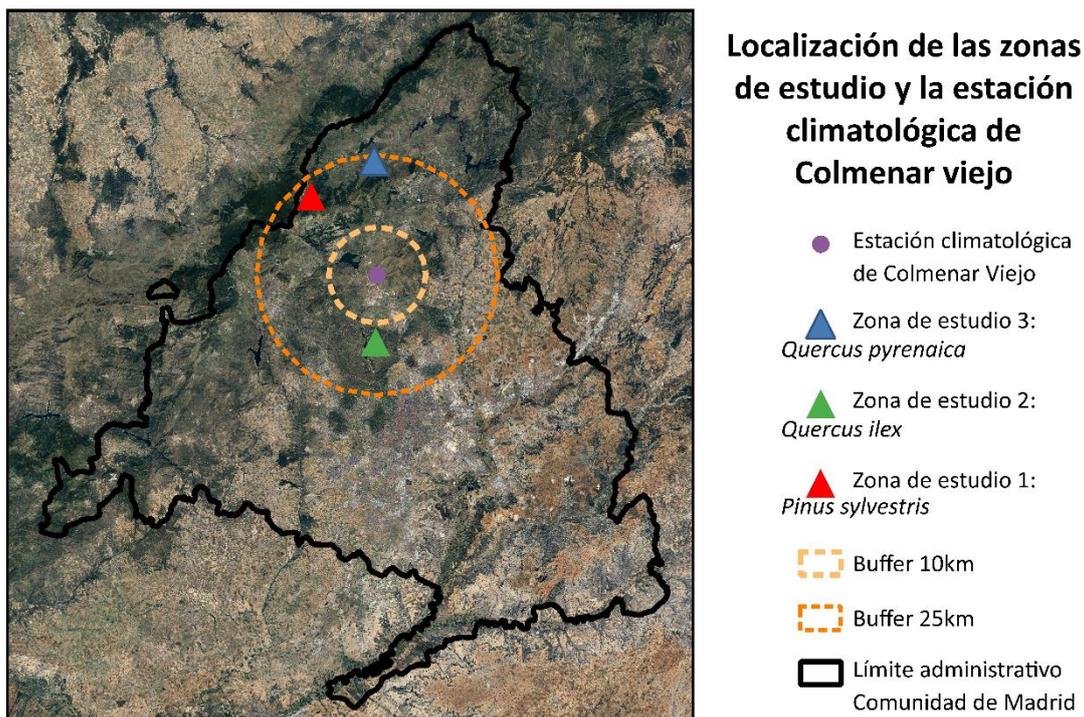


Figura 1. Mapa con la localización de las zonas de estudio indicadas en distintos colores mediante triángulos, la estación climatológica de Colmenar Viejo marcada por un punto violeta, los límites de los buffers de 10 y 25km aplicados para la selección de las zonas de estudio y el límite administrativo de la Comunidad de Madrid como referencia.

### 3.2. Obtención y Procesamiento de Imágenes

Se seleccionaron las imágenes Sentinel-2 (producto L2A), que incorpora correcciones atmosféricas, ya que este es el satélite que mayor resolución ofrece (Varghese et al., 2021 y West et al., 2022) y, por tanto, resulta el más adecuado para la escala del estudio. Se descargaron productos mensuales desde enero del año 2016 hasta abril de 2024 a partir de la plataforma COPERNICUS. Para ello se establecieron criterios de búsqueda con un área poligonal que incluyera todas las zonas de estudio y se filtró para seleccionar solamente aquellas imágenes que tuvieran un porcentaje máximo de cobertura de nubosidad del 10% cuando era posible.

El NDVI se calculó también mediante QGIS utilizando la fórmula estándar (Pettorelli, 2013):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Dónde NIR es la reflectancia del infrarrojo cercano, la banda 8 de los productos Sentinel-2 y RED es la reflectancia en el espectro rojo, la banda 4. Los productos obtenidos se recortaron por los límites de las zonas de estudio y se aplicaron correcciones de nubosidad utilizando la banda SCL en RStudio.

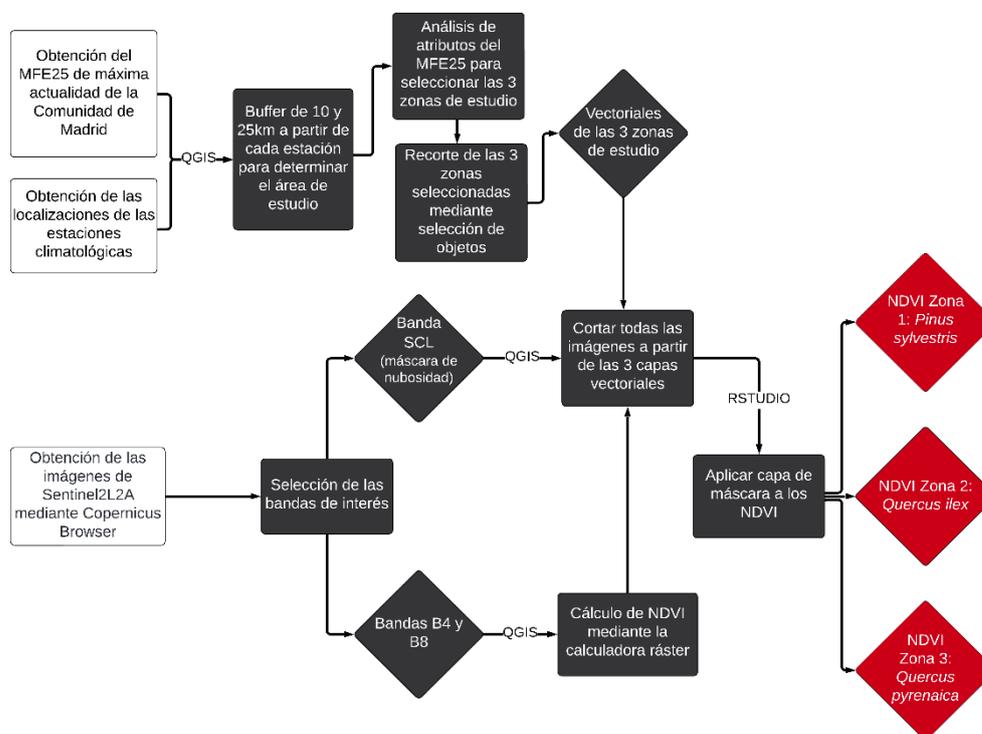


Ilustración 1. Diagrama de procesamiento de las imágenes satelitales completo hasta la obtención de los productos NDVI.

### 3.3. Datos Climatológicos

Se obtuvieron datos climáticos (temperatura media, mínimas y máximas, precipitaciones y humedad) de la estación de Colmenar Viejo a través del portal de descargas “OpenData” de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Con estos datos y el paquete SPEI en Rstudio se calculó el Índice de Sequía Estandarizado (SPEI) a diferentes escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses) partiendo de la fórmula de Hargreaves-Samani (Senatore et al., 2020):

$$ET_o = CR_a (T_{media} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Donde  $T_{media}$  es la temperatura media diaria en °C;  $T_{max}$  es la temperatura máxima diaria en °C;  $T_{min}$  es la temperatura mínima diaria en °C;  $R_a$  es la radiación extraterrestre en mm/día, calculada a partir de la latitud de la estación de Colmenar Viejo (40.415) y el día del año; Y  $C$  es el coeficiente de Hargreaves que es de 0.0023.

Para el cálculo de  $R_a$  se utilizó el método de Allen et al., 1998:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [(\omega_s \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta) + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin(\omega_s)]$$

Donde  $G_{sc}$  es una constante solar (0.0820 MJ m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>);  $d_r$  es el inverso de la distancia relativa Tierra-Sol;  $\omega_s$  es el en ángulo horario del atardecer;  $\phi$  la latitud en radianes; Y  $\delta$  la declinación solar también en radianes. A su vez:

$$d_r = 1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi\text{doy}}{365}\right);$$

$$\delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi\text{doy}}{365} - 1.39\right);$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi)\tan(\delta));$$

Por último,  $R_a$  se multiplicó al añadirlo a la ecuación global por 0.408 ya que parte de estar expresado en unidades de energía (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) y debe estar en unidades de agua evaporada (mm día<sup>-1</sup>).

### 3.4. Análisis de Datos

Para el análisis estadístico de los datos de NDVI y variables climáticas se utilizaron varias metodologías partiendo de sus correspondientes paquetes y funciones de Rstudio. En primer lugar, se realizaron análisis descriptivos previos de los datos para determinar los promedios, desviación y distribución. Se aplicó el test de Shapiro-Wilk para evaluar si los valores siguen una distribución normal lo cual es clave para su posterior análisis estadístico (Cayuela y de la Cruz, 2022).

Se utilizó el test de Kruskal-Wallis para determinar si existían diferencias significativas entre las medias de NDVI de las diferentes especies (Ahmad et al., 2023). Y se descompusieron las series temporales de NDVI para identificar si existían tendencias a largo plazo y/o componentes estacionales.

Para estudiar las relaciones entre las variables se calcularon coeficientes de correlación de Spearman y Kendall entre NDVI y SPEI, así como entre NDVI y variables climáticas (temperaturas medias, mínimas y máximas, precipitaciones y humedad). Y, del mismo modo, se evaluaron también las diferencias en el NDVI entre las distintas estaciones del año y si la relación con las variables climáticas sufría variaciones (Khoury y Coomes, 2020). Para la cuantificación de los resultados de las correlaciones obtenidos se utilizó en todo momento la escala ordinal de Cohen, 1998; que se muestra a continuación.

Tabla 1. Escala del grado de correlación según el rango de valores obtenido a partir del criterio de Cohen, 1998.

1.00 a 0.41	0.41 a 0.26	0.26 a 0.1	0.10 a -0.10	-0.10 a -0.26	-0.26 a -0.41	-0.41 a -1.00
Positiva grande	Positiva mediana	Positiva pequeña	Nula	Negativa pequeña	Negativa mediana	Negativa grande

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis de Resultados de NDVI

En primer lugar, del análisis de la distribución de valores de NDVI se obtuvieron los siguientes histogramas Figuras 2, 3 y 4. El histograma para *Pinus sylvestris* (Figura 2) muestra que la mayoría de los valores de NDVI se agrupan alrededor de 0.4, con una distribución sesgada hacia la izquierda. Hay pocos valores atípicos en los extremos más altos y bajos, y la línea de densidad superpuesta proporciona una visualización más clara de la forma de la distribución. Para *Quercus ilex* (Figura 3) la distribución es más uniforme, pero aún muestra un sesgo hacia la izquierda. Los valores se distribuyen principalmente entre 0.2 y 0.5, y la línea de densidad indica múltiples picos, sugiriendo una distribución multimodal. Para *Quercus pyrenaica* (Figura 4), la distribución de NDVI muestra una concentración alrededor de 0.3, pero los valores se distribuyen de una forma mucho más simétrica por todo el rango, como refleja la línea de densidad.

