



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Dinámica de la fenología vegetal en España a partir
de imágenes de satélite entre 1983 y 2020

*Dynamics of plant phenology in Spain from satellite
images between 1983 and 2020*

Autora

Maria Adell Michavila

Directores

Raquel Montorio Llovería

Sergio M. Vicente-Serrano

Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica para la
Ordenación del Territorio: Sistemas De Información Geográfica y
Teledetección

Facultad de Filosofía y Letras

Noviembre de 2022

Resumen

Desde hace décadas factores abióticos que determinan la fenología vegetal, como la temperatura y la disponibilidad de agua, se están viendo alterados como consecuencia del cambio global. Las observaciones a largo plazo en distintos ecosistemas muestran modificaciones de estas etapas del desarrollo vegetal debido a las variaciones en el clima, con efectos a distintas escalas espaciales que pueden derivar en la alteración y pérdida de importantes servicios ecosistémicos. Las fenofases de la vegetación y sus variaciones se convierten así en indicadores relevantes de las modificaciones en el sistema climático.

El objetivo principal de este estudio es caracterizar espacialmente la fenología vegetal y sus variaciones a lo largo del tiempo en la España peninsular e islas Baleares, para proporcionar una visión general completa de la dinámica de los ecosistemas. Se trata de un área de estudio compleja, al ser una de las más diversas del continente europeo en cuanto a vegetación y usos del suelo, lo que la hace un área significativa para monitorear la fenología. El análisis se realiza además con una serie temporal muy amplia, casi cuatro décadas (1983-2020), la más extensa de las aplicadas hasta el momento en España en estudios que han abordado esta misma temática. Para ello se ha generado una serie temporal de 40 años a partir de la fusión de valores del índice de vegetación NDVI de imágenes de satélite procedentes de los sensores NOAA-AVHRR y MODIS (una imagen quincenal con una resolución moderada de 1,1 km²). El cálculo de las variables fenológicas se ha realizado a través del software TIMESAT 3.3. que ha procesado la serie temporal del índice y ha extraído 13 fenométricas.

Los resultados principales muestran diferencias regionales entre la España templada y la mediterránea respecto a las fenofases de inicio y final de temporada. Las zonas templadas han visto retrasadas sus fechas de inicio y final de temporada a lo largo de la serie temporal, mientras que la región mediterránea ha adelantado las fechas de salida de las hojas y la senescencia. También se ha observado una tendencia al reverdecimiento de toda el área de estudio e importantes contrastes entre las cubiertas del suelo que abren la puerta a futuros estudios que profundicen en estas diferencias de comportamiento y en sus interacciones con los cambios en el clima y en la gestión del territorio.

Palabras clave: fenología vegetal, teledetección, cambio global, NOAA-AVHRR, MODIS, NDVI.

Abstract

During the last decades, abiotic factors that determine plant phenology, such as temperature and water availability, are being altered as a result of global change. Long-term observations in different ecosystems show modifications of these stages of plant development due to variations in climate, with effects at different spatial scales that can lead to alteration and loss of important ecosystem services. Vegetation phenophases and their variations thus become relevant indicators of changes in the climate system.

The main objective of this study is to spatially characterize plant phenology and its variations over time in peninsular Spain and the Balearic Islands, to provide a complete overview of the dynamics of ecosystems. It is a complex study region, being one of the most diverse of the European continent in terms of vegetation and land uses, which makes it a significant area to monitor phenology. In addition, the analysis is done with a very broad time series, spanning almost four decades (1983-2020), the most extensive of those applied so far in Spain in studies that have addressed the same issue. To this end, a 40-year time series was generated from the fusion of NDVI vegetation index values from satellite images from NOAA-AVHRR and MODIS sensors (a biweekly image with a moderate resolution of 1.1 km²). The phenological variables were calculated using TIMESAT 3.3 software, which processed the time series of the index and extracted 13 phenometrics.

The main results show regional differences between temperate and Mediterranean Spain with respect to the beginning and end of the season phenophases. The temperate zones have seen their start and end dates of the season delayed throughout the time series, while the Mediterranean region has advanced the leaf-out dates and leaf senescence. Furthermore, a trend towards greening of the entire study area was detected, along with important differences in phenophases between soil coverings. These open the door to future studies that delve deeper into these differences and their interactions with changes in climate and their consequences for land management.

Keywords: plant phenology, remote sensing, global change, NOAA-AVHRR, MODIS, NDVI.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
3. ZONA DE ESTUDIO	5
4. METODOLOGÍA	9
4.1. Reconstrucción de la serie temporal de NDVI	9
4.2. Cálculo de las variables fenológicas	13
4.3. Preparación de las fenométricas para el análisis	17
4.4. Análisis de la fenología de la vegetación	19
5. RESULTADOS	19
5.1. Inicio de la temporada	20
5.2. Final de la temporada	22
5.3. Duración de la temporada	25
5.4. Valor base de la temporada	27
5.5. Fecha media de la temporada	29
5.6. Valor máximo de la temporada	31
5.7. Amplitud de la temporada	34
5.8. Otras variables	36
5.9. Cambios significativos de las diferentes variables fenológicas	38
6. DISCUSIÓN	39
7. CONCLUSIONES	44
8. BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXO	59

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de regiones biogeográficas de España. Fuente: Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.	6
Figura 2. Mapa de cultivos y aprovechamientos 1980. Fuente: MAPA.	6
Figura 3. Evolución de la serie temporal de NDVI en un píxel concreto correspondiente a la serie procedente de los satélites NOAA-AVHRR (rojo) y MODIS (azul).	11
Figura 4. Series de anomalías estandarizadas correspondientes a las series de NDVI mostradas en la Figura 3.	12
Figura 5. Series de NDVI de MODIS (azul) y serie de NDVI procedente de los satélites NOAA-AVHRR (rojo) fusionada con la serie de MODIS.	12
Figura 6. a) distribución del índice D calculado para todas las quincenas, la primera de enero y la primera de julio, b) distribución de los valores del índice D en todas las semanas del año y también por usos del suelo.	13
Figura 7. Nueve de los parámetros estacionales generados por TIMESAT: (a) inicio de temporada, (b) fin de temporada, (c) duración de temporada, (d) valor base, (e) fecha de media temporada, (f) valor máximo, (g) amplitud, (h) valor integral pequeño, (h+i) valor i.....	14
Figura 8. Diagrama de la metodología del trabajo	15
Figura 9. Interfaz gráfica de TIMESAT 3.3 para una zona de pastizal.....	16
Figura 10. Resultados de estacionalidad de comienzo de temporada para 1982 (izquierda) y 2020 (derecha).....	17
Figura 11. Ejemplo de una matriz netCDF (Royé, 2015).	17
Figura 12. Evolución temporal del NDVI, curvas de ajuste y puntos de inicio y fin de la temporada para un cultivo de regadío.	18
Figura 13. Mapas de las estadísticas para el comienzo de la temporada.....	20
Figura 14. Estadísticas del comienzo de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	21
Figura 15. Cambios en el comienzo de temporada por uso de suelo	22
Figura 16. Mapas de las estadísticas para el final de la temporada.....	23
Figura 17. Estadísticas del final de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	24
Figura 18. Cambios en el fin de temporada por uso de suelo.....	24
Figura 19. Mapas de las estadísticas para la duración de la temporada vegetativa.....	25
Figura 20. Estadísticas de la duración de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	26

Figura 21. Cambios en la duración de temporada por uso de suelo.	27
Figura 22. Mapas de las estadísticas para el valor base de la temporada.	28
Figura 23. Estadísticas del valor base de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.	28
Figura 24. Cambios en el valor de base del NDVI de la temporada vegetativa por uso de suelo.	29
Figura 25. Mapas de las estadísticas para la fecha media de la temporada.	30
Figura 26. Estadísticas de la fecha media de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.	31
Figura 27. Cambios en fecha media de temporada por uso de suelo.	31
Figura 28. Mapas de las estadísticas para el valor máximo de la temporada.	32
Figura 29. Estadísticas del valor máximo de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.	33
Figura 30. Cambios en el valor máximo de temporada por uso de suelo.	33
Figura 31. Mapas de las estadísticas para la amplitud de la temporada.	34
Figura 32. Estadísticas de la amplitud de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.	35
Figura 33. Cambios en la amplitud por uso de suelo.	36
Figura 34. Porcentajes de cambios en la superficie total de España respecto a las 13 variables extraídas de TIMESAT.	39

Figuras del Anexo

Anexo Figura 1. Mapas de las estadísticas para la derivada derecha de la temporada.	59
Anexo Figura 2. Mapas de las estadísticas para la derivada izquierda de la temporada.	60
Anexo Figura 3. Estadísticas de la derivada derecha de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	60
Anexo Figura 4. Estadísticas de la derivada izquierda de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.	61
Anexo Figura 5. Cambios en la derivada derecha por uso de suelo.....	61
Anexo Figura 6. Cambios en la derivada izquierda por uso de suelo.	61
Anexo Figura 7. Mapas de las estadísticas para la integral grande de la temporada.....	62
Anexo Figura 8. Estadísticas de la integral grande de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	62
Anexo Figura 9. Cambios en la integral grande por uso de suelo.....	63
Anexo Figura 10. Mapas de las estadísticas para la integral pequeña de la temporada.	63
Anexo Figura 11. Estadísticas de la integral pequeña de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	64
Anexo Figura 12. Cambios en la integral pequeña por uso de suelo.	64
Anexo Figura 13. Mapas de las estadísticas para el valor inicial de la temporada.	65
Anexo Figura 14. Mapas de las estadísticas para el valor final de la temporada.	65
Anexo Figura 15. Estadísticas del valor de comienzo de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	66
Anexo Figura 16. Estadísticas del valor de final de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.....	66
Anexo Figura 17. Cambios en el valor de comienzo de temporada por uso de suelo.....	66
Anexo Figura 18. Cambios en el valor de final de temporada por uso de suelo.....	67

1.INTRODUCCIÓN

La dinámica de la vegetación es uno de los principales indicadores del cambio global, ya que sus variaciones resumen tanto modificaciones en el sistema climático como en la gestión de los usos y las cubiertas del suelo (Cleland et al., 2007; Menzel, 2002). En este sentido, se han utilizado diferentes métricas obtenidas mediante observaciones de campo (por ejemplo, el crecimiento radial en los árboles) (Prislan et al., 2019; Rossi et al., 2011; Rubio-Cuadrado et al., 2021) o teledetección (diferentes índices de actividad vegetal o verdor) (Motohka et al., 2010; Reed et al., 2009) para analizar los cambios en la vegetación experimentados como consecuencia del cambio climático (Badeck et al., 2004; White et al., 2009). Entre estas métricas, una de las más robustas se refiere a la fenología vegetal (Bertin, 2008; Cleland et al., 2007). Ésta hace referencia a los ciclos periódicos de crecimiento y desarrollo de la vegetación, habitualmente a escala anual (Lieth, 1974). Se trata de procesos biológicos recurrentes y que aglutinan diferentes causas bióticas y abióticas.

Las causas bióticas que determinan la fenología de la vegetación están fundamentalmente ligadas a la fisiología vegetal y habitualmente se denominan fenofases. Dichas fenofases están determinadas por factores como la especie vegetal y la etapa de desarrollo de la planta; además de factores ambientales como la temperatura, el fotoperiodo, la disponibilidad de agua y nutrientes, así como la interacción entre todos ellos. El conjunto de estos factores afecta notablemente al periodo en el que la vegetación está activa, que es fácilmente detectable ya que esta etapa suele coincidir con la presencia de hojas (Lim et al., 2007). Diferentes estudios han demostrado el impacto de la variabilidad y los cambios en el clima sobre la fenología vegetal (Menzel et al., 2006; Richardson et al., 2013). De hecho, la tendencia hacia el aumento de la temperatura se ha relacionado con cambios en estadios fenológicos clave, como el inicio de la temporada (desplegado de las hojas) y final de la temporada (cambio de coloración de las mismas), que dan lugar a un avance de la primavera, una extensión del periodo de actividad vegetal y el retraso del otoño fenológico (Gill et al., 2015; Jeong et al., 2011; Piao et al., 2019).

Además de los impactos que el clima produce sobre la fenología de la vegetación, pueden darse efectos de retroalimentación notables entre ambos, debido a que los cambios fenológicos puedan afectar al clima de forma regional y global. Dichos cambios pueden llegar a modificar el ciclo del agua (Kim et al., 2018), afectando a la humedad del suelo,

la precipitación y la escorrentía, e incluso afectar al ciclo energético, al producir un forzamiento sobre la temperatura (Peñuelas et al., 2009; Piao et al., 2019), debido a cambios en la conductividad y el albedo de la superficie vegetal; efecto realmente importante en zonas nivales por el gran contraste entre cubiertas (Lorantý et al., 2014). Por otro lado, el aumento de la evapotranspiración por parte de la vegetación activa aumenta los flujos de calor latente, produciendo un efecto de enfriamiento, sobre todo en primavera y comienzo de verano (Fischer et al., 2007). Asimismo, el aumento de la evapotranspiración puede llevar a aumentar la duración y a manifestar de forma prematura déficits de humedad del suelo, (Stéfanon et al., 2012).

Finalmente, la fenología vegetal presenta múltiples implicaciones ecológicas, ya que cambios en la misma pueden alterar las interacciones estacionales entre las distintas especies (Rathcke y Lacey, 1985; Yang y Rudolf, 2010), con notables consecuencias en la biodiversidad de los ecosistemas y su productividad (Kharouba et al., 2018). Por ejemplo, estos cambios pueden afectar a las relaciones planta-polinizador (Kudo e Ida, 2013), el aumento de la actividad vegetal y el incremento de la absorción de carbono (Piao et al., 2006; Piao et al., 2019), que a su vez tienen impactos sobre el conjunto del ecosistema.

Por todas estas razones, el estudio de la fenología ha ganado importancia, pasando de la mera anotación de diferentes momentos clave para la vegetación (e.g. inicio o el final de la temporada o la floración) a ser un ámbito integral de experimentación y generación de modelos de amplia trascendencia ecológica y climática (Piao et al., 2019; Richardson et al., 2013). En las últimas décadas ha habido un rápido incremento en el número de estudios centrados en la fenología vegetal (Piao et al., 2019), sobre todo con enfoques relacionados con los efectos del cambio climático sobre la vegetación (Menzel et al., 2006; Piao et al., 2019). Por ejemplo, gracias a las medidas tanto *in situ* (terrestres) como a las de satélites se ha podido observar que en Europa, el norte de América y el este de Asia hay una tendencia de cambio de los patrones fenológicos y que el inicio de la temporada se ha vuelto más precoz en las últimas décadas (Ge et al., 2015; Fu et al., 2014; Wolfe et al., 2005). En menor medida también se ha constatado que en Europa el final del periodo vegetativo parece retrasarse (Gill et al., 2015).