Histograma de valores de NDVI de *Pinus sylvestris*

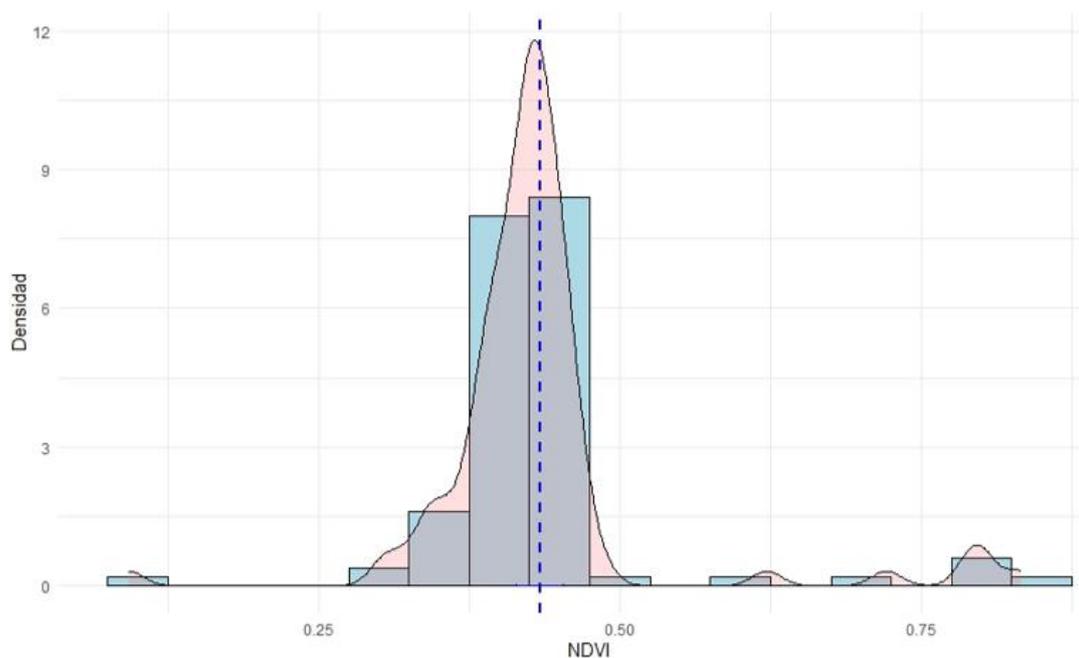


Figura 2. Histograma que representa la distribución de valores promedio de NDVI de *Pinus sylvestris*, con el intervalo de confianza marcado con una línea vertical azul y una línea de densidad superpuesta en tono rosáceo.

Histograma de valores de NDVI de *Quercus ilex*

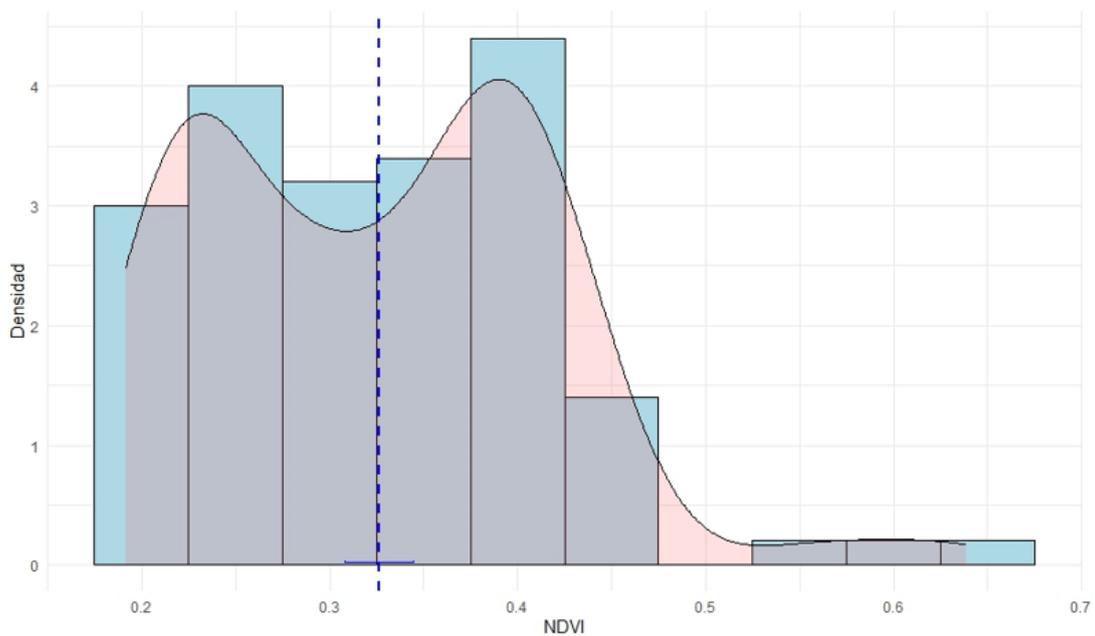


Figura 3. Histograma que representa la distribución de valores promedio de NDVI de *Quercus ilex*, con el intervalo de confianza marcado con una línea vertical azul y una línea de densidad superpuesta en tono rosáceo.

Histograma de valores de NDVI de *Quercus pyrenaica*

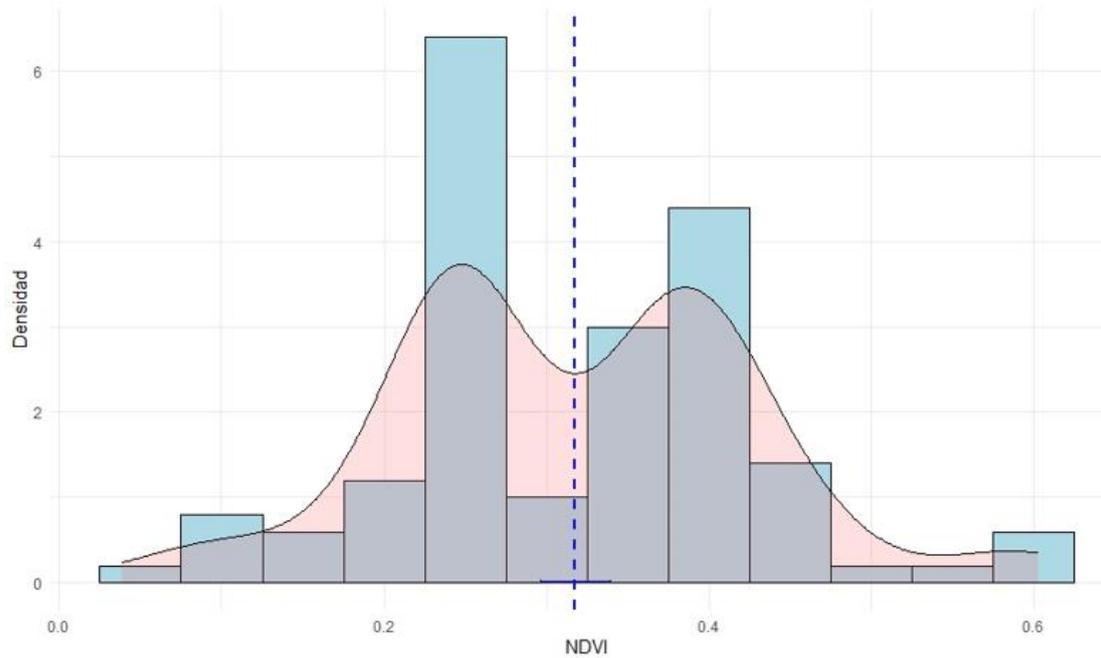


Figura 4. Histograma que representa la distribución de valores promedio de NDVI de *Quercus pyrenaica*, con el intervalo de confianza marcado con una línea vertical azul y una línea de densidad superpuesta.

Por otro lado, mediante el análisis de la tendencia del NDVI a lo largo del tiempo (Figura 5) se observa como *Pinus sylvestris* (Rojo) es la especie con los valores de NDVI más altos de manera consistente. *Quercus ilex* (Verde), por el contrario, presenta valores medios más bajos y muy fluctuantes. Mientras que *Quercus pyrenaica* (Azul) presenta los valores de NDVI más bajos entre las tres especies, así como grandes fluctuaciones.

### Tendencia de valores de NDVI a lo largo del tiempo

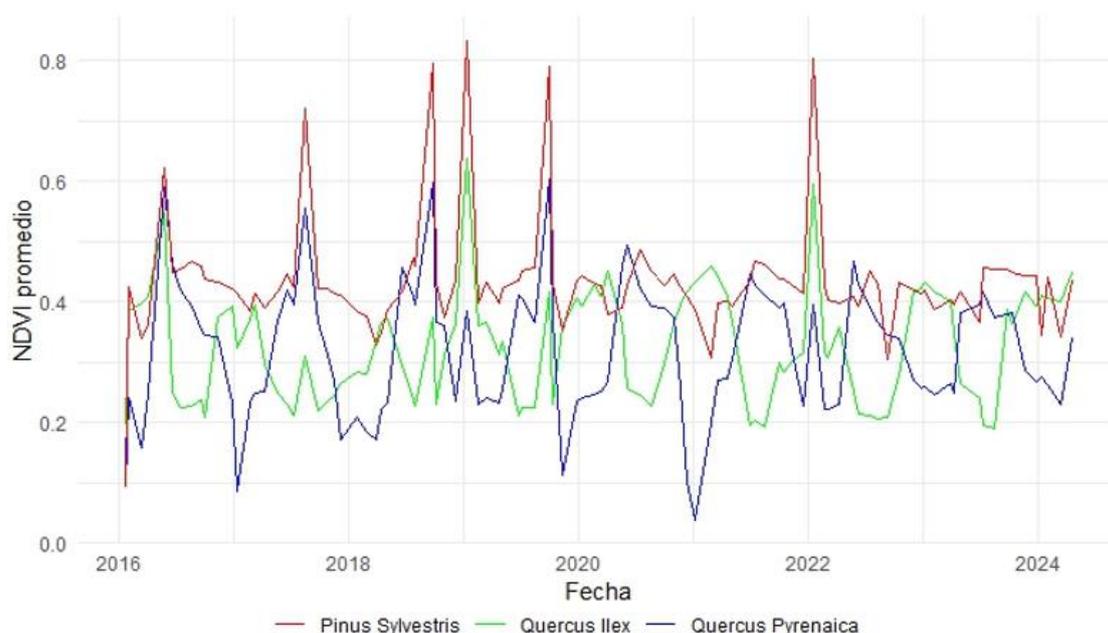


Figura 5. Gráfico de tendencia de los valores promedio de NDVI a lo largo del tiempo de estudio para cada una de las diferentes especies. Los valores de NDVI se muestran en el eje y (rango de 0 a 1), mientras que el tiempo (años) se representa en el eje x.

Los resultados del test de Kruskal-Wallis y el posterior test de Dunn con la corrección de Bonferroni determinaron que las diferencias entre los promedios de *Pinus sylvestris* con los *Quercus* son significativas,  $p < 0.0001$ , mientras que entre las dos especies de *Quercus* ellos no lo son.

Los resultados del test de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de los valores fueron para *Pinus sylvestris*  $p < 2.2 \times 10^{-16}$ , para *Quercus ilex*  $p = 0.001367$ , y para *Quercus pyrenaica*  $p = 0.0305$ . Por lo que como en todos los casos el p valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula, los datos no siguen una distribución normal.

Del mismo modo, se obtuvieron gráficos Q-Q (Figura 6) para todas las especies, que muestran desviaciones de la línea de normalidad, especialmente en los extremos, lo que confirma que los datos no siguen una distribución normal. En el primer gráfico, correspondiente a *Pinus sylvestris*, los valores de NDVI presentan una ligera desviación positiva en los cuantiles altos. El segundo gráfico, correspondiente a *Quercus ilex*, muestra una mayor dispersión en los cuantiles intermedios y altos. El tercer gráfico, correspondiente a *Quercus pyrenaica*, presenta una notable dispersión en los cuantiles bajos y altos, indicando una mayor variabilidad en la distribución de los valores de NDVI.

### Gráficos Q-Q de residuos para las distintas especies

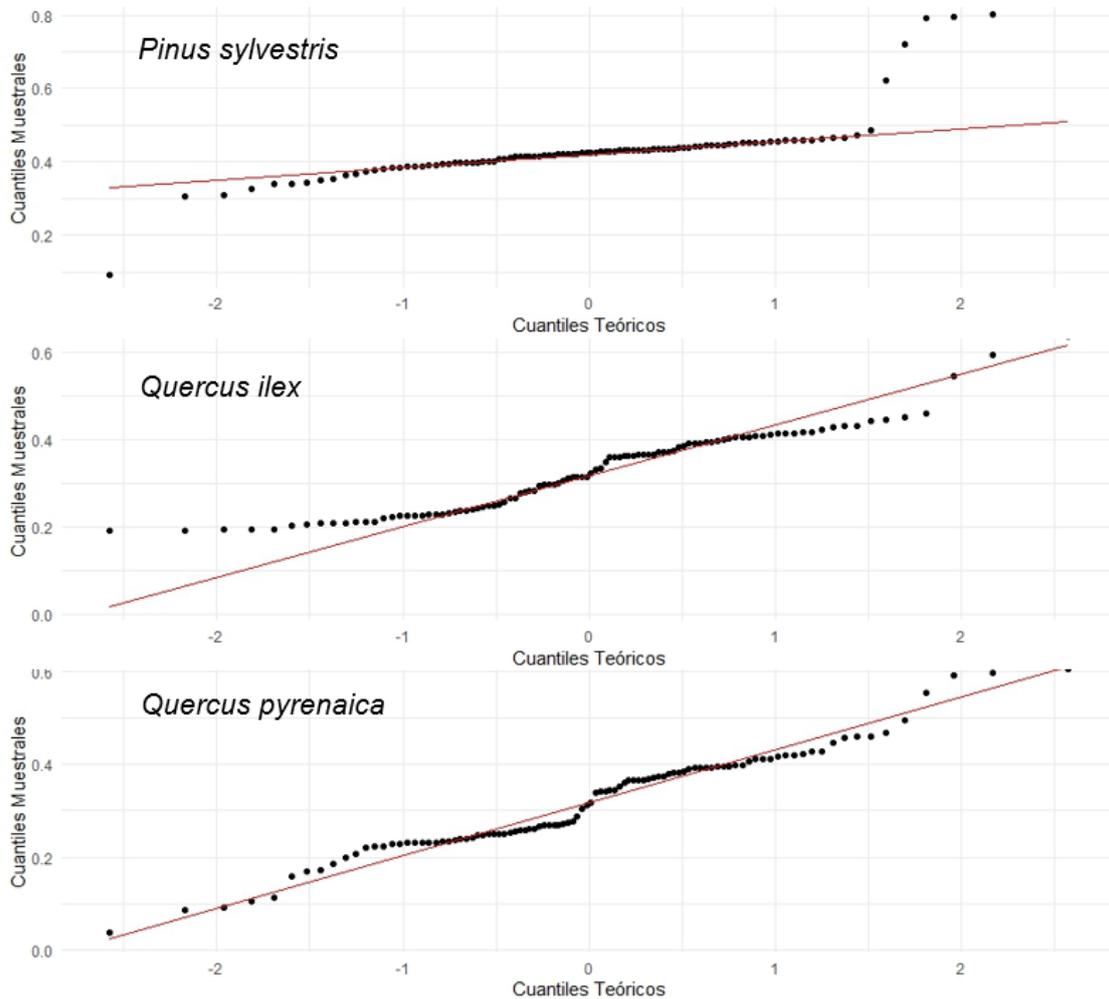


Figura 6. Gráficos Q-Q de NDVI para *Pinus sylvestris*, *Quercus ilex* y *Quercus pyrenaica*. Se muestra la distribución de los valores de NDVI obtenidos (eje y) en comparación a una distribución normal teórica (eje x). Las desviaciones de los puntos respecto a la línea diagonal indican desviaciones de la normalidad.

#### 4.2. Análisis Estacional de NDVI

Los resultados indicaron patrones estacionales claros, con picos en la actividad fotosintética durante la primavera y el verano, y valles en otoño e invierno. Para el estudio se determinaron las cuatro estaciones distribuyendo los meses de esta manera:

- Invierno: diciembre, enero y febrero.
- Primavera: marzo, abril y mayo.
- Verano: junio, julio y agosto.
- Otoño: septiembre, octubre y noviembre.

*Pinus sylvestris* (Figura 7) mostró una variabilidad estacional significativa entre verano e invierno, *Quercus ilex* (Figura 8) presentó diferencias notables entre verano y las

demás estaciones, y *Quercus pyrenaica* (Figura 9) mostró mayor variabilidad entre invierno y las demás estaciones.

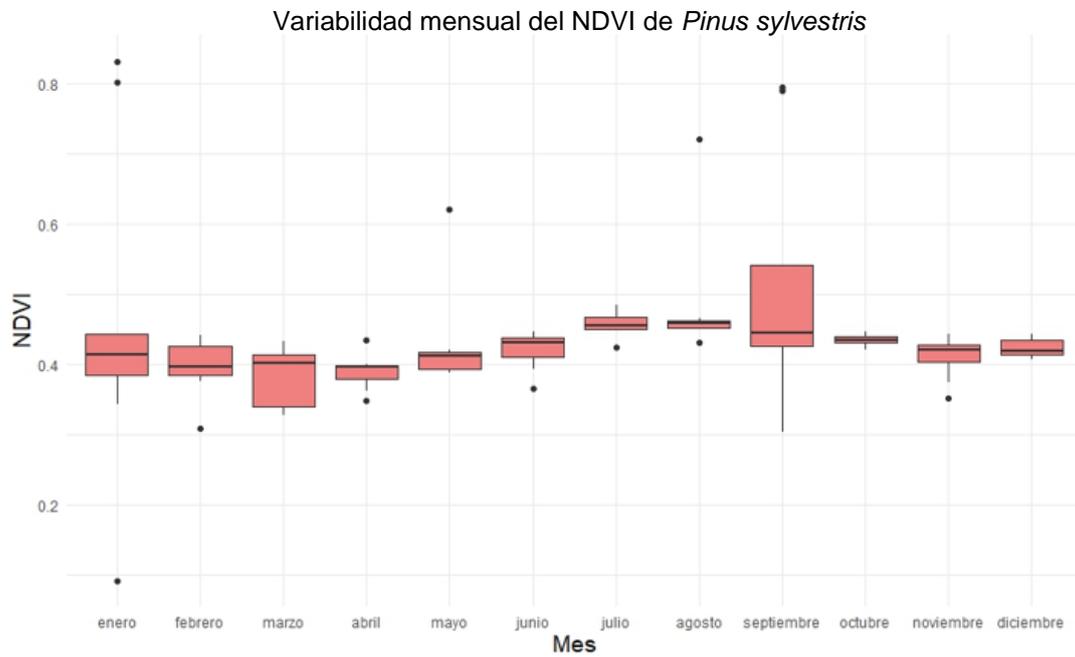


Figura 7. Gráfico de cajas de variabilidad estacional de NDVI para *Pinus sylvestris*. Los valores de NDVI se muestran en el eje y (rango de 0 a 1), mientras que los meses del año se representan en el eje x.