El estudio de la fenología vegetal se ha abordado tradicionalmente mediante observaciones de campo que, llevadas a cabo durante periodos de tiempo largos, permiten

determinar cambios que se puedan asociar a diferentes factores (por ejemplo, el cambio climático). Existen redes fenológicas a nivel nacional e internacional que han registrado diferentes parámetros de la fenología de la vegetación (Piao et al., 2019). Sin embargo, aunque hay registros temporales en ocasiones muy largos (e.g. varios siglos en el caso de la floración de los cerezos en Japón), la cobertura espacial de los registros suele ser limitada (Rodríguez-Galiano et al., 2015) y, sobre todo, centrada en zonas de bosques templados y subalpinos. Además, habitualmente los registros se obtienen por distintos observadores y con métodos diferentes, sin un protocolo uniforme, lo que hace difícil la integración y el intercambio de este tipo de información entre distintas regiones (Piao et al., 2019). En el caso de España, aunque existe una red de observación fenológica nacional, mantenida por la Agencia Española de Meteorología (AEMET) (MITECO, s.f.), los registros, exceptuando unas pocas localizaciones (García-Mozo et al., 2010; Oteros et al., 2015), son muy cortos y escasos. Por estas razones, en las últimas décadas se han desarrollado numerosas investigaciones que permiten analizar la fenología vegetal y sus cambios a partir de los datos aportados por los satélites de observación terrestre. Se trata de una forma ventajosa de estudiar estos ciclos de la vegetación terrestre por la existencia de información continua y sistemática a nivel global. A este sistema de estudio se le ha denominado “*Land Surface Phenology*” (LSP), que se define como el estudio de la dinámica de la fenología con series temporales de imágenes procedentes de sensores remotos (De Beurs y Henebry, 2005; Piao et al., 2006; Zhang et al., 2003).

Para este tipo de estudios se han empleado especialmente las imágenes procedentes de los sensores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo de los satélites de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), con información desde 1981 (Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano 2020; Piao et al., 2019), pero también a partir de imágenes de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) procedentes de los satélites Terra y Aqua (Novillo et al, 2019; Zhang et al., 2003), e incluso estudios de alta resolución a partir de los satélites de las series de imágenes Landsat y Sentinel (Fisher et al., 2006; Vrieling et al., 2018). Los parámetros fenológicos suelen extraerse mediante diferentes indicadores de actividad vegetal obtenidos a partir de la información radiométrica. Entre los indicadores más utilizados se encuentran el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) o LAI (*Leaf Area Index*), entre otros (Karkauskaite et al., 2017; Verger et al., 2016; Zhang et al., 2003). A partir de estos índices se pueden extraer variables

fenológicas que corresponden con el inicio de la temporada, el final o la duración de la misma siempre y cuando los registrados hayan sido tomados con una frecuencia temporal adecuada. A estas variables también se les llama fenométricas. Existen diferentes metodologías y algoritmos de análisis fenológico (Jönsson y Eklundh, 2002; Sakamoto et al., 2005; White et al., 2014), pero todos ellos obtienen las variables fenométricas a partir de series temporales de índices de vegetación mediante tres etapas: i) mejora de la calidad de los índices de entrada, ii) ajuste de funciones a los ciclos de vegetación, e iii) identificación de las fechas de inicio y fin de la temporada de crecimiento a partir de umbrales o puntos de inflexión (Liu et al, 2016), a partir de los que derivar otras variables fenológicas.

En España existen estudios que han analizado la dinámica de la fenología de la vegetación en las últimas décadas, fundamentalmente mediante largas series de observaciones en algunas localidades concretas (García-Mozo et al., 2010; Gordo y Sanz, 2009; Peñuelas et al., 2002), cuyos resultados sugieren algunos cambios fenológicos que resultan concordantes con el actual proceso de calentamiento observado en la región (Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano 2020; Gordo y Sanz, 2009). Sin embargo, aunque ha habido algunas aproximaciones para caracterizar la fenología de España a partir de imágenes de satélite (Amorós-López, et al., 2013; Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano 2020; Martínez y Gilabert, 2009; Novillo et al., 2019), los estudios han cubierto períodos de tiempo muy cortos que no permiten establecer conclusiones claras sobre los cambios fenológicos a nivel regional. Por esta razón, en este estudio se aborda por primera vez el estudio de la fenología vegetal de España en las últimas cuatro décadas mediante series de imágenes de satélite a una resolución espacial (1 km²) suficiente para determinar los posibles patrones de cambio basados en un buen número de parámetros de la fenología de la vegetación. Se trata de un estudio novedoso, al tratarse del primero que desarrolla esta temática en nuestro país desde una perspectiva amplia. Para ello ha sido necesario generar bases de datos y refinar metodologías para la estimación de la fenología vegetal. Este trabajo se ha desarrollado bajo el contexto de unas prácticas extracurriculares en el Instituto Pirenaico de Ecología (IPE) del CSIC.

2. OBJETIVOS

El objetivo ha sido caracterizar espacialmente la fenología de la vegetación en España a largo plazo, excluyendo las Islas Canarias, y determinar a partir de un conjunto de variables fenológicas, tanto sus condiciones medias y variaciones en el tiempo y en el espacio, como los cambios registrados desde el inicio de la década de 1980. De forma adicional, describir las características fenológicas medias, la variabilidad y los cambios en las principales cubiertas del suelo de España.

Para conseguir este objetivo, la metodología desarrollada supone generar una base de datos de NDVI desde 1981 que fusione imágenes procedentes de los sensores a bordo de los satélites NOAA y MODIS y realizar el análisis de fenología determinando la fiabilidad de las estimaciones fenológicas mediante el estudio de la variabilidad temporal de las mismas.

3. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio es la España peninsular incluyendo las islas Baleares. Desde un punto de vista ecológico, España se puede dividir en dos regiones macrobiogeográficas (Figura 1), la mediterránea y la eurosiberiana que se corresponden con las regiones macrobioclimáticas mediterránea y templada respectivamente. La primera está caracterizada por dos meses consecutivos de aridez (la temperatura media del mes es el doble de la precipitación mensual) y temperaturas medias de 16°C; mientras que la segunda no presenta este estiaje, pero sí un invierno frío y temperaturas medias de 8°C. La zona eurosiberiana abarca el territorio norte y noroeste, así como las áreas de montaña, que incluyen las provincias biogeográficas Pirenaica, Cantabro-Atlántica y Orocantrábrica. El resto corresponde a la región mediterránea. Las precipitaciones se acumulan en los sistemas montañosos de las grandes cuencas y el noroeste de España por los vientos dominantes del oeste que son muy húmedos (Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, 2019; Loidi, 2017a; Rivas-Martínez et al., 2017).

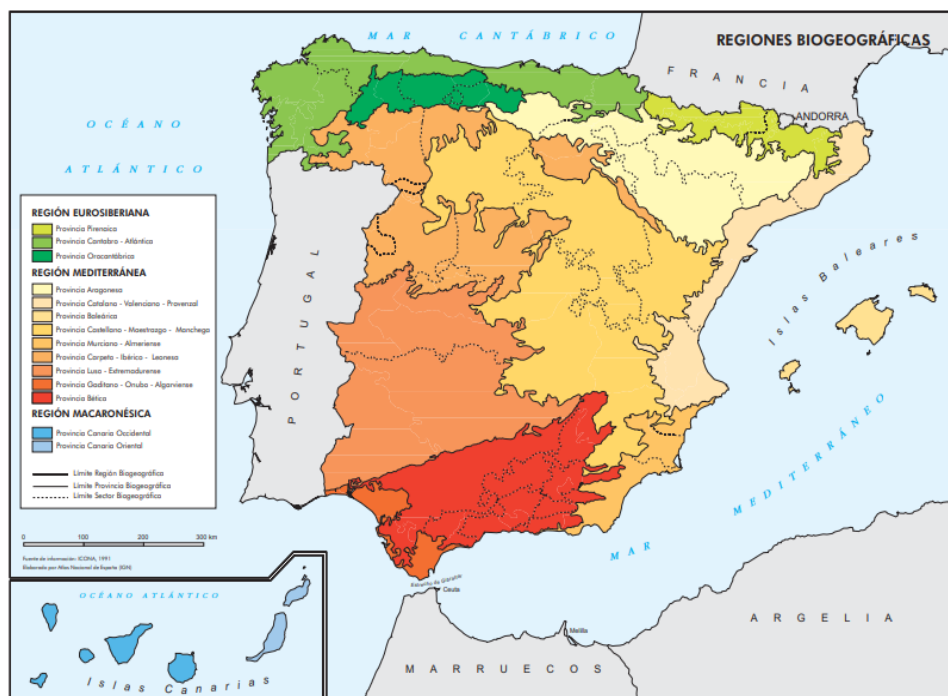


Figura 1. Mapa de regiones biogeográficas de España. Fuente: Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.

España es además uno de los territorios más diversos de Europa, no solo por su medio natural, sino también por el uso del territorio, que resulta muy variado (Figura 2).

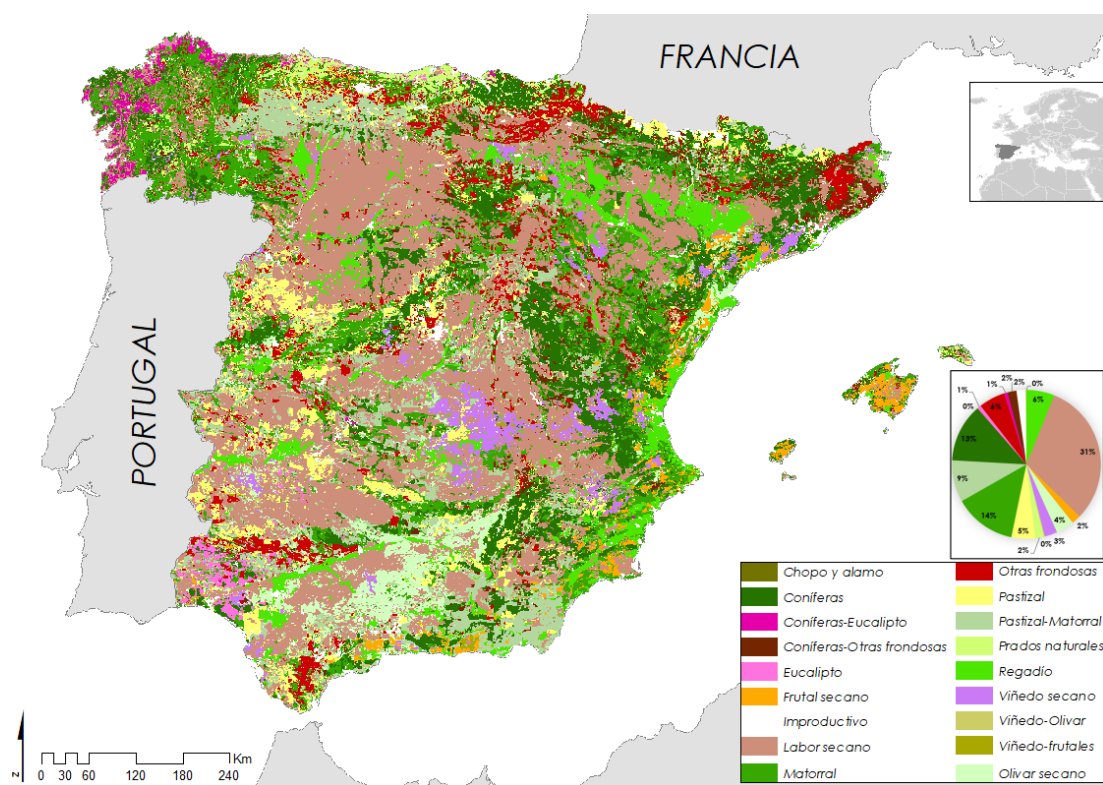


Figura 2. Mapa de cultivos y aprovechamientos 1980. Fuente: MAPA.

Respondiendo a criterios bioclimáticos, España se puede simplificar en 12 regiones:

- 1- El territorio Cantabro-Atlántico es el límite suroeste de la región eurosiberiana. Esta región debería estar dominada por los bosques caducifolios, pero la actividad humana ha reducido notablemente la superficie natural dando lugar a bosques mixtos y a la expansión de comunidades arbustivas y vegetales relacionadas con actividades agropecuarias, como los pastizales y prados. Además, a principios del siglo XX se introdujeron especies arbóreas más productivas para la silvicultura, como coníferas y eucaliptos (Amigo et al., 2017; Loidi, 2017a). Dentro de esta región aparecen zonas de alta montaña que conforman la región Orocantábrica, caracterizada por un mosaico de campos de cultivo, bosques caducifolios, pastizales y pastos (Amigo et al., 2017; Loidi, 2017a).
- 2- La región pirenaica se divide en tres regiones. La región norte y occidental de bosques mixtos de caducifolios que en altura se convierten en bosques de coníferas y pastizales. La zona sur, el pre-Pirineo, que es más compleja porque se juntan zonas de matorrales y robledales y en la que al aumentar la altitud el paisaje se transforma en bosques de coníferas. Por último, las zonas de alta montaña a partir de 1600 m s.n.m., que presentan un mosaico de bosques de coníferas, pastizales y prados según la altitud (Ninot et al., 2017).
- 3- La cuenca del Duero o la Meseta Norte de España está modelada por el río Duero y sus afluentes. Está dentro de dos regiones, la Carpeto-Ibérico-Leonesa y la Castellano-Maestrazgo-Manchega. Esta región presenta una vegetación muy variada, desde robledales en la Sierra de Guadarrama a bosques de frondosas en la Sierra de Gredos con dehesas. Como fruto de la acción humana, la cuenca está dominada por los cultivos de secano, y junto al cauce del río una concentración de cultivos de regadío (Penas et al., 2017).
- 4- El Sistema Central que divide las cuencas del Ebro y el Tago se encuentra en medio de la provincia Carpeto-Ibérico-Leonesa y la provincia Lusa-Extremadurensis. Presenta una vegetación formada por bosques de pinos y robles, que se han eliminado de algunas zonas para favorecer a la ganadería, excepto en las cumbres en los que se pueden encontrar pastizales (Sánchez-Mata et al., 2017).

- 5- El Sistema Ibérico se sitúa dentro de la región Castellano-Maestrazgo-Manchega. Su orografía y su geografía marcan una fuerte diversidad paisajística. La vegetación potencial de esta cordillera son bosques supramediterráneos, donde dominan las coníferas fruto de reforestaciones (Peinado et al., 2017).
- 6- La cuenca del Ebro se sitúa en la provincia Aragonesa. Igual que en el resto de cuencas hidrográficas, las zonas de ribera están colonizadas por el regadío, mientras que en el resto de zonas domina el secano. En esta zona aún se conservan pequeños parches de bosques de coníferas y frondosas a pesar de la deforestación (Loidi, 2017b).
- 7- La región Catalano-Valenciana-Provenzal está dominada por bosques mediterráneos de vegetación esclerófila y coníferas. Las riberas de los ríos están colonizadas por la agricultura de regadío, al igual que toda la costa valenciana y el Delta del Ebro por la existencia de humedales (Soriano y Costa, 2017).
- 8- Al sureste del país se haya la provincia Murciano-Almeriense, cuya vegetación potencial está compuesta por matorrales y pastos. Como en todo el levante, los fondos de valle y la zona costera está colonizada por cultivos de regadío, destacando las zonas de invernaderos de plástico (Alcaraz, 2017).
- 9- El archipiélago Balear presenta una vegetación natural de bosques perennes de coníferas y los arbustos esclerófilos, aunque de forma relictas, mientras que en la isla de Menorca sobresale la presencia de praderas anuales. Los paisajes actuales están caracterizados por un alto impacto humano, con presencia sobre todo de agricultura de secano (Llorens y Gil, 2017).
- 10- El centro-este del país es la provincia Castellano-Maestrazgo-Manchega. Los bosques de la región son esclerófilos, aunque presentan una fragmentación muy fuerte fruto de la actividad humana. Sin embargo, el uso del suelo que realmente domina la región es la agricultura, ocupando cerca del 80% de la meseta y siendo casi en su totalidad de secano. Se cultiva principalmente cereal, viña y oliva (Fernández-González et al., 2017).
- 11- En el lado oeste, la zona de Extremadura, integra las cuencas del Tajo y del Guadiana. La vegetación potencial son bosques de robles, pero el paisaje actual está constituido por mosaicos de campos agrícolas y pastos con parches forestales y bosques degradados a matorral (Espírito-Santo et al., 2017).

12- El sur de España, la provincia biogeográfica Bética, es el territorio más diverso en cuanto a vegetación de la península. En la zona de Sierra Nevada se encuentran reforestaciones de coníferas con zonas de pastizales. En la depresión del Guadalquivir la vegetación natural se ha visto sustituida por cultivos como el olivar y otros de secano como cereales y viñas, debido a las bajas elevaciones y la calidad de suelos (Molero y Marfil, 2017).

La vegetación en la región mediterránea está compuesta por muchos tipos funcionales de plantas cuyas respuestas fenológicas varían según las señales ambientales, siendo la temperatura el factor clave para la mayoría de las especies (Peñuelas et al., 2002). La sequía estival de la Península controla la actividad vegetal, dándose la fase de crecimiento durante la parte más fría del año, que también es la más húmeda (Matesanz et al., 2009; Prieto et al., 2008). La sensibilidad de esta región se debe a que es una zona de transición entre dos grandes climas, el árido del norte de África y el templado de Europa central, donde el mar Mediterráneo es un regulador climático fundamental. Sin embargo, éste ha visto aumentada su temperatura de forma constante en los últimos 40 años, lo que supone consecuencias directas sobre la temperatura y las precipitaciones sobre el territorio (Aznar et al., 2012; Giorgi y Lionello 2008; Pastor et al., 2020). Las distintas proyecciones climáticas apuntan a un aumento de la aridez, tanto por la reducción de las precipitaciones a lo largo del año como por el aumento de la duración de la sequía estival; y a un incremento de las temperaturas, que aumentarán tanto la evaporación del contenido del agua del suelo como la evapotranspiración. La conjunción de estos factores, unida a una sequía prematura y larga, podría provocar que se inicie más temprano la fase de crecimiento vegetal, modificando la estación vegetal activa (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

4. METODOLOGÍA

4.1. Reconstrucción de la serie temporal de NDVI

La información de partida han sido dos bases de datos del índice de vegetación normalizado (NDVI). La primera de ellas procede de una base de datos generada a partir de la disponibilidad de imágenes de los satélites NOAA-AVHRR desde el año 1981 hasta 2015, desarrollada en el Instituto Pirenaico de Ecología mediante la georreferenciación, calibración y corrección radiométrica de más de 10.000 imágenes de satélite. Dicha base

de datos presenta una resolución espacial de 1.1 km² y una frecuencia temporal semi-mensual, con dos imágenes cada mes, realizadas a partir de los compuestos de las imágenes diarias disponibles. La base de datos no muestra lagunas de información. La información completa de esta base de datos puede consultarse en Vicente-Serrano et al. (2020). La segunda base de datos procede de los satélites MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para el periodo 2001-2021. Los datos de NDVI se encuentran a una resolución espacial de 1 km y a una frecuencia temporal de 16 días. La información completa de la base de datos puede encontrarse en <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/>. Para analizar la fenología a largo plazo (entre 1981 y 2021) resultó necesario combinar ambas fuentes de información. Para ello, se procedió en primer lugar a transformar la resolución espacial de las imágenes MODIS (1 km) a los 1.1 km de las imágenes NOAA-AVHRR, considerando el mismo envolvente y extensión espacial mediante una convolución bilineal. Posteriormente, y dado que la base de datos procedente de las imágenes NOAA-AVHRR presenta una frecuencia semi-mensual fija (una imagen correspondiente a los días 1-15 y otra desde el 16 a final de mes), fue necesario transformar la frecuencia temporal de las imágenes MODIS, que es cambiante en su localización temporal cada 16 días, a la frecuencia fija de las imágenes NOAA-AVHRR mediante la interpolación lineal de los valores de las imágenes de forma diaria y el promedio del NDVI diario dentro de los mismos intervalos temporales que la base de datos procedente de las imágenes NOAA-AVHRR.

Los valores de ambas bases de datos difieren notablemente tanto en la magnitud total del NDVI como en su rango de variación anual (Figura 3). Por esta razón resultó necesario llevar a cabo una fusión de los datos para adaptar los datos de NDVI procedentes de las imágenes NOAA-AVHRR a los de las imágenes MODIS. Se planteó este criterio para que en futuras actualizaciones de datos se pudiera continuar directamente con las imágenes MODIS solamente llevando a cabo un cambio de resolución espacial y una interpolación temporal de los valores para adaptarlos a periodos semi-mensuales concretos.

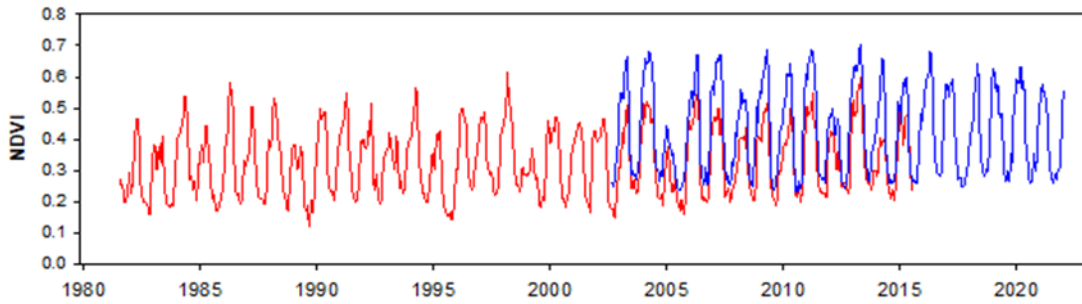


Figura 3. Evolución de la serie temporal de NDVI en un píxel concreto correspondiente a la serie procedente de los satélites NOAA-AVHRR (rojo) y MODIS (azul).

Para llevar a cabo la fusión de ambas bases de datos se utilizó un procedimiento estadístico simple, a partir de la transformación de las series de NDVI a valores estandarizados, utilizando el periodo común 2001-2021 de ambas bases de datos para estandarizar el conjunto de las bases de datos. Para ello se testaron diferentes distribuciones de probabilidad (exponencial, Gamma, log-normal, Weibull, Pearson-III, normal, general de Pareto, general normal, general de valores extremo y general logística) para el ajuste de cada una de las series semi-mensuales de cada uno de los píxeles de la base de datos. Las ecuaciones de dichas distribuciones pueden consultarse en Vicente-Serrano et al. (2012). La selección de la distribución más adecuada correspondiente a cada píxel y serie semi-mensual se realizó mediante el valor más alto del test de Shapiro-Wilks con la finalidad de obtener valores estandarizados, que siguen perfectamente una distribución normal estándar de acuerdo a Stagge et al. (2015). Este procedimiento permitió la transformación de los valores de NDVI a series de anomalías estandarizadas referenciadas al periodo común y perfectamente comparables entre sí. La Figura 4 ilustra la transformación de las series de NDVI mostrada en la Figura 3 a series de anomalías estandarizadas, comprobándose una muy elevada relación entre ambas bases de datos durante el periodo común.

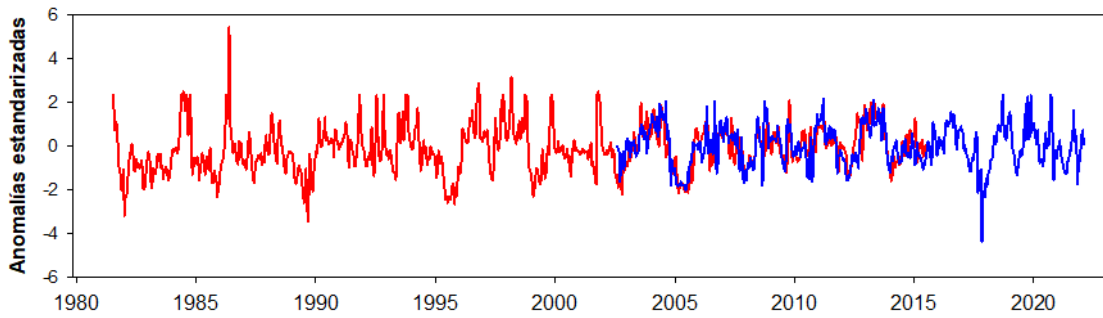


Figura 4. Series de anomalías estandarizadas correspondientes a las series de NDVI mostradas en la Figura 3.

Finalmente, las series de anomalías procedentes de las imágenes NOAA-AVHRR se transformaron a valores de NDVI a partir de los parámetros obtenidos de las series MODIS del periodo común. Este procedimiento permitió obtener series de AVHRR perfectamente comparables en cuanto a la magnitud y al rango de variabilidad de las series de NDVI de MODIS, con un elevado grado de ajuste durante el periodo común (Figura 5). En el periodo común se preservaron las series de imágenes MODIS desde el año 2001, por lo que las imágenes NOAA-AVHRR contenidas en la base de datos final corresponden al periodo 1981-2001.

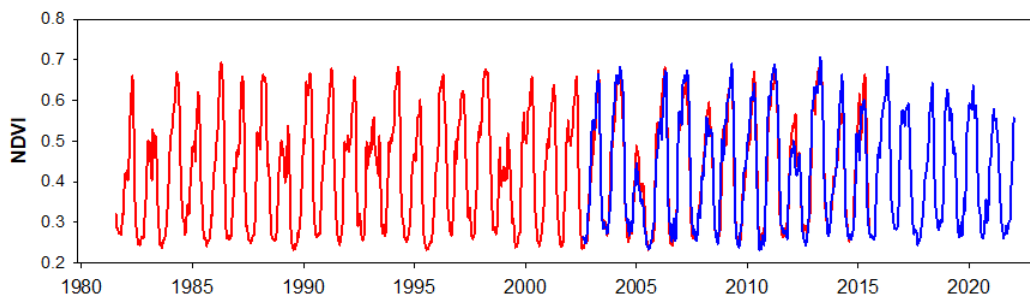
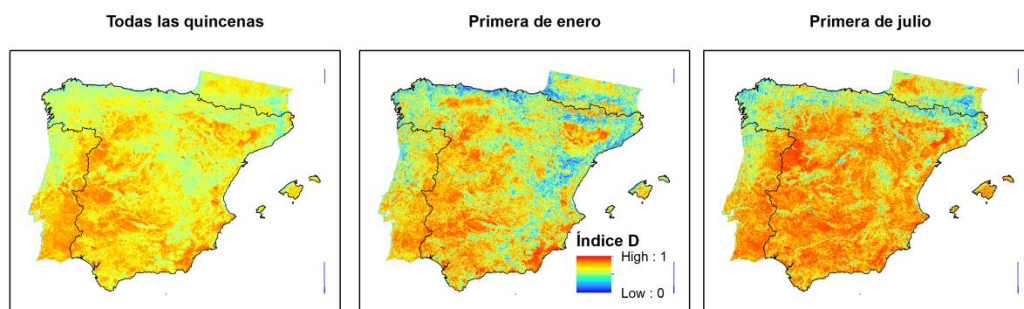


Figura 5. Series de NDVI de MODIS (azul) y serie de NDVI procedente de los satélites NOAA-AVHRR (rojo) fusionada con la serie de MODIS.

La Figura 6 muestra el análisis de la bondad de la reconstrucción de forma espacial y resumida por diferentes periodos del año y usos del suelo. Para ello se ha utilizado el índice D (Willmott, 1981) que mide el ajuste entre conjuntos de datos sin verse afectado por posibles valores extremos. Cuanto más cercano es el valor a uno, mejor ajuste encontramos entre los conjuntos de datos. Los mapas del índice en las diferentes semanas muestran un dominio de valores por encima de 0.6 en toda España, lo que significa que las reconstrucciones son en general aceptables, y bastante buenas en amplias regiones que muestran valores cercanos a uno. De hecho, la reconstrucción presenta menor

incertidumbre a la escala de semanas específicas, y particularmente durante el verano, en el que los valores reconstruidos de NDVI a partir de las imágenes AVHRR muestran un elevado grado de ajuste con los datos de NDVI procedentes de MODIS. Las diferencias entre diferentes periodos semi-mensuales resultan escasas, aunque la reconstrucción es mejor en verano, y tampoco se aprecia un sesgo relevante en la bondad de las reconstrucciones entre los diferentes usos del suelo. En general, aunque existen algunas incertidumbres en la reconstrucción a nivel local, se puede considerar que el procedimiento utilizado aporta resultados muy aceptables y que permiten la utilización de las series para la estimación de parámetros fenológicos a lo largo de las últimas cuatro décadas.

a)



b)

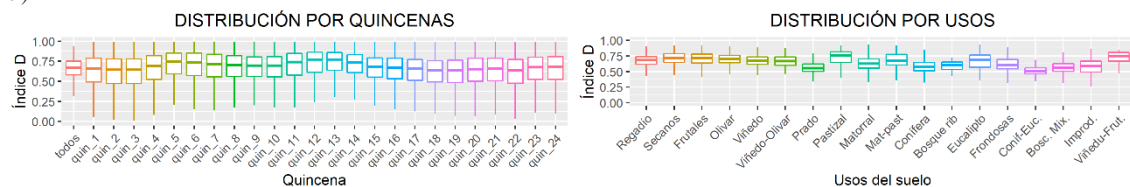


Figura 6. a) distribución del índice D calculado para todas las quincenas, la primera de enero y la primera de julio, b) distribución de los valores del índice D en todas las semanas del año y también por usos del suelo.