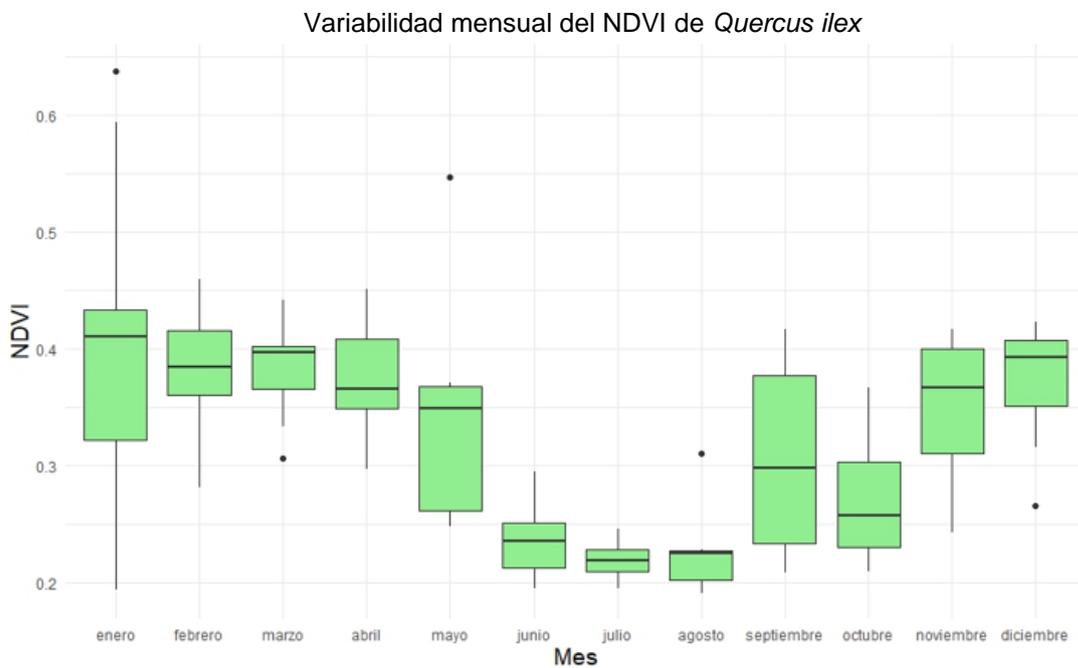


Figura 8. Gráfico de cajas de variabilidad estacional de NDVI para *Quercus ilex*. Los valores de NDVI se muestran en el eje y (rango de 0 a 1), mientras que los meses del año se representan en el eje x.

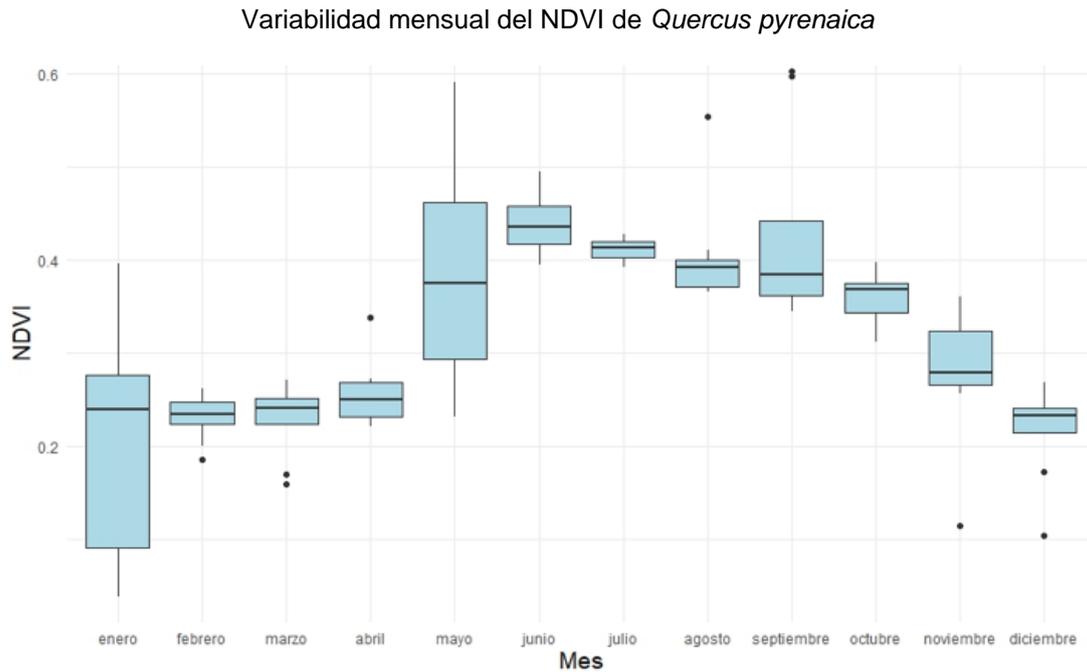


Figura 9. Gráfico de cajas de variabilidad estacional de NDVI para *Quercus pyrenaica*. Los valores de NDVI se muestran en el eje y (rango de 0 a 1), mientras que los meses del año se representan en el eje x.

### 4.3. Análisis de Correlación

Por un lado, se evaluaron las correlaciones entre NDVI y las variables climáticas (temperatura, precipitación, y humedad) para cada especie siguiendo las indicaciones de Rodríguez et al., 2024. *Pinus sylvestris* (Figura 10) mostró una correlación positiva fuerte con la temperatura (0.51) y la evapotranspiración (0.50), y correlaciones negativas con las precipitaciones (-0.33) y la humedad (-0.44). *Quercus ilex* (Figura 11) presentó una correlación positiva con las precipitaciones (0.32) y la humedad (0.47), mientras que la correlación con la temperatura fue negativa (-0.64). Además, mostró una correlación negativa fuerte con la evapotranspiración (-0.64). Por su parte, *Quercus pyrenaica* (Figura 12) presentó una correlación positiva con la temperatura (0.47) y negativas con las precipitaciones (-0.27) y la humedad (-0.43), indicando una preferencia por condiciones más cálidas y secas.

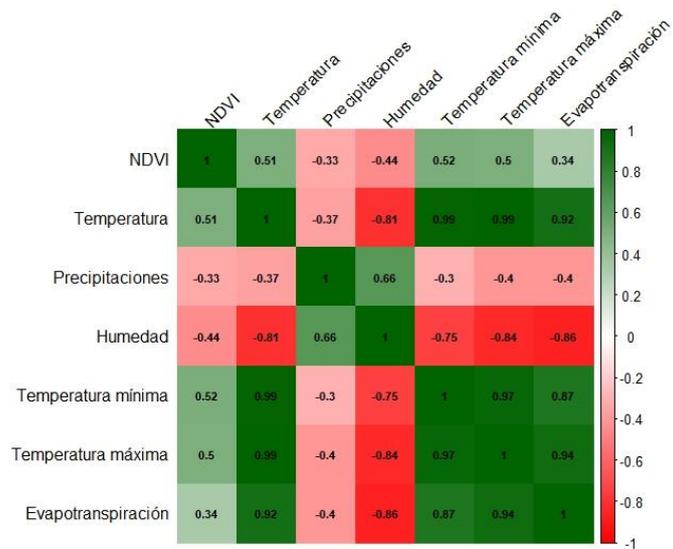


Figura 10. Matriz de correlación para *Pinus sylvestris*. Los coeficientes de correlación entre las variables climáticas y el NDVI se muestran en una escala de -1 a 1.

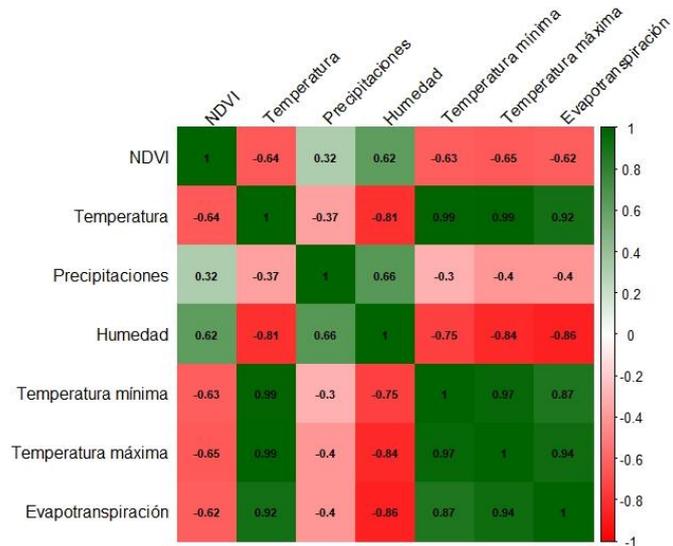


Figura 11. Matriz de correlación para *Quercus ilex*. Los coeficientes de correlación entre las variables climáticas y el NDVI se muestran en una escala de -1 a 1.

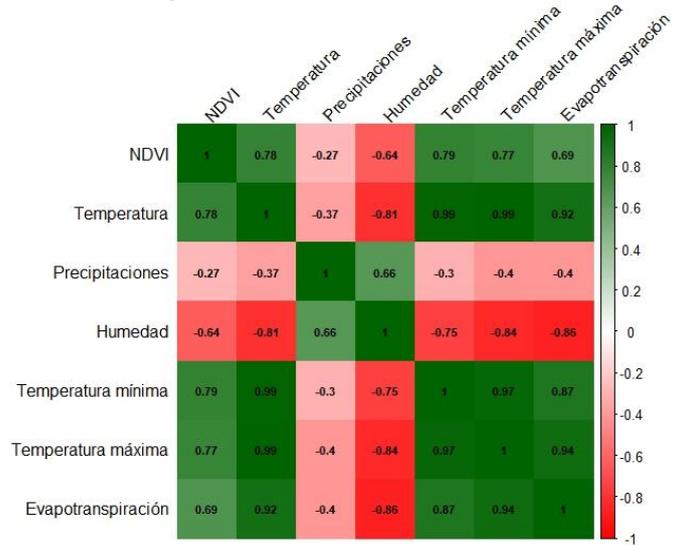


Figura 12. Matriz de correlación para *Quercus pyrenaica*. Los coeficientes de correlación entre las variables climáticas y el NDVI se muestran en una escala de -1 a 1.

Por otro lado, se obtuvieron también las correlaciones entre NDVI y los valores de SPEI en las diferentes escalas temporales. *Pinus sylvestris* mostró una correlación negativa con el SPEI a corto plazo (1 mes, -0.16), pero una correlación positiva a largo plazo (24 meses, 0.20). *Quercus ilex* mostró una correlación positiva con el SPEI a 9 (0.29), así como correlaciones positivas pequeñas en otras escalas temporales, destacando 6 meses (0.23) y 12 meses (0.26). *Quercus pyrenaica* mostró correlaciones positivas a escalas de 6, 9 y 12 meses (0.20, 0.13 y 0.11, respectivamente), aunque en menor magnitud que las otras especies. Todos los resultados pueden verse resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Spearman y Kendall entre los valores de SPEI y NDVI de las 3 especies de estudio (*Pinus sylvestris*, *Quercus ilex*, y *Quercus pyrenaica*) en las diferentes escalas temporales.