4.2. Cálculo de las variables fenológicas

Para el análisis de la fenología de la vegetación se ha utilizado el software TIMESAT (<https://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>) desarrollado y mantenido por la Universidad de Lund en Suecia. TIMESAT está diseñado para analizar series temporales de índices de vegetación y extrae una serie de 13 parámetros de fenología vegetal, a partir de un ajuste de funciones a las series de NDVI (Eklundh y Jönsson, 2017; Jönsson y Eklundh, 2002):

- a) comienzo de la temporada,
- b) fin de la temporada,
- c) duración de la temporada,
- d) valor base (promedio de los valores de inicio y fin de temporada),
- e) fecha de media temporada (valor medio respectivamente, en el que ha aumentado un 80% el valor de inicio y el valor de fin ha disminuido hasta el 80%),
- f) valor máximo de los datos ajustados,
- g) amplitud (diferencia entre el valor máximo y el base),
- h) derivada izquierda (tasa de aumento del comienzo de la temporada),
- i) derivada derecha (tasa de disminución del final de la temporada),
- j) integral grande (en toda la temporada),
- k) integral pequeña (respecto al valor base),
- l) valor del comienzo de la temporada y
- m) valor del final de la temporada.

La Figura 7 ilustra la mayor parte de los parámetros que pueden extraer a partir del ajuste de una función a la serie temporal de NDVI.

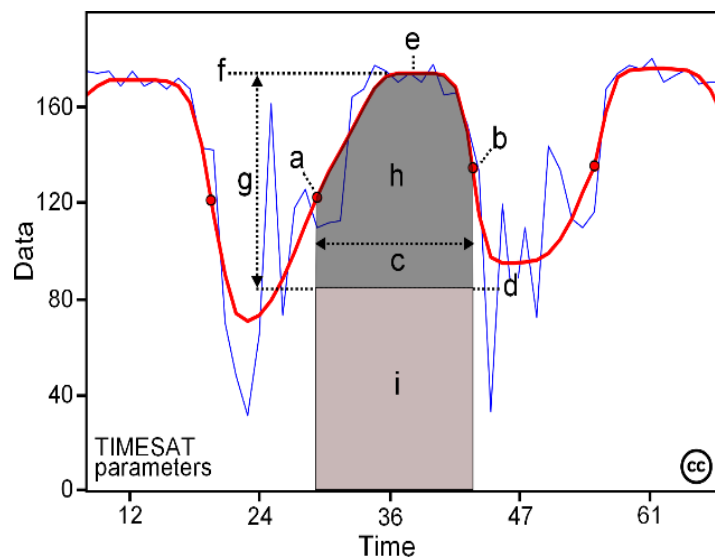


Figura 7. Nueve de los parámetros estacionales generados por TIMESAT: (a) inicio de temporada, (b) fin de temporada, (c) duración de temporada, (d) valor base, (e) fecha de media temporada, (f) valor máximo, (g) amplitud, (h) valor integral pequeño, (h+i) valor i

La metodología utilizada en este estudio se resume en la Figura 8 que consta de tres fases: la preparación de los datos para introducirlos en el software, su procesamiento dentro de TIMESAT y el análisis realizado en R versión 4.2 (R Core Team, 2020).

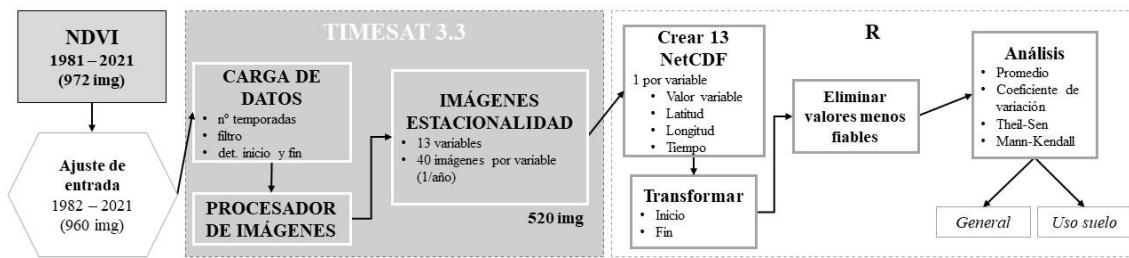


Figura 8. Diagrama de la metodología del trabajo

Al requerirse años completos para la determinación de los parámetros fenológicos, se descartaron las imágenes de 1981, ya que no estaba completo y se trabajó con 960 periodos semi-mensuales desde 1982 a 2021.

Para el ajuste de las series de NDVI se utilizó un filtro de tipo Savitzky-Golay (Kim et al., 2014) con una ventana móvil de tamaño 2, que resulta conservativo con relación al mantenimiento de los datos de NDVI originales. Se escogió este filtro frente al método de mínimos cuadrados y el de funciones asimétricas Gaussianas porque usa funciones polinómicas locales a la hora de ajustar y, según Eklundh y Jönsson (2017), es más preciso y ventajoso en series temporales periódicas y en particular en series de NDVI ya procesadas, ya que éstas se ven relativamente poco afectadas por ruidos temporales. Asimismo, este filtro es capaz de distinguir comportamientos más complejos ya que sigue de forma acotada los cambios estacionales, al ajustar iterativamente la ventana que capta el aumento y la disminución de los datos (Eklundh y Jönsson, 2015). Además, este procedimiento resulta eficaz al caracterizar ciertas cubiertas de suelo, como por ejemplo los pastizales semiáridos que cambian su actividad en periodos de tiempo cortos (Jönsson y Eklundh, 2004).

Un aspecto clave al determinar los ciclos fenológicos es determinar el momento de inicio y final de la temporada vegetativa. Para ello se realizó un test a partir de diferentes cubiertas del suelo considerando la amplitud de la estación vegetativa, definida entre el nivel base y el valor máximo de la distribución de datos de cada temporada. El momento de inicio sucede cuando se alcanza una fracción especificada desde la izquierda de la curva ajustada respecto al nivel de base, establecido en 0.3 unidades ya que este valor muestra un buen encaje para diferentes cubiertas del suelo a nivel nacional. En cambio, el final de la estación se definió en un valor de 0.2, que mostró resultados más coherentes en distintas cubiertas del suelo como bosques de frondosas, pastizales, cultivos de secano, etc. En la Figura 9 se muestra el ajuste de los parámetros establecidos (marrón)

correspondientes a los momentos de inicio y fin de la estación vegetativa a los datos de NDVI de un pastizal.

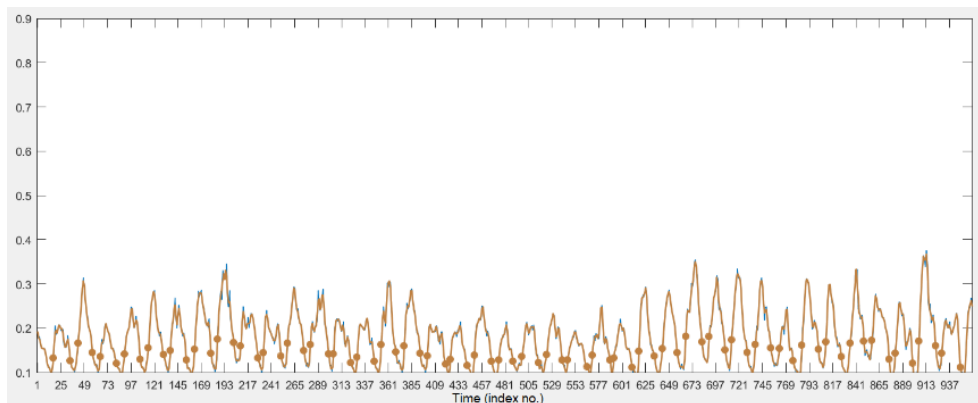


Figura 9. Interfaz gráfica de TIMESAT 3.3 para una zona de pastizal.

Se optó por este método para la selección de comienzo y fin de temporada, frente a establecer un valor de NDVI concreto, por la heterogeneidad del territorio español que hace que no se pueda determinar un valor de NDVI específico para todos los tipos de cubiertas que componen el país. Una vez determinados los parámetros del ajuste de las curvas y de la selección de los criterios para obtener el inicio y fin del periodo de actividad vegetal, TIMESAT genera las diferentes variables fenológicas. Tras haber determinado estos parámetros se procesa uno a uno cada pixel de todas las imágenes. Una vez realizado el procesado, se automatizó el programa para que se generen 13 imágenes distintas, una para cada variable, para cada año.

En la Figura 10 se muestran como ejemplo dos de las imágenes con los datos de comienzo de la temporada: la que corresponde con el inicio de la temporada el primer año (1982) y la que pertenece al año 38 del análisis (2019). Los valores de la leyenda son diferentes en ambas fechas porque refieren a la imagen del año en la que se detecta el inicio de la temporada y la numeración de las imágenes es continua en toda la serie temporal 1982-2020, correspondiendo al primer año las imágenes 1 a 24 y al año 2019 las imágenes 889 a 912 de la serie.

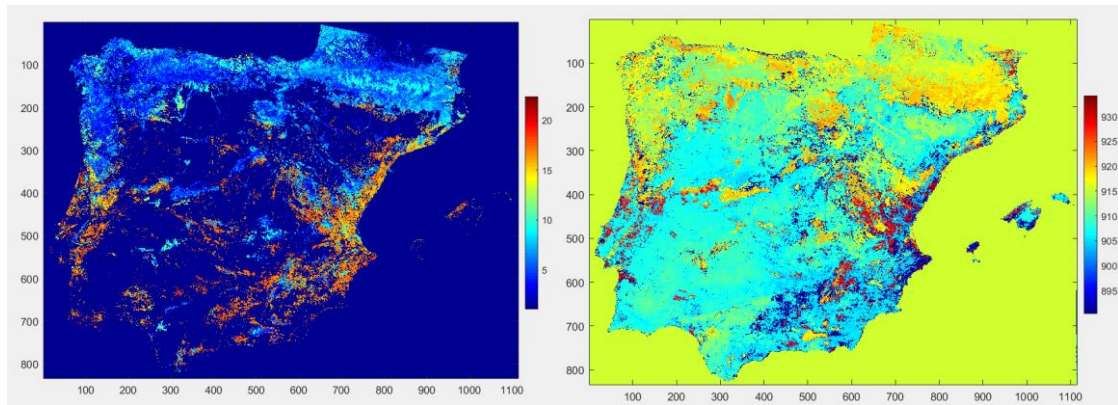


Figura 10. Resultados de estacionalidad de comienzo de temporada para 1982 (izquierda) y 2019 (derecha).

4.3. Preparación de las fenométricas para el análisis

En el siguiente paso se generaron 13 archivos netCDF, uno para cada variable extraída, que contuvieran el valor de la variable en el tiempo (40 años), y en el espacio (latitud, longitud). El netCDF (.nc) es un archivo con formato espacial y temporal, una matriz de datos multidimensional que permite usar datos espacio-temporales y multivariantes (Royé, 2015). Se puede observar su configuración en la Figura 11.

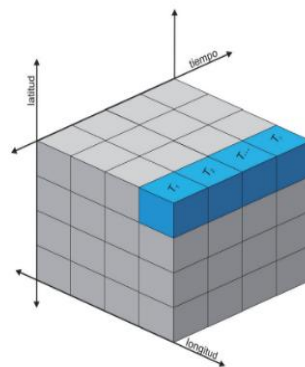


Figura 11. Ejemplo de una matriz netCDF (Royé, 2015).

En el caso de los archivos .nc de las variables comienzo, final de temporada y fecha media de temporada se codifican los valores para que sean en días julianos y en todas las variables se extrae el área de estudio a partir de una máscara.

Una vez obtenidos los parámetros fenológicos, se observó que los datos eran deficientes en los años primero y último en algunas cubiertas, dado que el algoritmo de ajuste de TIMESAT no encuentra las curvas completas de algunos tipos de cubierta cuyos ciclos fenológicos comienzan en el año anterior o terminan en el siguiente. Igualmente,

en los datos de comienzo de temporada aparecían algunos datos negativos en los usos del suelo en los que las temporadas comienzan en el año anterior y valores superiores a 365 en algunos usos en los que la temporada acababa en el siguiente año.

Para resolver el problema se abordaron dos estrategias, (i) incluir un tercio de las imágenes del año anterior y posterior y (ii) analizar por trienios. Se comprobó que los resultados no mejoraban, por lo que para resolver los valores negativos se realizaron ajustes para que los valores menores de 0 al inicio se trasladaran al año anterior y los mayores de 365 al final al año siguiente.

El análisis preliminar de los datos permitió comprobar que, dadas las características de algunas de las cubiertas y de determinados ciclos fenológicos, el modelo obtenía resultados no coherentes en algunas zonas, con temporadas de actividad vegetal muy variables, como determinadas zonas de cultivo de regadío (Figura 12). Con el fin de eliminar los datos donde la confianza en la estimación de la fenología es muy baja, se eliminaron las zonas en las que la desviación interanual correspondiente a los datos de inicio de la temporada fuera superior a 75 días, ya que la incertidumbre de las estimaciones fenológicas en estas zonas resultaba muy elevada. Una vez realizado todo el proceso se eliminaron el primer y último año de la serie temporal de todas las variables fenológicas para evitar artefactos en la estimación de periodos fenológicos no completos, por lo que el análisis temporal se limitó al periodo 1983-2020.

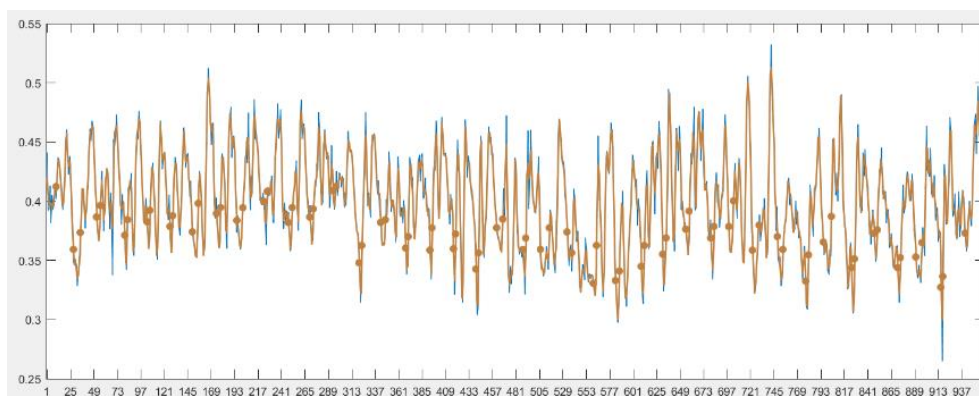


Figura 12. Evolución temporal del NDVI, curvas de ajuste y puntos de inicio y fin de la temporada para un cultivo de regadío.

4.4. Análisis de la fenología de la vegetación

El análisis de las diferentes variables fenológicas se basó en la caracterización espacial de las variables fenológicas en función del promedio de la distribución de los datos y de su variabilidad mediante el estudio de su coeficiente de variación, que es una medida de dispersión relativa y comparable entre áreas que presentan una diferente magnitud (Rustom et al., 2012).

Para evaluar cambios en las distintas variables se utilizaron dos estadísticos no paramétricos, la regresión de Theil-Sen y el test de Mann-Kendall. Se escogieron estos métodos porque son pruebas que permiten cuantificar tanto la magnitud de cambio en una serie temporal como la significación estadística de dicho cambio. Theil-Sen es un modelo de regresión lineal que estima la pendiente respecto a las medianas de las pendientes de los pares de puntos, por lo que informa sobre la magnitud de cambio en una variable con relación al tiempo. El método es consistente para distribuciones asimétricas y tolera grandes desviaciones de error (Fernandes y Leblanc, 2005; Peng et al., 2008). Por otro lado, el test de Mann Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1948) analiza datos de series temporales en busca de tendencias crecientes o decrecientes en sus valores (Güçlü, 2018) para así poder determinar la significación estadística de los cambios observados.

Los resultados se obtuvieron para cada uno de los píxeles de 1.1 km, pero también se llevó a cabo una agrupación de los resultados para las principales cubiertas del suelo de España. Para ello se utilizó el mapa de cultivos y aprovechamientos entre 1980 y 1990 a escala 1:50.000 generado por el antes llamado Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). Dicho mapa se muestra en la Figura 2.

5. RESULTADOS

A continuación, se exponen los resultados dedicando un apartado específico para siete de las fenométricas derivadas más importantes, uno para las restantes y otro para la significatividad de los cambios en la superficie de España de las variables fenológicas extraídas. Se seguirá la misma estructura para todas las fenométricas: la distribución espacial, el análisis por cubiertas del suelo y la significatividad de cambio por cubiertas del suelo.

5.1. Inicio de la temporada

El comienzo promedio de la temporada presenta diferencias espaciales claras entre la región norte, algunas zonas de montaña de la España interior y ciertas zonas de regadío, que inician la temporada al final del primer trimestre del año; y el resto de la vegetación de España, la mediterránea, que comienza su temporada entre septiembre y noviembre (Figura 13). Durante el periodo de estudio se puede observar una fuerte variación interanual en el inicio de la temporada en la cuenca del Duero y la Meseta Sur, que se corresponden con áreas de secano, y las zonas de regadío del Guadalquivir y el Ebro, además de la mayor parte de Galicia. La magnitud de cambio (Theil-Senn) muestra valores negativos en la mayor parte de España, que sugieren un adelanto en el inicio de los periodos vegetativos, de entre 1 y 2 días por año y superiores a 2 en algunas zonas de las mesetas norte y sur y en el valle del Guadalquivir. Por el contrario, en Galicia se observa un retraso en el inicio de la actividad vegetal de entre 1 y 2 días por año. Los cambios en esas zonas tienden a ser estadísticamente significativos.

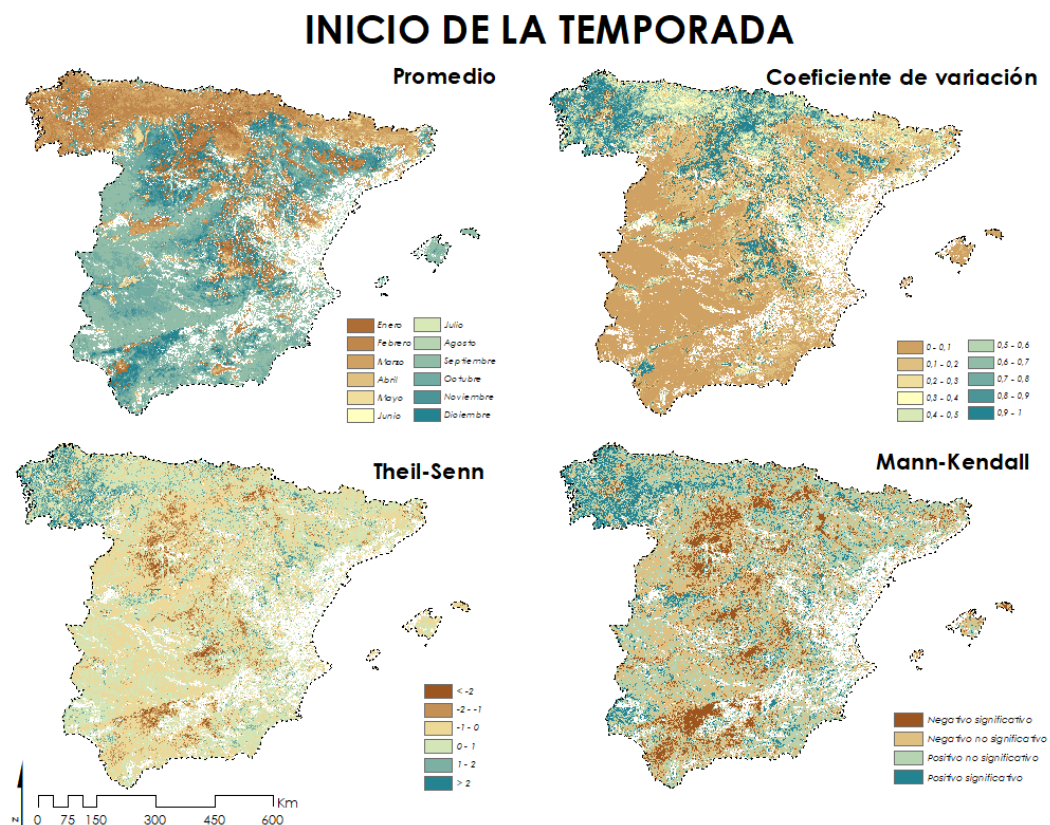


Figura 13. Mapas de las estadísticas para el comienzo de la temporada.

El análisis por diferentes cubiertas del suelo muestra una alta variabilidad en los valores promedio del inicio de temporada en algunos tipos de cubierta (Figura 14, izquierda), lo que sugiere amplias diferencias a nivel subregional. Los regadíos, viñedo-secano, matorral, pastizal-matorral, coníferas, eucaliptos, frondosas, coníferas con otras frondosas, improductivos y viñedo y frutales tienen una distribución muy asimétrica del promedio, puesto que la mediana no está en el centro de la caja y, además, presentan una diferencia muy alta entre el primer y el tercer cuartil. La menor variabilidad en el promedio de la fecha de inicio la presentan las coberturas de prados naturales, pastizales, algunos cultivos de secano y los bosques mixtos de eucaliptos con coníferas. La mayor variabilidad interanual en el inicio de actividad vegetal (Figura 14, central) se registra en los bosques mixtos de eucaliptos con coníferas y los prados naturales, y la menor variabilidad se registra en los diferentes cultivos de secano. La tendencia general de todas las cubiertas del suelo ha sido hacia un adelanto en la fecha de inicio de la temporada vegetativa, destacando las zonas de chopos y álamos y las superficies de regadío (Figura 14, derecha). No obstante, las zonas de eucaliptos, bosques mixtos de los mismos con coníferas y prados naturales han tenido una tendencia positiva, es decir, han mostrado una tendencia a atrasar su inicio.

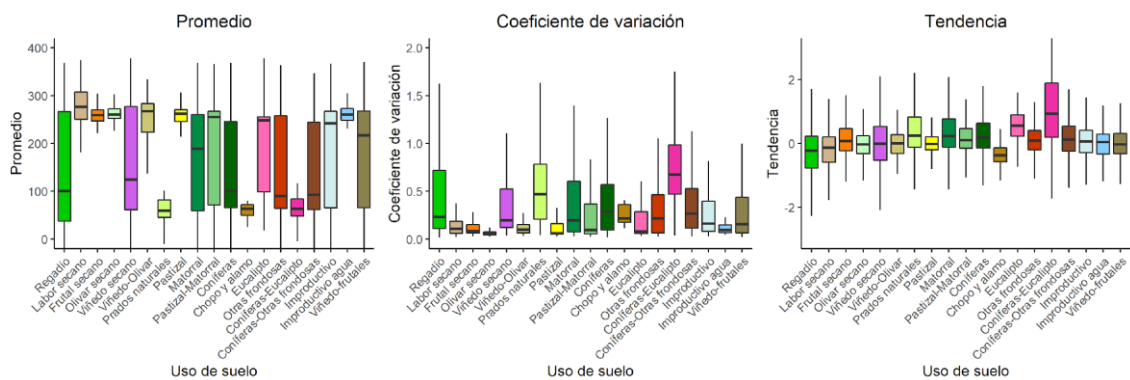


Figura 14. Estadísticas del comienzo de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos en cada una de las cubiertas del suelo indica que casi el 50% de la superficie de eucaliptos de España ha atrasado el inicio de la temporada. Lo mismo ocurre en el 40% de la extensión de los bosques mixtos de eucaliptos con coníferas y en un 20% los prados naturales (Figura 15). Entorno al 10% de todas las superficies han atrasado la salida de las hojas. Por otro lado, destacar que alrededor de un 20% de las zonas de cultivos de

secano y regadío y las riberas naturales muestran un adelanto significativo en las fechas de inicio de actividad vegetal.

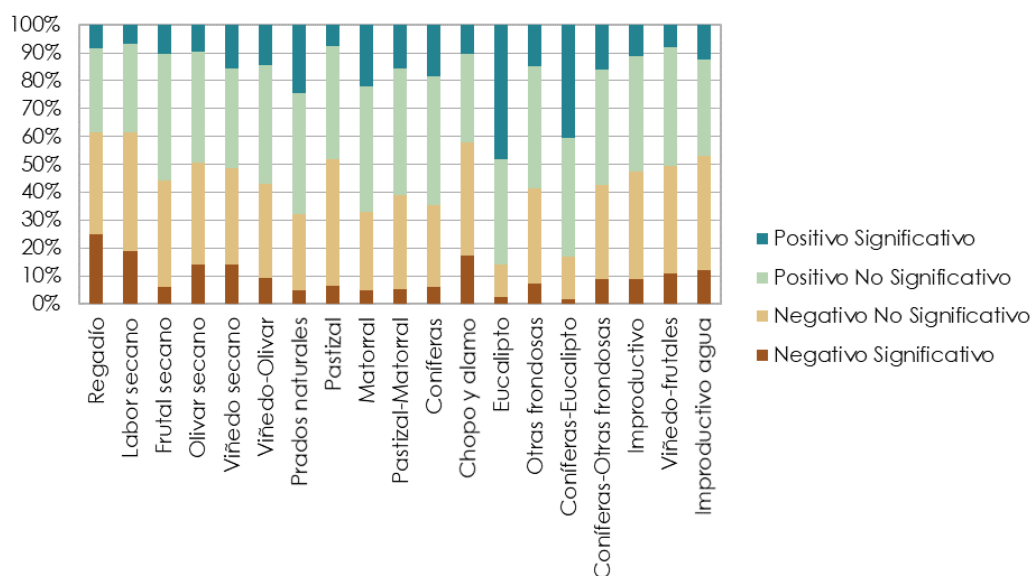


Figura 15. Cambios en el comienzo de temporada por uso de suelo.

5.2. Final de la temporada

El final de temporada también presenta diferencias espaciales entre la región eurosiberiana, zonas de montaña del interior de España y algunas zonas de regadío que finalizan la temporada durante el último trimestre del año; y la región Mediterránea que termina la temporada en torno a mayo y junio de forma promedio (Figura 16). En general, la variabilidad interanual de la fecha de fin de temporada es baja y muy homogénea espacialmente en todo el país. La magnitud de cambio (Theil-Senn) señala variaciones negativas en las llanuras de inundación de los grandes ríos, en las que el final de la temporada se adelanta entre 1 y 2 días por año, y en zonas situadas junto a los cauces de los ríos se adelanta incluso más. Por el contrario, en zonas de Galicia y Extremadura se observa un retraso de entre 1 y 2 días por año durante el periodo de estudio.