Escala temporal SPEI	Método	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>
1 mes	Spearman	-0.158	0.086	-0.040
	Kendall	-0.107	0.059	-0.028
3 meses	Spearman	0.011	0.186	0.109
	Kendall	0.014	0.121	0.073
6 meses	Spearman	0.142	0.233	0.196
	Kendall	0.094	0.144	0.134
9 meses	Spearman	0.127	0.288	0.126
	Kendall	0.086	0.189	0.086
12 meses	Spearman	0.134	0.259	0.112
	Kendall	0.090	0.175	0.082
18 meses	Spearman	0.146	0.141	0.040
	Kendall	0.090	0.092	0.025
24 meses	Spearman	0.203	0.110	0.042
	Kendall	0.137	0.083	0.029

#### 4.4. Análisis de Correlación Estacional

Los resultados del análisis estacional indican variaciones significativas en las correlaciones entre NDVI y las variables climáticas, así como con el SPEI.

En primavera, el NDVI de *Pinus sylvestris* (Figura 13) mostró una correlación positiva moderada con la temperatura (0.35) y una correlación negativa con la precipitación (-0.25). En verano, la correlación con la temperatura se incrementó (0.45), mientras que la correlación negativa con la precipitación se mantuvo (-0.20). En otoño e invierno, las correlaciones fueron más bajas, pero se mantuvo una tendencia similar (otoño: 0.30 con temperatura, -0.15 con precipitación; invierno: 0.25 con temperatura, -0.10 con precipitación). La correlación con el SPEI fue pequeña en primavera y verano (0.20 y 0.15 respectivamente).

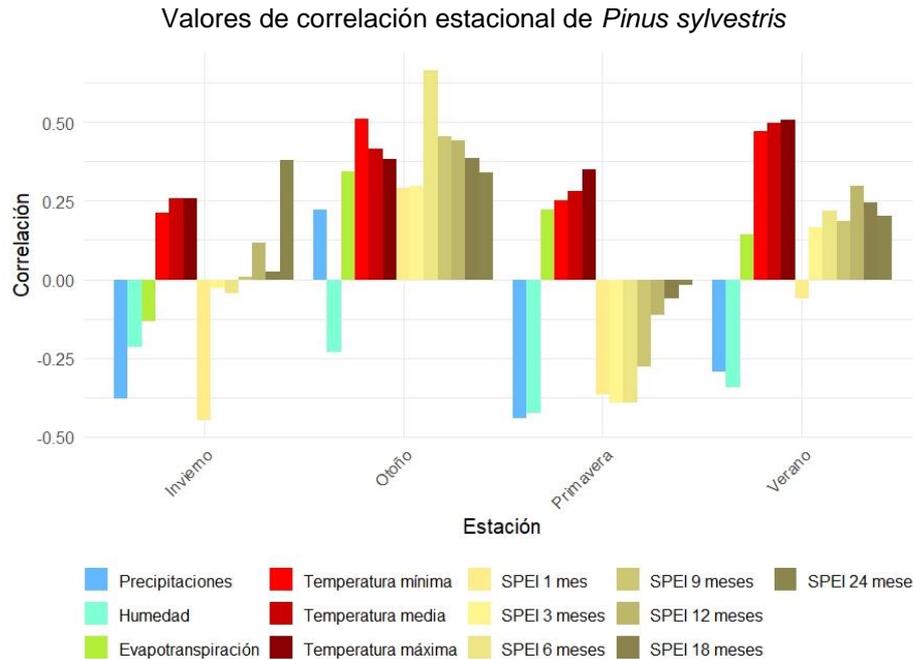


Figura 13. Correlaciones estacionales entre NDVI y variables climáticas y SPEI para *Pinus sylvestris*. En esta figura de barras se muestran las correlaciones para cada estación (invierno, otoño, primavera y verano). Las variables climáticas incluidas son: precipitaciones (azul), humedad (verde claro), evapotranspiración (verde oscuro), temperatura mínima (rojo), temperatura media (naranja) y temperatura máxima (marrón). Además, se incluyen las correlaciones con SPEI a diferentes escalas temporales: 1 mes (gris claro), 3 meses (amarillo claro), 6 meses (amarillo oscuro), 9 meses (marrón claro), 12 meses (beige), 18 meses (marrón oscuro) y 24 meses (gris oscuro).

Para *Quercus ilex* (Figura 14) en primavera el NDVI mostró una correlación positiva significativa con la precipitación (0.45) y la humedad (0.40), mientras que la correlación con la temperatura fue negativa (-0.30). En verano, la correlación positiva con la precipitación se mantuvo alta (0.50), y la correlación con la temperatura se volvió ligeramente menos negativa (-0.25). En otoño, las correlaciones positivas con la humedad y las precipitaciones disminuyeron (0.35 con precipitación, 0.30 con humedad), mientras que, en invierno, la dependencia hídrica se hizo menos evidente (0.20 con precipitación, 0.15 con humedad). La correlación con el SPEI fue más alta en primavera (0.50) y verano (0.45).

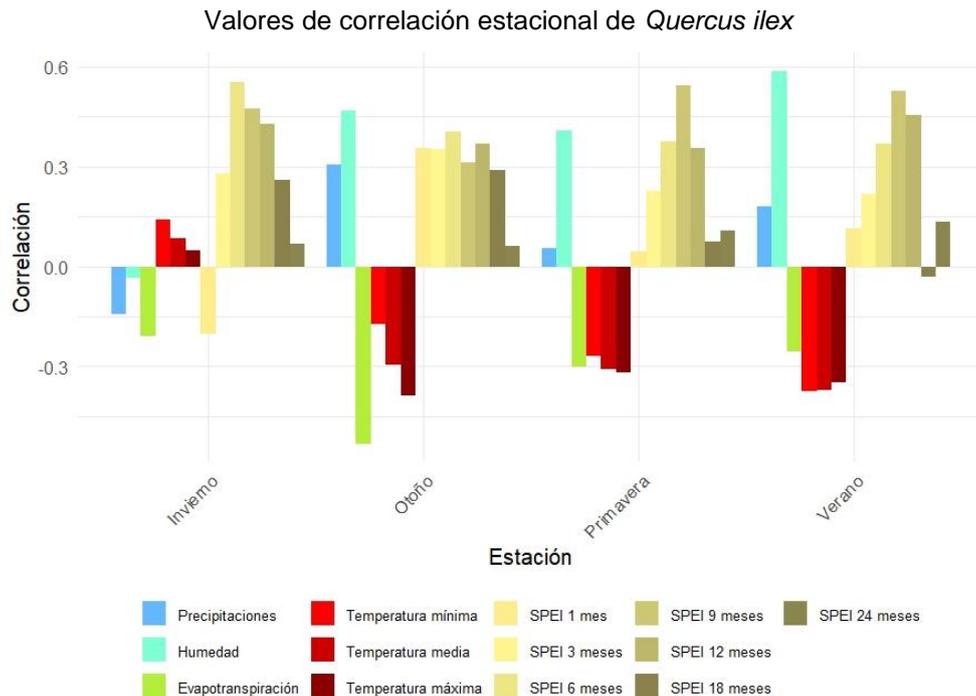


Figura 14. Correlaciones estacionales entre NDVI y variables climáticas y SPEI para *Quercus ilex*. En esta figura de barras se presentan las correlaciones para cada estación (invierno, otoño, primavera y verano). Las variables climáticas incluidas son: precipitaciones (azul), humedad (verde claro), evapotranspiración (verde oscuro), temperatura mínima (rojo), temperatura media (naranja) y temperatura máxima (marrón). Además, se incluyen las correlaciones con SPEI a diferentes escalas temporales: 1 mes (gris claro), 3 meses (amarillo claro), 6 meses (amarillo oscuro), 9 meses (marrón claro), 12 meses (beige), 18 meses (marrón oscuro) y 24 meses (gris oscuro).

Por su parte, *Quercus pyrenaica* (Figura 15) presentó una mayor variabilidad en sus correlaciones estacionales. En primavera, el NDVI mostró una correlación positiva con la temperatura (0.40) y una correlación negativa con la precipitación (-0.35). En verano, estas tendencias se mantuvieron, con una correlación positiva con la temperatura (0.45) y una negativa con la precipitación (-0.30). En otoño, las correlaciones fueron menos pronunciadas (0.25 con temperatura, -0.20 con precipitación), y en invierno, se observó una correlación positiva con la temperatura (0.30) y una negativa con la precipitación (-0.15). Las correlaciones con el SPEI para *Quercus pyrenaica* fueron positivas en primavera (0.35) y verano (0.30).

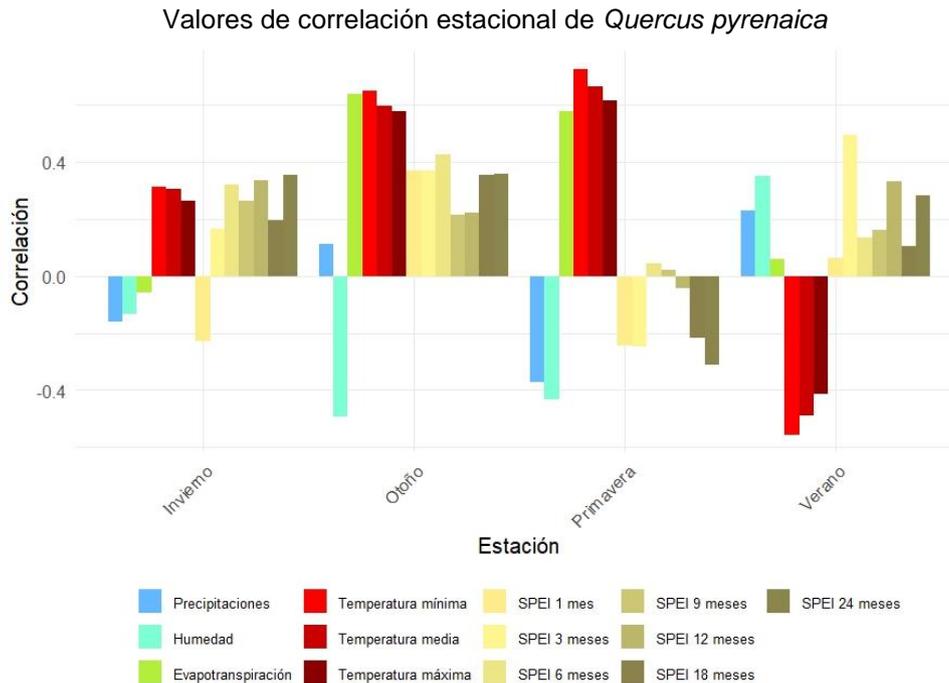


Figura 15. Correlaciones estacionales entre NDVI y variables climáticas y SPEI para *Quercus pyrenaica*. En esta figura de barras se presentan las correlaciones para cada estación (invierno, otoño, primavera y verano). Las variables climáticas incluidas son: precipitaciones (azul), humedad (verde claro), evapotranspiración (verde oscuro), temperatura mínima (rojo), temperatura media (naranja) y temperatura máxima (marrón). Además, se incluyen las correlaciones con SPEI a diferentes escalas temporales: 1 mes (gris claro), 3 meses (amarillo claro), 6 meses (amarillo oscuro), 9 meses (marrón claro), 12 meses (beige), 18 meses (marrón oscuro) y 24 meses (gris oscuro).