FINAL DE LA TEMPORADA

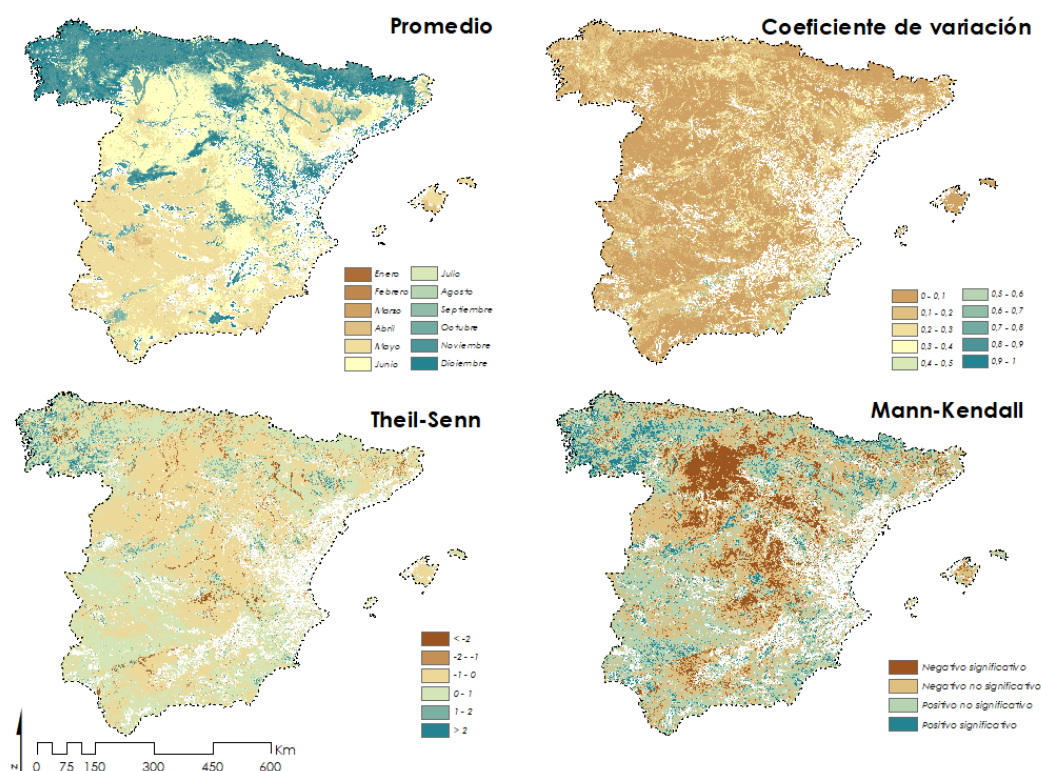


Figura 16. Mapas de las estadísticas para el final de la temporada.

El análisis realizado a partir de las distintas coberturas del suelo muestra una gran diferencia en la fecha de finalización promedio de temporada (Figura 17, izquierda), lo que sugiere diferencias subregionales. Las tendencias son asimétricas en el caso de las zonas de regadío y viñedo de secano y viñedo con frutales, además de las zonas de matorral, pastizales y matorrales, coníferas, frondosas y bosques mixtos, con una diferencia muy alta entre el primer y el tercer cuartil de la distribución de valores; mientras que las superficies de secano, eucaliptos y pastizales presentan fechas muy similares dentro de la superficie ocupada por este uso del suelo. La variabilidad del final del periodo vegetativo es baja en todas las cubiertas, siendo las más variables las zonas de regadíos y de coníferas con eucaliptos (Figura 17, centro). La tendencia es prácticamente nula en todas las coberturas excepto en las riberas de los ríos (chopos, álamos y regadío), que presentan una tendencia a adelantar la fecha de fin de temporada. Sin embargo, los bosques mixtos de coníferas con eucaliptos presentan una clara tendencia a retrasar la misma (Figura 17, derecha).

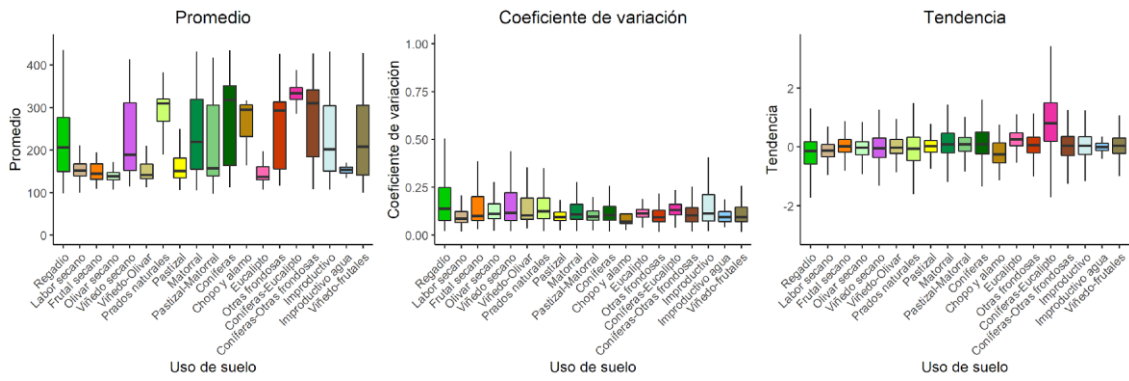


Figura 17. Estadísticas del final de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

El análisis del porcentaje de superficie muestra cambios estadísticamente significativos en cada una de las cubiertas del suelo, entre las que destaca un retraso en el final de la temporada en el 35% de la superficie de los bosques mixtos de eucaliptos con coníferas y un 20% de la superficie de eucaliptos (Figura 18). En torno al 10% todas las superficies han retrasado su senescencia. Mientras que las zonas de regadío, labor de secano y riberas naturales se ha adelantado esta fecha en un 30% de la superficie.

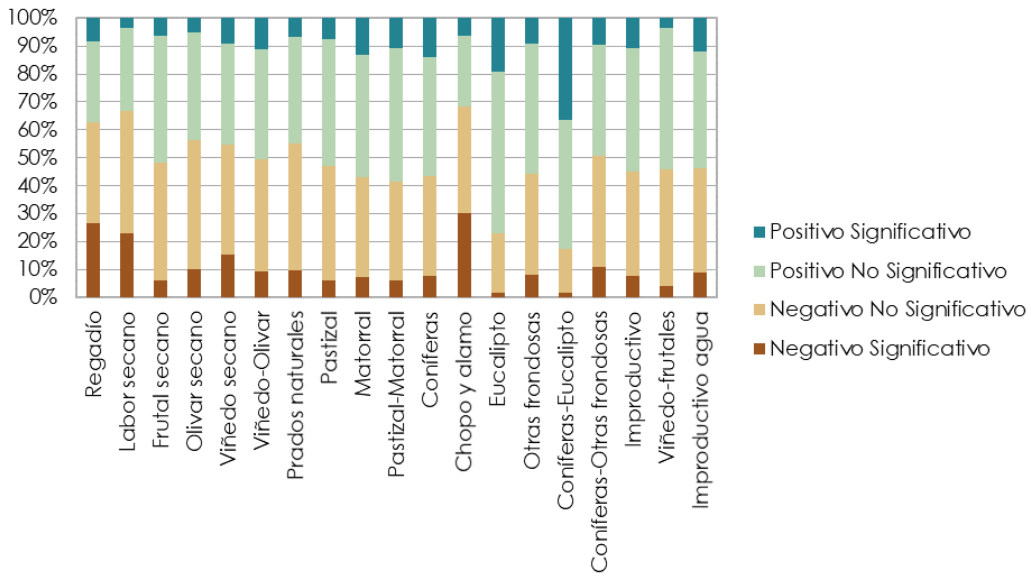


Figura 18. Cambios en el fin de temporada por uso de suelo.

5.3. Duración de la temporada

La duración promedio de la temporada de actividad vegetal en España está entre 7 y 9 meses, exceptuando las zonas del interior de las grandes cuencas, en las que la temporada dura unos 6 meses (Figura 19). La variabilidad interanual en la duración de la temporada de la serie marca una línea sureste-noroeste que empieza en la región de Murcia y acaba en Galicia y divide el área de estudio en dos partes, estando la zona al norte de la línea caracterizada por una mayor variación a lo largo del tiempo. La magnitud de cambio muestra en general un aumento de 1 día en la duración de la temporada por año, excepto en el norte y en algunas de las cadenas montañosas mediterráneas interiores en las que la duración ha disminuido en 1 día o más, especialmente en Galicia. Los cambios en esas zonas tienden a ser estadísticamente significativos, sobre todo en zonas del valle del Guadalquivir.

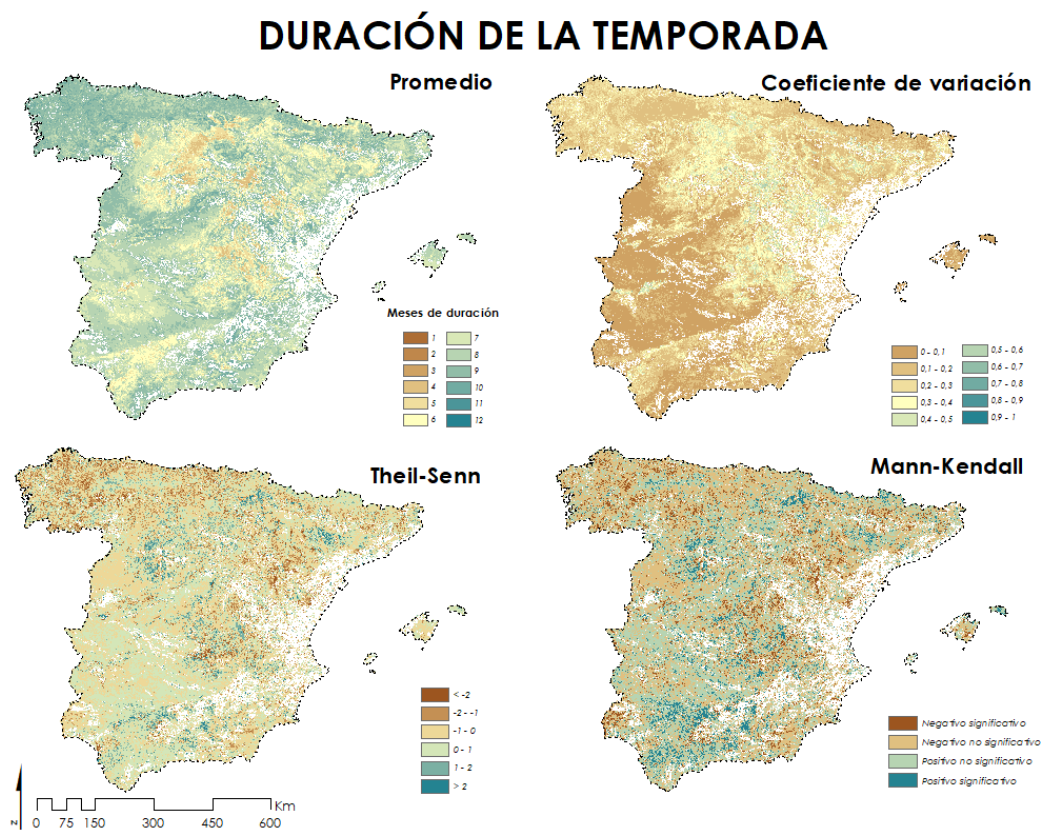


Figura 19. Mapas de las estadísticas para la duración de la temporada vegetativa.

En el análisis por coberturas hay que destacar que la duración promedio de la temporada vegetativa es muy homogénea: entre 6 y 8 meses (Figura 20, izquierda). Además, los datos presentan una distribución bastante simétrica que sugiere escasas

diferencias subregionales. Hay que destacar que las choperas y alamedas tienden a tener el periodo vegetativo activo más corto; y los eucaliptos, las coníferas y los prados naturales el más largo. Se detecta una notable variabilidad interanual en todas las coberturas (Figura 20, centro), siendo las más variables interanualmente los cultivos de regadío y las choperas y alamedas. La mayoría de las coberturas muestran un dominio de valores negativos en la magnitud de cambio del periodo vegetativo (Figura 20, derecha), en especial en los prados naturales y los chopos y los álamos, mientras que aumenta la duración de la temporada vegetativa en la labor de secano, el olivar, la vid y los pastizales.

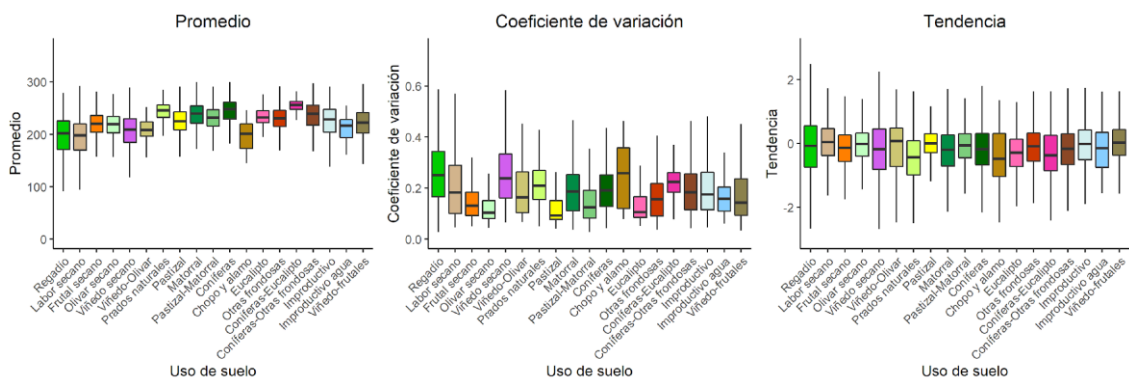


Figura 20. Estadísticas de la duración de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos en cada cubierta indica que entre el 5% y un 10% de la superficie de todos los tipos de suelos ha sufrido una disminución de la temporada vegetativa de forma estadísticamente significativa (Figura 21). Destacan las zonas de ribera naturales y bosques de eucaliptos que lo han hecho en más de un 15% de su superficie. Por otro lado, las zonas de regadío son las que más superficie (10%) muestran un aumento en el periodo de actividad, junto con las superficies de secano y pastizales.

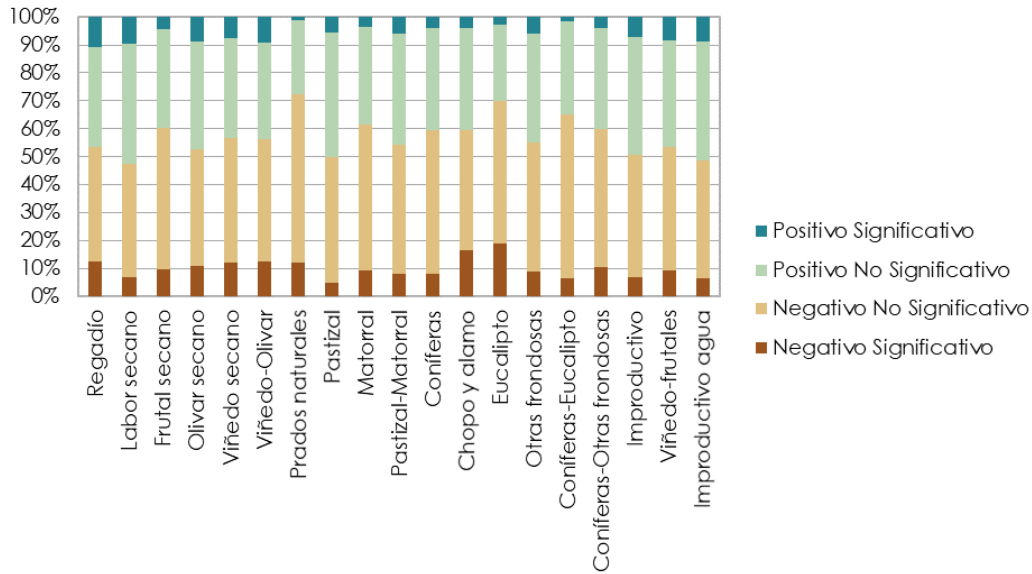


Figura 21. Cambios en la duración de temporada por uso de suelo.