#### 4.5. Análisis de los Modelos Estadísticos

Con el fin de comprender en profundidad los efectos de cada variable sobre el NDVI se intentó desarrollar un modelo estadístico complejo. Para determinar cuál era el más apropiado se hicieron múltiples pruebas en RStudio, (Cayuela y de la Cruz, 2022 y Ahmad et al., 2023), que incluyeron Regresión Lineal Generalizada (GLM), Modelos Aditivos Generalizados (GAM), Bosques Aleatorios (Random Forest), Support Vector Machine (SVM) y Gradient Boosting Maching (GBM). En su mayoría desarrollados a partir de técnicas de *machine learning* o “entrenamiento de máquinas virtuales” que permiten realizar múltiples ajustes y validaciones hasta encontrar los parámetros que ofrecen un mejor ajuste. Sin embargo, como puede verse en los gráficos de residuos de los modelos (Figura 16), se detectaron una y otra vez patrones y acumulaciones que sugerían heterocedasticidad e interacciones entre variables no explicadas por los modelos, por lo que sus resultados tanto de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) como la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que generalmente permiten evaluar la precisión de los modelos en la predicción de los valores de NDVI, no eran en realidad confiables. Por lo que finalmente estos resultados quedaron descartados del estudio.

### Gráficos de residuos de los modelos estadísticos

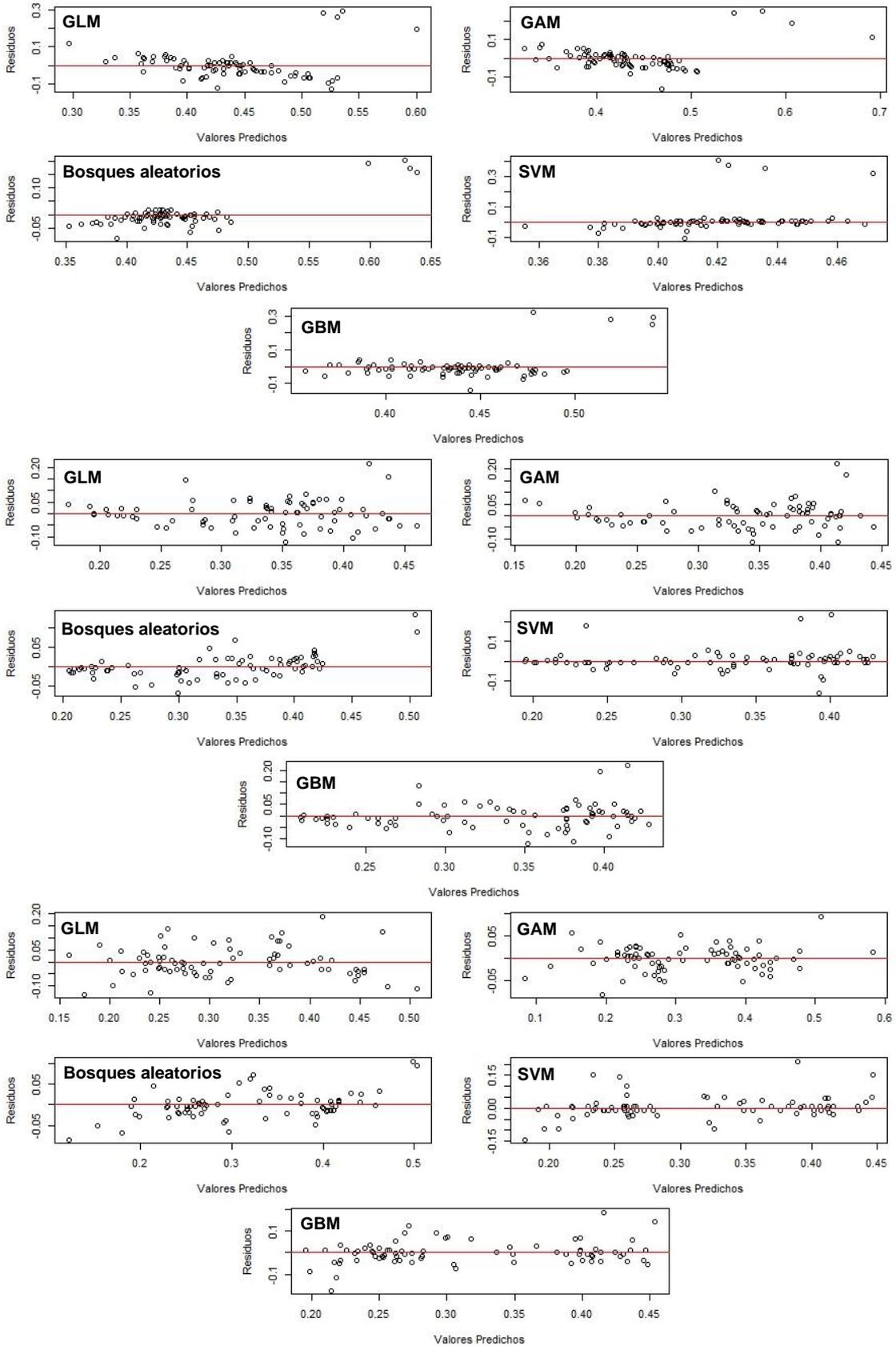


Figura 16. Gráficos de residuos de todos los modelos logísticos aplicados a los datos de NDVI de las distintas especies. La dispersión observada en los residuos indica que las relaciones entre las variables no son completamente capturadas por el modelo.

De todas formas, a continuación, se presentan también los resultados obtenidos de  $R^2$  y RMSE durante el proceso de prueba de modelos estadísticos, Tabla 3, así como, el criterio utilizado para determinar la calidad del ajuste, Tabla 4, según los criterios de Ahmad et al., 2023.

*Tabla 3. Resultados comparativos de los diferentes modelos aplicados para la predicción del NDVI en Pinus sylvestris, Quercus ilex y Quercus pyrenaica antes y después de los procesos de validación cruzada (VA). Se observa cómo la validación cruzada mejora la capacidad predictiva de los modelos utilizando los parámetros  $R^2$  y RMSE.*

Modelo		Pinus sylvestris			Quercus ilex			Quercus pyrenaica		
		P	V.A.	A.F.	P	V.A.	A.F.	P	V.A.	A.F.
GLM	$R^2$	0.276	0.350	0.350	0.468	0.599	0.599	0.602	0.633	0.633
	RMSE	0.559	0.075	0.075	0.531	0.058	0.058	0.603	0.063	0.062
GAM	$R^2$	0.507	0.567	0.586	0.561	0.641	0.642	0.865	0.929	0.930
	RMSE	0.889	0.061	0.061	0.555	0.055	0.055	0.801	0.027	0.027
Bosques Aleatorios	$R^2$	-0.688	0.745	0.925	0.848	0.891	0.916	0.651	0.910	0.922
	RMSE	0.533	0.047	0.047	0.344	0.030	0.030	0.616	0.031	0.032
SVM	$R^2$	0.065	0.112	0.183	0.870	0.607	0.640	0.622	0.618	0.693
	RMSE	0.397	0.088	0.088	0.318	0.057	0.056	0.641	0.064	0.060
GBM	$R^2$	-0.895	0.464	0.582	0.615	0.728	0.761	0.622	0.728	0.805
	RMSE	0.565	0.068	0.071	0.549	0.048	0.046	0.641	0.054	0.047

*Tabla 4. Escala de evaluación de la precisión de los modelos predictivos en función de los valores de  $R^2$  y RMSE. Se clasifica la calidad del ajuste en un rango desde "Excelente" hasta "Bajo", lo cual permite contextualizar los resultados obtenidos en la Tabla 6.*

$R^2$ (Coeficiente de Determinación)	RMSE (Root Mean Square Error)
Muy alta: > 0.90 (Excelente ajuste)	Muy alta: < 0.025 (Excelente ajuste)
Alta: 0.75 - 0.90 (Buen ajuste)	Alta: 0.050 - 0.025 (Buen ajuste)
Moderada: 0.50 - 0.75 (Aceptable)	Moderada: 0.075 - 0.050 (Aceptable)
Baja: < 0.50 (Mal ajuste)	Baja: > 0.075 (Mal ajuste)

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados indicaron que las tres especies arbóreas responden de manera diferente a las variaciones climáticas y todas presentan patrones de estacionalidad claros. Además, el hecho de que los datos fueran no paramétricos requirió de métodos estadísticos específicos y esto, junto a la inevitable estocasticidad del estudio al tratar variables ambientales impidió el desarrollo de un modelo estadístico complejo, como es lógico (Nova et al., 2023). No obstante, los análisis realizados proporcionan información suficiente para resolver los objetivos propuestos. A continuación, se discuten en profundidad según la especie.

### 5.1. *Pinus sylvestris*

En primer lugar, los resultados de *Pinus sylvestris* mostraron una notable estabilidad en el NDVI a lo largo del tiempo, con una media de alrededor de 0.4 y una baja desviación estándar, lo que sugiere una alta estabilidad vegetativa. A partir del análisis de estacionalidad puede verse que muestra un patrón claro, con picos en primavera y verano y valles en invierno, lo cual es consistente con su ciclo de crecimiento (González-Martínez & Bravo, 1999).

Las correlaciones con las variables climáticas indicaron una fuerte correlación positiva con las temperaturas medias, máximas y mínimas, así como con la evapotranspiración, lo que indicaría que esta especie prospera en condiciones de alta temperatura y baja humedad. Estos resultados no parecen demasiado discordantes con los obtenidos en algunos estudios previos que, aunque advierten de que los escenarios a futuro con el progresivo aumento de temperatura podrían ser completamente distintos, tampoco detectaron tendencias significativas de decaimiento del pino albar asociadas a condiciones de altas temperaturas (Ramírez-Valiente et al., 2021 y Hernández-Alonso et al., 2021). No obstante, no podemos ignorar la existencia de estudios que sí detectaron impactos negativos relacionados a un aumento de temperaturas, así como una fuerte dependencia hídrica (Díaz-Martínez et al., 2023), esto podría explicarse dado que en algunos de los mismos se matiza que las poblaciones a mayores altitudes y latitudes han mejorado claramente su resistencia y resiliencia (Enríquez de Salamanca, 2022 y Ogana et al., 2024) o por tratarse de un área con alta calidad edáfica (González-Zamora et al., 2023).

En contraste, las correlaciones negativas con la humedad y las precipitaciones sugieren que esta especie podría tener una baja tolerancia al encharcamiento y una preferencia por suelos bien drenados. De nuevo, esto concuerda con lo establecido en estudios

previos sobre la especie que detectaron mayor mortalidad en la especie frente a eventos extremos de precipitaciones (Hernández-Alonso et al., 2021), sobre todo en las fases tempranas de crecimiento (Ramírez-Valiente et al., 2021\*<sup>2</sup>). Por último, en tanto a su relación con el SPEI llama la atención la alternancia en las correlaciones, ya que, como se ha comentado, de manera general *Pinus sylvestris* se reconoce como especie vulnerable a la sequía (Martínez-Vilata et al., 2012). Esto puede deberse de nuevo a las condiciones geográficas y edáficas de la población de estudio o a que se trata de poblaciones en avanzado estado de desarrollo, lo cual condiciona favorablemente su resistencia a estos eventos (Ramírez-Valiente et al., 2021\*<sup>1</sup>).

Por todo ello parece clave para la conservación de *Pinus sylvestris* considerar los factores edafológicos, altitudinales y la fase de desarrollo de las poblaciones en futuros estudios.

## **5.2. *Quercus ilex subsp. ballota***

En cuanto a *Quercus ilex*, los valores de NDVI presentan una distribución más uniforme, pero con múltiples picos, indicando una distribución multimodal. Los resultados muestran picos de actividad fotosintética en invierno y otoño que decaen sustancialmente en primavera y verano, esto concuerda medianamente con su periodo de actividad anual (Villar-Salvador et al., 2023) que disminuye en los meses de verano con el aumento de temperaturas. Pero quizá tenga que ver también, con que se trata de un encinar, de modo que, en verano y primavera, cuando aumenta la actividad del pastoreo, los niveles de NDVI se ven afectados afectando. Además, mostró una tendencia ascendente en los valores de NDVI a partir de 2020, lo que podría indicar una mejora en las condiciones ambientales o una respuesta a cambios en la gestión del área de estudio.

Los valores de correlación negativos con las temperaturas y la evapotranspiración sugieren que es más vulnerable a las altas temperaturas y la pérdida de agua, lo que podría impactar negativamente en su salud vegetativa a largo plazo con el calentamiento global. Esto concuerda con los resultados obtenidos en estudios previos (Martín-Sánchez et al., 2022) y los datos de caracterización de la especie para su inclusión como Hábitat de Interés Comunitario (Rodà, Vayreda y Ninyerola, 2009).

Mientras que las correlaciones positivas con las precipitaciones y la humedad, así como el SPEI, destacan la importancia de la disponibilidad hídrica para el crecimiento de esta especie. Se muestra que la población responde positivamente al alivio del estrés hídrico durante y después de periodos de sequía. Estos resultados no concuerdan con la

mayoría de los estudios y la caracterización ecológica de la especie, que destacan su gran resistencia a sequías (Rodà, Vayreda y Ninyerola, 2009, Alonso-Forn et al., 2021) y su baja tolerancia al encharcamiento (Villar-Salvador et al., 2013). Esta discordancia pone de manifiesto que, si bien se trata de una especie con gran resiliencia a la aridez, también puede verse muy beneficiada por la humedad, de modo que sigue siendo una variable determinante para su rendimiento, aunque no limite su distribución (Navarro-Cerrillo et al., 2018 y Limousin et al., 2022).

En cualquier caso, la capacidad de *Quercus ilex* para adaptarse a condiciones de estrés hídrico la convierte en una especie clave para la resiliencia de los ecosistemas mediterráneos en el contexto actual de cambio global, pero las estrategias de gestión no deben pasar por alto las previsiones de aumentos de temperatura y sequías más prolongadas.

### **5.3. *Quercus pyrenaica***

Por último, en el caso de *Quercus pyrenaica*, los resultados indican una mayor variabilidad en los valores de NDVI, con una distribución simétrica y una desviación estándar alta. Esto podría estar vinculado a su mayor sensibilidad a las fluctuaciones ambientales, especialmente en condiciones de humedad (García y Jiménez, 2009). La alta desviación estándar y la tendencia variable del NDVI reflejan esta sensibilidad, lo cual sugiere que, bajo las condiciones del estudio, la población de *Quercus pyrenaica* sería la más vulnerable a condiciones ambientales cambiantes.

Las correlaciones con las variables climáticas mostraron una relación positiva con las temperaturas y el SPEI, salvo en los meses de verano, y una correlación negativa con la humedad y las precipitaciones, que también se invierte durante algunos periodos del año. Estos resultados en principio parecen indicar una mayor tolerancia a temperaturas elevadas y una baja resistencia a condiciones más húmedas. Estos resultados parecen concordar con la caracterización de la especie como Hábitat de Interés Comunitario (García y Jiménez, 2009), así como otros estudios (del Río et al., 2007, Tirado e Hidalgo, 2016, del Prado et al., 2022) que determinan que se trata de una especie que soporta bien la continentalidad, donde la distancia a grandes cuerpos de agua disminuye la humedad y, por consiguiente, el número de precipitaciones, resultando en mayor amplitud térmica, además de estar fuertemente condicionada a los índices ombrotérmicos del verano, que, a estas latitudes, determinan la existencia de un periodo de sequía estival.

En general, la variabilidad en la respuesta de *Quercus pyrenaica* ante las condiciones climáticas destaca la importancia de su monitoreo constante, especialmente frente a cambios abruptos en la precipitación y la temperatura. Su mayor vulnerabilidad a condiciones de excesiva humedad sugiere que el manejo forestal debe priorizar técnicas que eviten el encharcamiento y optimicen el uso del agua.

#### **5.4. Limitaciones encontradas**

Considerando todos los resultados, la mayor limitación es que, como ya se ha mencionado, en cualquier trabajo de conservación donde se considera un gran número de variables se incurre en un mayor intervalo de error debido a interacciones entre las mismas, limitaciones en las mediciones, necesidad de estimar datos y unidades para poder comparar variables entre sí, así como aspectos que puedan escapar al alcance de la investigación... En este caso, por ejemplo, la dependencia de las imágenes satelitales de Sentinel-2, que pueden verse afectadas por la nubosidad, restringiendo así la disponibilidad de datos completos en ciertos periodos o la imposibilidad de evaluar la variabilidad estocástica.

No obstante, la teledetección demostró ser una estrategia altamente eficaz para abordar la complejidad de los contextos ecológicos, proporcionando información valiosa que de otra manera sería mucho más laboriosa y costosa de obtener, tal y como ya habían encontrado diversos estudios previos (Gómez et al., 2019 y Adell et al., 2024). Es por ello por lo que este estudio recalca la importancia de seguir invirtiendo en este tipo de herramientas, mejorando la disponibilidad y calidad de los datos a futuro, permitiendo solventar estos problemas de manera más eficiente. La incorporación de datos de campo y la inclusión de productos de otros satélites, son opciones que podrían mitigar las limitaciones actuales, ambas presentando obviamente sus propias limitaciones y añadiendo, eso sí, mayor dificultad para la integración total de los datos (Jones y Vaughan, 2010).

## 6. CONCLUSIONES

Este estudio confirma que las tres especies arbóreas analizadas presentan respuestas diferenciadas a las variables climáticas y al Índice de Sequía Estandarizado (SPEI), con patrones estacionales claros.

Por un lado, *Pinus sylvestris* destaca por su estabilidad vegetativa y su capacidad para mantener altos valores de NDVI en condiciones de altas temperaturas y baja humedad.

Mientras que *Quercus ilex* muestra una fuerte dependencia de la disponibilidad de agua, con correlaciones positivas con el SPEI y las precipitaciones, así como mayor vulnerabilidad a altas temperaturas.

Por su parte, *Quercus pyrenaica* presenta una mayor variabilidad en su respuesta a las condiciones climáticas, tanto a nivel anual como estacional, indicando mayor sensibilidad a las variaciones ambientales. Y prefiriendo, al igual que el pino albar, las condiciones de temperaturas más elevadas y precipitaciones moderadas.

Estas conclusiones son determinantes para desarrollar estrategias de gestión forestal que consideren las respuestas específicas de cada especie a las variables ambientales, mejorando la resiliencia de los ecosistemas forestales frente al cambio climático, en línea con los ODS 13 (Acción por el Clima) y 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres). Además, la integración de la teledetección demuestra gran potencial para mejorar la eficiencia y precisión en el monitoreo ecológico permitiendo disponer remota y rápidamente de enormes bases de datos, monitorear la salud forestal en tiempo real y detectar estrés hídrico en etapas tempranas, optimizando recursos de conservación.