5.4. Valor base de la temporada

El promedio del valor base de la temporada presenta diferencias espaciales muy notables (Figura 22). Por un lado, Galicia, la costa atlántica y el Pirineo presentan valores base muy altos (azules), mientras que el resto de España tiene presenta un valor mucho más bajo (colores marrones y amarillos). Destacan en su valor base la Cordillera Cantábrica, Pirineos y Sierra Nevada con un valor base de 0 (marrón muy oscuro). La variabilidad del valor es muy alta en la zona norte, el Sistema Ibérico y algunas zonas regadas. La magnitud de cambio (Theil-Senn) muestra variaciones positivas en la mayor parte de España aumentando más de una centésima por año el valor, excepto en la Meseta Sur y la Cuenca del Duero en la que se mantiene el valor o disminuye ligeramente. Los cambios en casi la totalidad de España son positivos y estadísticamente significativos, de tal modo que se puede afirmar que los valores de NDVI al inicio y al final de la temporada están incrementándose de forma generalizada.

VALOR BASE DE LA TEMPORADA

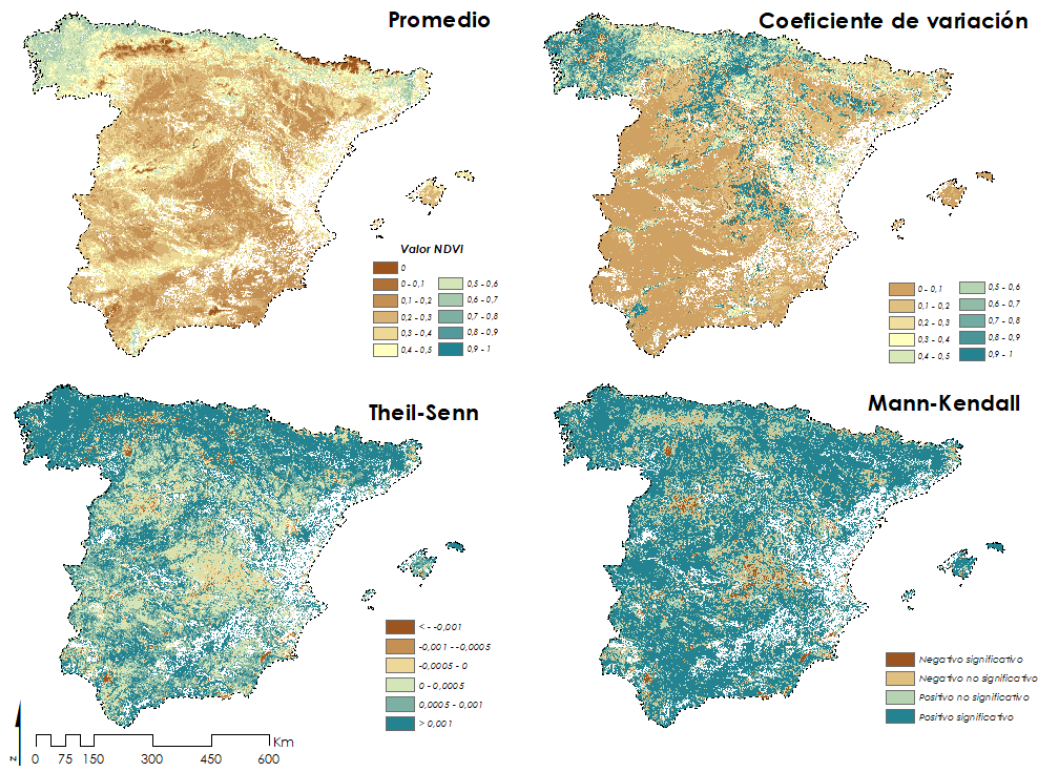


Figura 22. Mapas de las estadísticas para el valor base de la temporada.

El análisis de los cambios en el valor de base en las diferentes cubiertas del suelo muestra valores base promedio mayores en las zonas de eucaliptos con coníferas y los prados naturales, mientras que los más bajos son cultivos de secano (Figura 23, izquierda). La variación interanual en el valor de base tiende a ser baja en las distintas cubiertas (Figura 23, centro), destacando una mayor variabilidad en los prados naturales, matorrales y bosques. La tendencia general de todas las cubiertas es al aumento del valor de base (Figura 23, derecha).

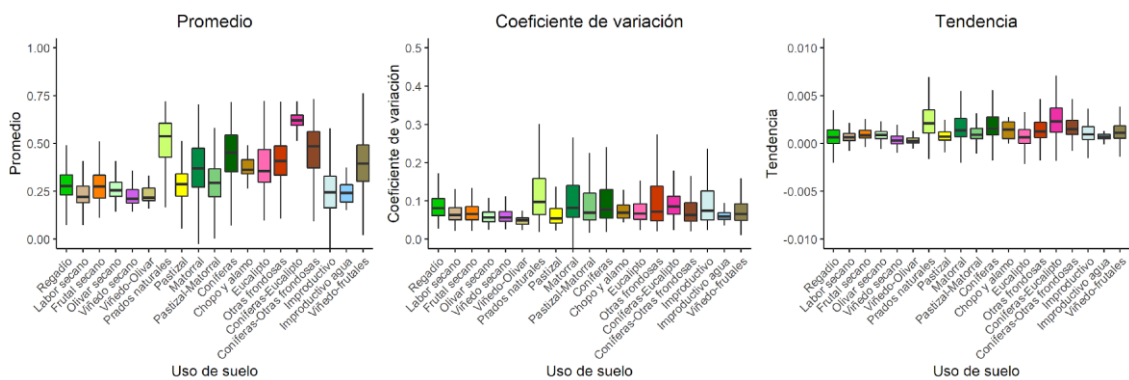


Figura 23. Estadísticas del valor base de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos en cada una de las cubiertas destaca que el 50% o más de la superficie de todas las cubiertas ha aumentado el valor de base de la temporada vegetativa (Figura 24). Se distinguen del resto de coberturas las zonas de regadío, viñedos y eucaliptos donde es menor el cambio en su superficie y, sobre todo, los bosques de coníferas y otras frondosas, en las que el 80% de su superficie ha visto aumentado este valor.

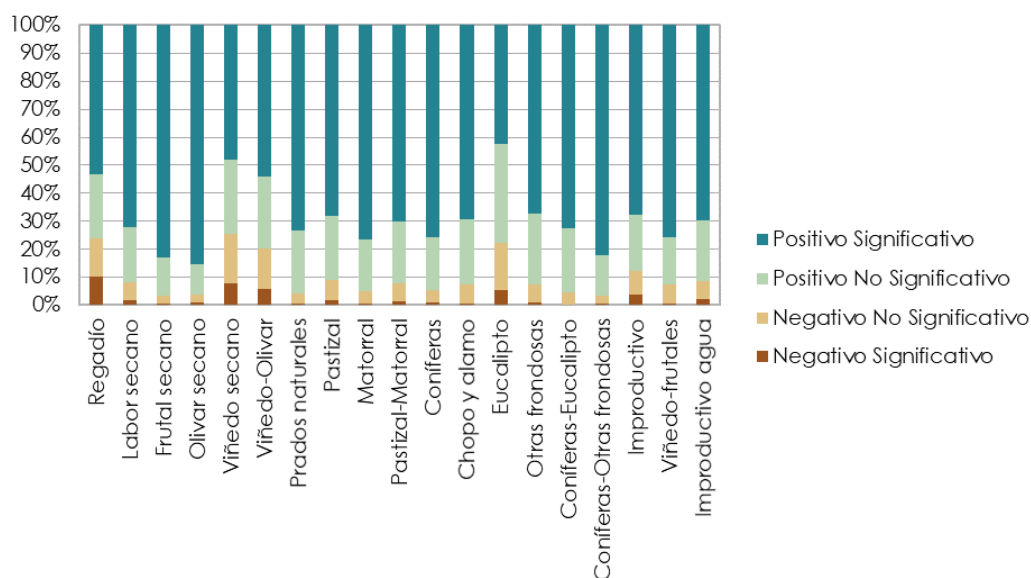


Figura 24. Cambios en el valor de base del NDVI de la temporada vegetativa por uso de suelo.

5.5. Fecha media de la temporada

El promedio de la fecha de la mitad de la temporada sigue un patrón espacial: la zona norte tiene la mitad de su temporada en verano, mientras que en el resto de España se produce durante el invierno y principios de primavera (Figura 25). Respecto a la variabilidad interanual hay que destacar que de la frontera noroeste con Portugal hasta Murcia se observa una variabilidad más alta al sur que en el resto de España. El análisis de la magnitud de cambio muestra un adelanto de la fecha media de temporada en zonas de regadío situadas en torno a los cauces de los ríos. Dicho adelanto es de 2 días por año desde inicios de la década de 1980, mientras que en las zonas de secano de los valles del Duero y el Guadalquivir el adelanto suele ser de 2 días aproximadamente. Por el contrario, en Galicia y el valle del Ebro se observa un retraso en torno a 1 día por año. Los cambios en estas zonas, especialmente en zonas de secano del valle del Duero, son estadísticamente significativos.

FECHA MEDIA DE LA TEMPORADA

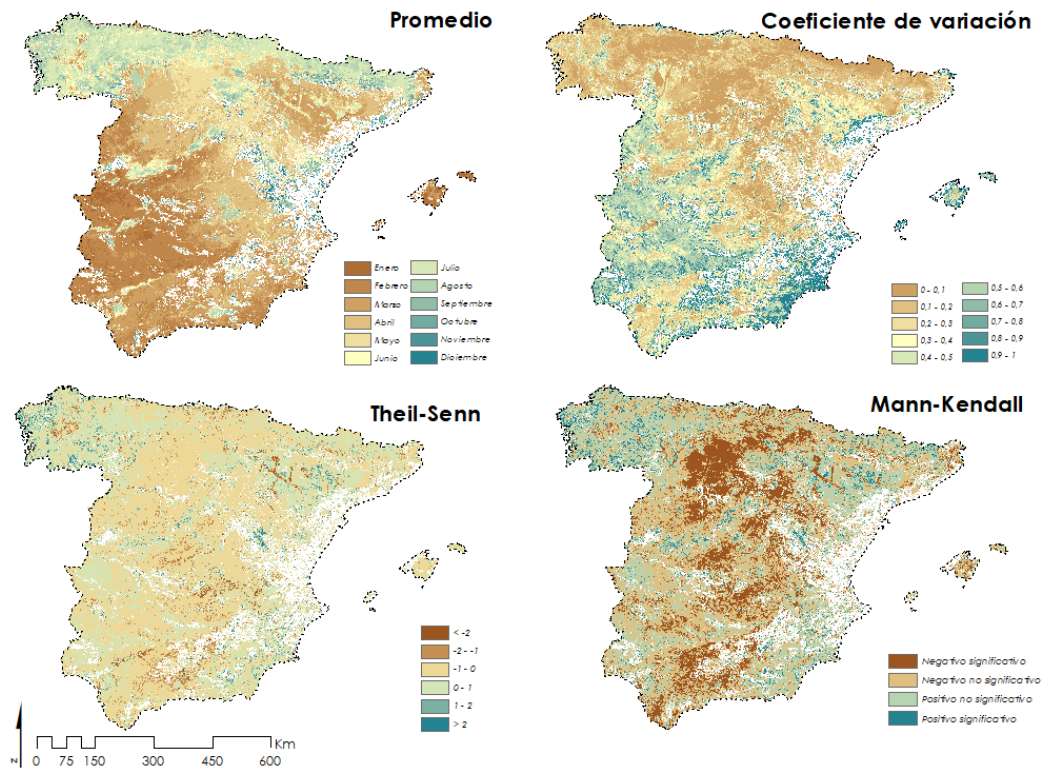


Figura 25. Mapas de las estadísticas para la fecha media de la temporada.

El análisis por diferentes cubiertas muestra una alta variabilidad en la fecha media de temporada en todas ellas, con mayores diferencias subregionales en las zonas de viñedos, matorrales, coníferas y frondosas (Figura 26, izquierda). La mayoría de las cubiertas tienen la mitad de su temporada entre enero y marzo (mes 1 y mes 3), excepto los prados naturales, las coníferas, frondosas y bosques mixtos de coníferas con eucaliptos y otras frondosas, que suelen registrar la fecha media de actividad vegetal alrededor de julio. La mayor variabilidad interanual en la fecha de media de la temporada se registra en los frutales y olivares de secano junto con los eucaliptos (Figura 26, centro). La tendencia en todas las cubiertas es el avance de esta fecha, resultando la misma más temprana, excepto en el caso de las coníferas con eucaliptos que las que se produce un retraso (Figura 26, derecha).

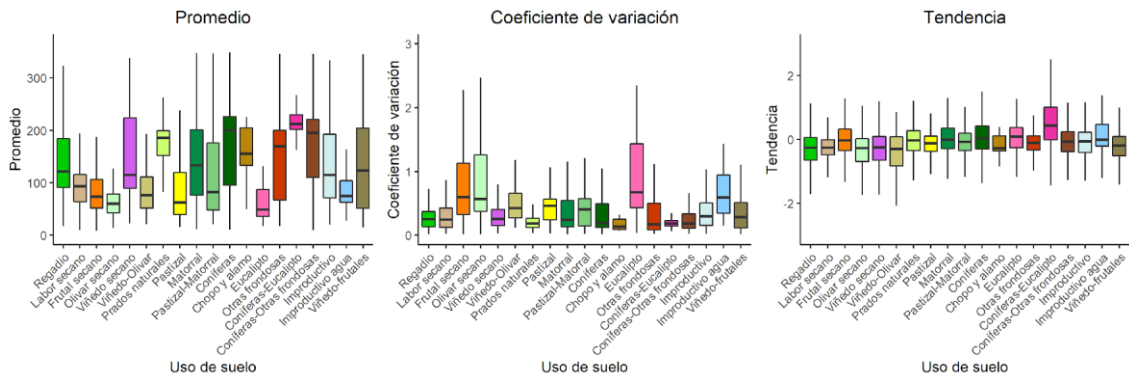


Figura 26. Estadísticas de la fecha media de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos en cada una de las cubiertas del suelo indica que un mayor porcentaje de superficie adelanta la fecha media de la temporada en todos los usos del suelo, con la excepción de los eucaliptos, que en formaciones con coníferas muestran un retraso en más de un 15% de su superficie (Figura 27). Los suelos que más superficie han visto adelantada su fecha intermedia, alrededor de un 30%, son por igual los cultivos de regadío, seco y las zonas de bosques de ribera.