## 7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

De cara a futuros proyectos, los resultados estadísticos muestran una clara necesidad de considerar más variables en el estudio, como puedan ser factores edáficos, antrópicos o bióticos. Además, dadas las conclusiones, para la conservación sería conveniente incluir también más especies arbóreas que permitan generalizar los resultados y obtener una visión más completa de la dinámica vegetativa en la región al completo. Asimismo, otra clara línea de investigación podría ser centrarse en optimizar el uso de herramientas de teledetección, dado su alto potencial para contribuir a la conservación y gestión sostenible de los ecosistemas.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

**Abad, B. y Labarga, Juan M. (2009).** Caracterización ecológica de los pinares de pino silvestre en Castilla-La Mancha. In *5º Congreso Forestal Español: Montes y Sociedad: Saber que hacer* (pp.1-12). [Enlace](#)

**Adell Michavila, M., Sergio M., Raquel, ZangZang, y Lars. (2024).** Evaluación espacialmente continua de la dinámica de la fenología vegetal en España entre 1983 y 2020 a partir de imágenes de satélite. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. [Enlace](#)

**Ahmad, W. M. A. W., Ghazali, F. M. M., y Yaqoob, M. A. (2023).** Basic Statistical Analysis Using RStudio Software. Penerbit USM. [Enlace](#)

**Alberdi, I., Sandoval, V., Condes, S., Cañellas, I., y Vallejo, R. (2016).** El Inventario Forestal Nacional español, una herramienta para el conocimiento, la gestión y la conservación de los ecosistemas forestales arbolados. *Ecosistemas*, 25(3), 88-97. [Enlace](#)

**Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (1998).** Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109. [Enlace](#)

**Almeida-Nauñay, A. F., Villeta, M., Quemada, M., y Tarquis, A. M. (2022).** Assessment of drought indexes on different time scales: A case in semiarid mediterranean grasslands. *Remote Sensing*, 14(3), 565. [Enlace](#)

**Alonso-Forn, D., Peguero-Pina, J. J., Ferrio, J. P., Mencuccini, M., Mendoza-Herrer, Ó., Sancho-Knapik, D., y Gil-Peigrín, E. (2021).** Contrasting functional strategies following severe drought in two Mediterranean oaks with different leaf habit: *Quercus faginea* and *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*. *Tree Physiology*, 41(3), 371-387. [Enlace](#)

**Cayuela, Luis y de la Cruz, Marcelino. (2022).** Análisis de datos ecológicos en R. [Enlace](#)

**Cohen, J. (1988).** Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences (2da Ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. [Enlace](#)

**de Prado, D. R., Riofrío, J., Aldea, J., Bravo, F., y de Aza, C. H. (2022).** Competition and climate influence in the basal area increment models for Mediterranean mixed forests. *Forest Ecology and Management*, 506, 119955. [Enlace](#)

**del Río, S., Herrero, L., y Penas, A. (2007).** Bioclimatic analysis of the *Quercus pyrenaica* forests in Spain. *Phytocoenologia*, 37(3-4), 541-560. [Enlace](#)

**Díaz-Martínez, P., Ruiz-Benito, P., Madrigal-González, J., Gazol, A., y Andivia, E. (2023).** Positive effects of warming do not compensate growth reduction due to increased aridity in Mediterranean mixed forests. *Ecosphere*, 14(1), e4380. [Enlace](#)

**Enríquez de Salamanca, Á. (2022).** Effects of climate change on forest regeneration in Central Spain. *Atmosphere*, 13(7), 1143. [Enlace](#)

**García, I., y Jiménez, P. (2009).** 9230 Robledales de *Quercus pyrenaica* y robledales de *Quercus robur* y *Quercus pyrenaica* del Noroeste ibérico. En: VV.aa., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 66 p. [Enlace](#)

**Gómez, C., Alejandro, P., Hermosilla, T., Montes, F., Pascual, C., Ruiz Fernández, L. Á., ... y Valbuena, R. (2019).** Remote sensing for the Spanish forests in the 21st century: A review of advances, needs, and opportunities. *Forest systems*, 28(1), 1-33. [Enlace](#)

**González-Martínez, S. C., y Bravo, F. (1999).** Regeneración natural, establecimiento y primer desarrollo del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). Palencia: Universidad de Valladolid, Departamento de Producción Vegetal y Silvopasticultura. [Enlace](#)

**González-Zamora, Á., Almendra-Martín, L., de Luis, M., Gaona, J., y Martínez-Fernández, J. (2023).** How Are Pine Species Responding to Soil Drought and Climate Change in the Iberian Peninsula? *Forests*, 14(8), 1530. [Enlace](#)

**Hernández-Alonso, H., Madrigal-González, J., y 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. [Enlace](#)

**IPCC, 2023.** Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [Enlace](#)

**Khoury, S., y Coomes, D. A. (2020).** Resilience of Spanish forests to recent droughts and climate change. *Global Change Biology*, 26(12), 7079-7098. [Enlace](#)

**Lacruz, J. L., Monreal, N. L. R., Vadillo, J. A., y Flaño, P. R. (2023).** Caracterización hidroclimática y cambios ambientales en cuencas de media montaña del ecotono atlántico-mediterráneo (Sistema Ibérico Occidental). In *Geografía: cambios, retos y adaptación: libro de actas. XVIII Congreso de la Asociación Española de Geografía, Logroño, 12 al 14 de septiembre de 2023* (pp. 319-328). Asociación Española de Geografía. [Enlace](#)

**Limousin, J. M., Roussel, A., Rodríguez-Calcerrada, J., Torres-Ruiz, J. M., Moreno, M., Garcia de Jalon, L., ... y Martin-StPaul, N. (2022).** Drought acclimation of *Quercus ilex* leaves improves tolerance to moderate drought but not resistance to severe water stress. *Plant, Cell & Environment*, 45(7), 1967-1984. [Enlace](#)

**Martinez-Vilalta, J., Auadé, D., Banque, M., Barba, J., Yuste, J. C., Galiano, L., ... y Vilà-Cabrera, A. (2012).** Las poblaciones ibéricas de pino albar ante el cambio climático: con la muerte en los talones. *Ecosistemas*, 21(3), 15-21. [Enlace](#)

**Martín-Sánchez, R., Peguero-Pina, J. J., Alonso-Forn, D., Ferrio, J. P., Sancho-Knapik, D., y Gil-Pelegrín, E. (2022).** Summer and winter can equally stress holm oak (*Quercus ilex* L.) in Mediterranean areas: a physiological view. *Flora*, 290, 152058. [Enlace](#)

**Navarro-Cerrillo, R. M., Gómez, F. J. R., Cabrera-Puerto, R. J., Sánchez-Cuesta, R., Rodríguez, G. P., y Pérez, J. L. Q. (2018).** Growth and physiological sapling responses of eleven *Quercus ilex* ecotypes under identical environmental conditions. *Forest Ecology and Management*, 415, 58-69. [Enlace](#)

**Nova Martínez, M. A., Sorza Álvarez, E. G., y Zabala Arango, L. M. (2023).** Adecuación de modelos de regresión lineal simple en R-Studio. [Enlace](#)

**Ogana, F. N., Holmström, E., Aldea, J., & Liziniewicz, M. (2024).** Growth response of *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* [L.] H. Karst to climate conditions across a latitudinal gradient in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 353, 110062. [Enlace](#)

**Pettorelli, N. (2013).** *The normalized difference vegetation index*. Oxford University Press, USA. [Enlace](#)

**Piedallu, C., Cheret, V., Denux, J. P., Perez, V., Azcona, J. S., Seynave, I., y Gegout, J. C. (2019).** Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Science of the Total Environment*, 651, 2874-2885. [Enlace](#)

**\*1Ramírez-Valiente, J. A., Solé-Medina, A., Pyhäjärvi, T., Savolainen, O., Heer, K., Opgenoorth, L. y Robledo-Arnuncio, J. J. (2021).** Adaptive responses to temperature and precipitation variation at the early-life stages of *Pinus sylvestris*. *New Phytologist*, 232(4), 1632-1647. [Enlace](#)

**\*2Ramírez-Valiente, J. A., Solé-Medina, A., Pyhäjärvi, T., Savolainen, O., Cervantes, S., Kesälahti, R., y Robledo-Arnuncio, J. J. (2021).** Selection patterns on early-life phenotypic traits in *Pinus sylvestris* are associated with precipitation and temperature along a climatic gradient in Europe. *New Phytologist*, 229(5), 3009-3025. [Enlace](#)

**Rodà, F., Olano, J. M., Cabello, J., Fernández-Palacios, J. M., Gallardo, A., Escudero, A., y Valladares, F. (2009).** Grupo 9. Bosques. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. [Enlace](#)

**Rodà, F., Vayreda, J., y Ninyerola, M. (2009).** 9340 Encinares de *Quercus ilex* y *Quercus rotundifolia*. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. [Enlace](#)

**Rodríguez, A. M. C., Monzón, D. L. C., y Luyo, S. L. L. (2024).** Aplicación de las escalas de medición ordinal para interpretar coeficientes de la correlación en investigación científica. *Revista Científica Searching de Ciencias Humanas y Sociales*, 5(1), 48-60. [Enlace](#)

**Senatore, A., Parrello, C., Almorox, J., y Mendicino, G. (2020).** Exploring the potential of temperature-based methods for regionalization of daily reference evapotranspiration in two Spanish regions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(3), 05020001. [Enlace](#)

**Tirado, J. e Hidalgo, P. (2016).** Predictive modelling of climax oak trees in southern Spain: insights in a scenario of global change. *Plant Ecology*. 217. 10.1007/s11258-016-0589-6. [Enlace](#)

**Varghese, D., Radulović, M., Stojković, S., y Crnojević, V. (2021).** Reviewing the potential of Sentinel-2 in assessing the drought. *Remote sensing*, 13(17), 3355. [Enlace](#)

**Vicente-Serrano, S. M., Azorin-Molina, C., Peña-Gallardo, M., Tomas-Burguera, M., Domínguez-Castro, F., Martín-Hernández, N., ... y García, M. (2019).** A high-resolution spatial assessment of the impacts of drought variability on vegetation activity in Spain from 1981 to 2015. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(6), 1189-1213. [Enlace](#)

**Villar-Salvador, P., Nicolás, J. L., Heredia, N., y Uscola, M. (2013).** *Quercus ilex* L. Producción y manejo de semillas y plantas forestales, 2, 226-250. [Enlace](#)

**West, E., Morley, P. J., Jump, A. S., y Donoghue, D. N. (2022).** Satellite data track spatial and temporal declines in European beech forest canopy characteristics associated with intense drought events in the Rhön Biosphere Reserve, central Germany. *Plant Biology*, 24(7), 1120-1131. [Enlace](#)