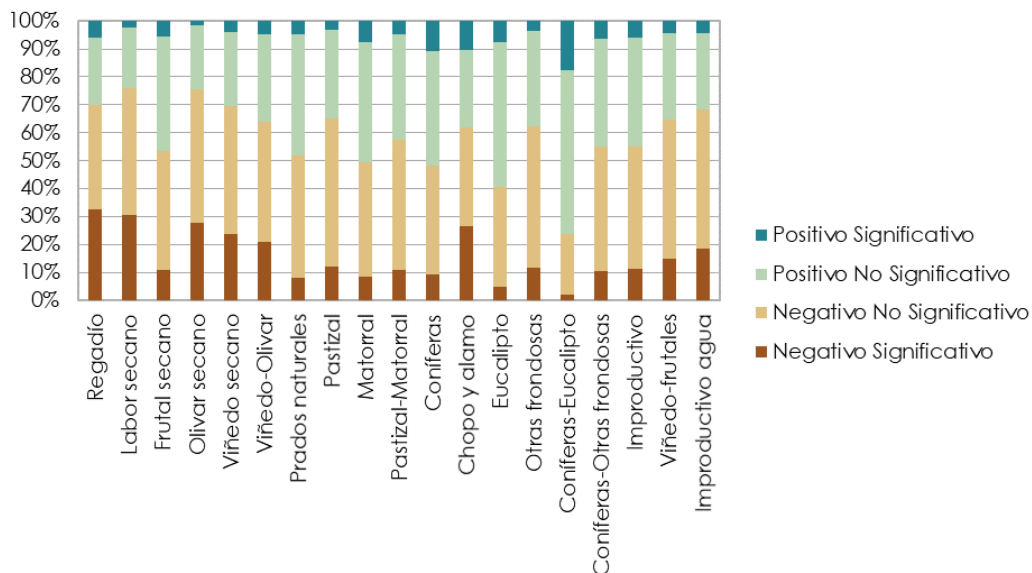


Figura 27. Cambios en fecha media de temporada por uso de suelo.

5.6. Valor máximo de la temporada

El promedio del valor máximo del NDVI a lo largo de la temporada vegetativa presenta diferencias espaciales claras entre la zona norte y oeste del país, donde los

valores son más altos (0,7-0,8), y la zona este donde son mucho más bajos (0,2-0,5), destacando la cuenca del Ebro, además de las regiones de Almería, Murcia y La Mancha (Figura 28). La variabilidad interanual en el valor máximo de la temporada es en general baja, pero se observa mayor variación en las cuencas del Ebro, Duero, Guadalquivir y en la Meseta Sur. La magnitud de cambio del valor máximo presenta un aumento de más de una centésima de NDVI cada año, exceptuando el valle del Guadalquivir y pequeñas áreas en el centro del país en las que el valor disminuye más de una centésima. Los cambios en casi la totalidad de España son estadísticamente positivos y significativos.

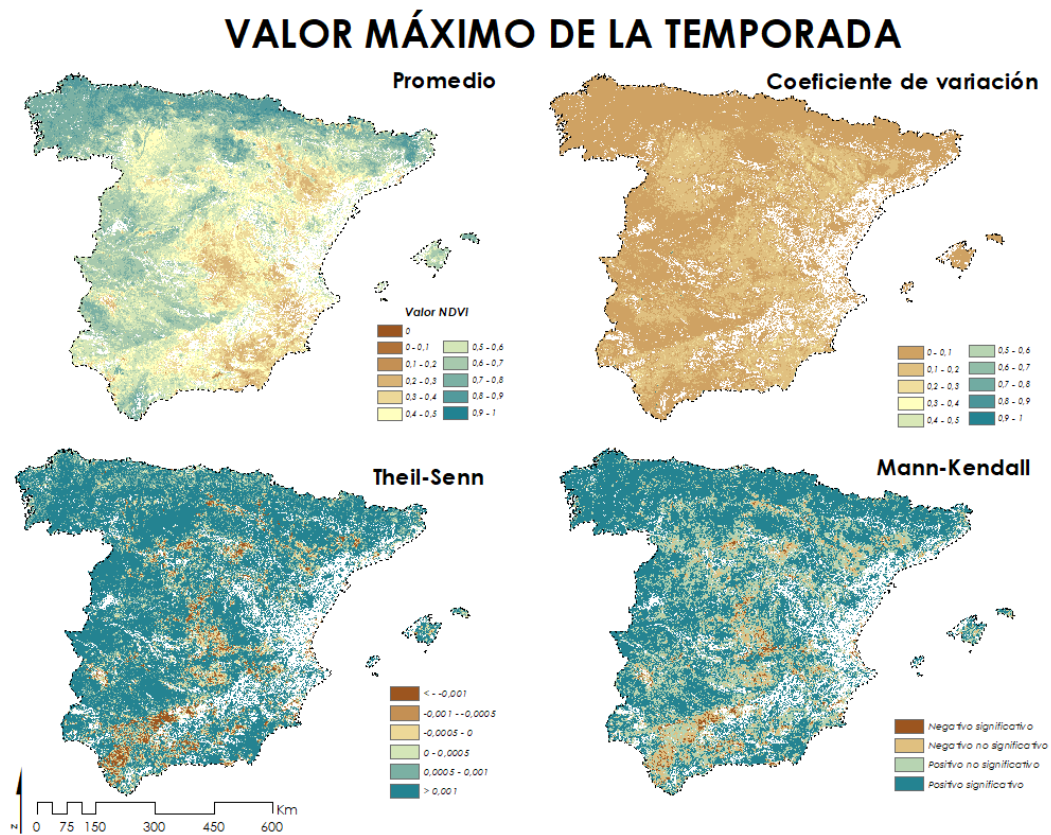


Figura 28. Mapas de las estadísticas para el valor máximo de la temporada.

El análisis realizado para diferentes cubiertas del suelo muestra que, en promedio, los valores máximos de NDVI en las diferentes cubiertas del suelo presentan una distribución normal. Los valores más elevados se registran en los prados naturales, las frondosas y los eucaliptos con coníferas y los más bajos en los cultivos de secano (Figura 29, izquierda). Las variaciones interanuales son en general escasas, siendo las cubiertas que más varían la labor de secano y las que menos los prados naturales y las coníferas con eucaliptos (Figura 29, central). La tendencia en todas las cubiertas del suelo es hacia

el aumento del valor máximo de NDVI durante el periodo de estudio, (Figura 29, derecha).

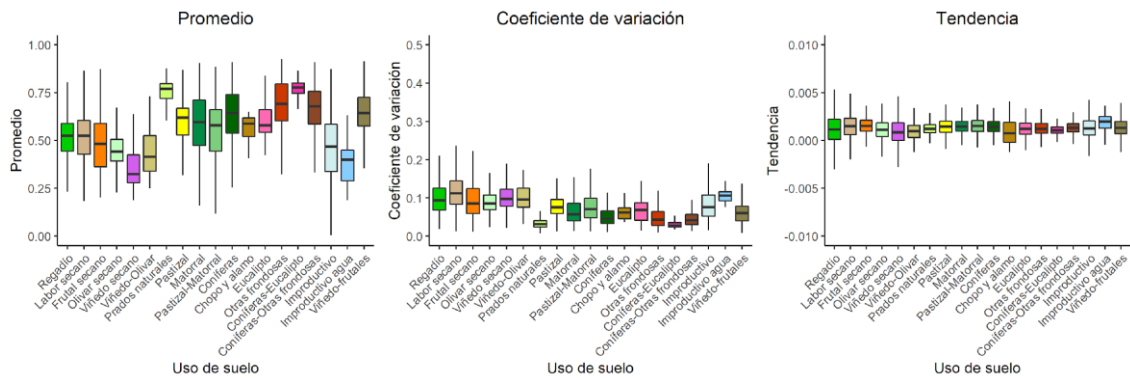


Figura 29. Estadísticas del valor máximo de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos en cada una de las cubiertas del suelo indica un patrón general en todas ellas, ya que ha aumentado el valor máximo de NDVI durante el periodo de actividad vegetal en un mínimo de un 45% de la superficie de todas las categorías (Figura 30). Siendo las coníferas y los prados naturales en los que la superficie afectada por cambios significativos es superior (80%).

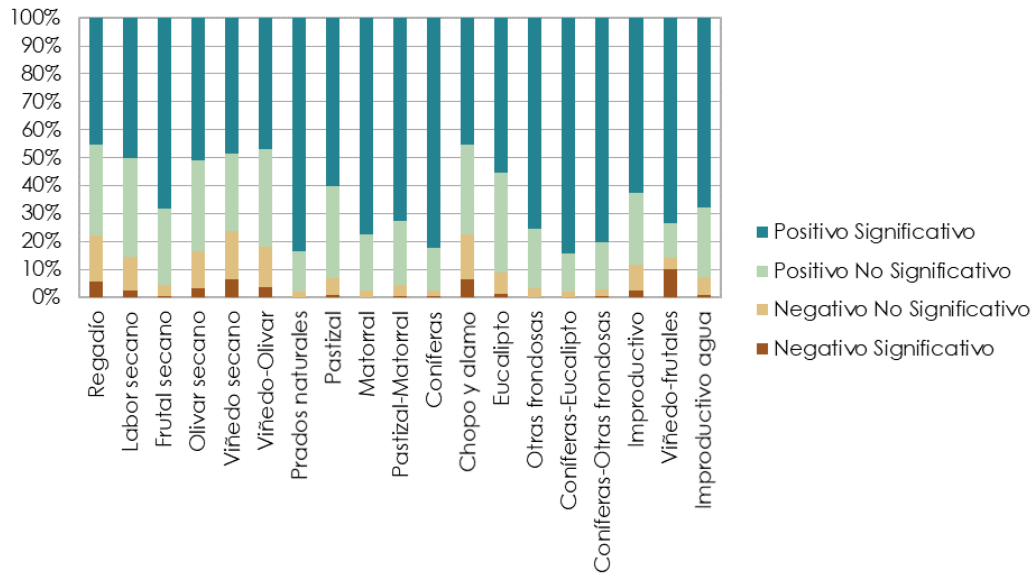


Figura 30. Cambios en el valor máximo de temporada por uso de suelo.

5.7. Amplitud de la temporada

La amplitud promedio de los valores de NDVI a lo largo de la temporada de actividad vegetal muestran una notable homogeneidad en toda España, con valores entre 0,2 y 0,3 de diferencia entre el valor máximo y el valor de base en la mayor parte de España (Figura 31). La excepción se registra en áreas de las cordilleras Cantábrica y del Pirineo, con amplitudes superiores a 0,6 y zonas del oeste del país, con amplitudes en torno a 0,5. La variabilidad interanual de esta variable es baja en las zonas donde la amplitud es mayor, mientras que es más alta al este del país y en la zona norte de Galicia. La magnitud de cambio muestra en el norte, en el Sistema Central y en parte de la depresión del Guadalquivir una disminución de una centésima de la amplitud cada año, mientras que en el resto de España aumenta en una centésima. En amplias zonas del interior de España se produce un incremento estadísticamente significativo en la amplitud de los valores de NDVI anuales a lo largo del periodo de estudio, al igual que se producen descensos significativos de NDVI en la zona norte del país.

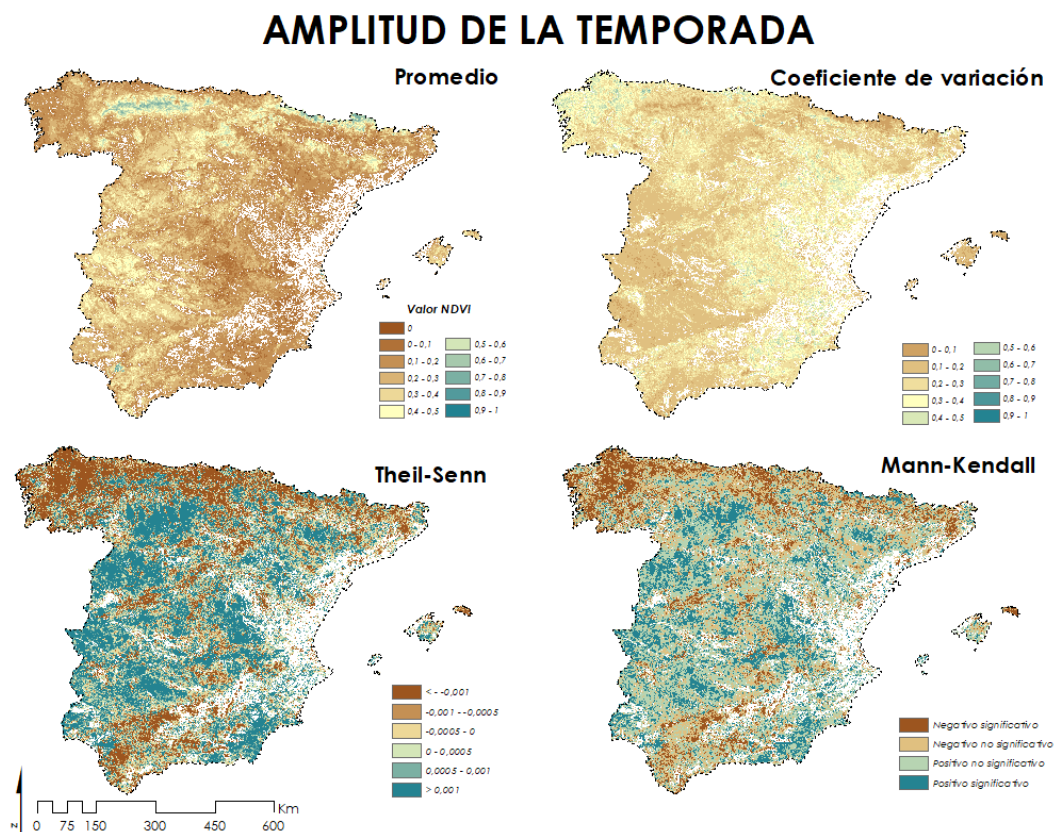


Figura 31. Mapas de las estadísticas para la amplitud de la temporada.

El análisis por diferentes cubiertas del suelo muestra un promedio de la amplitud muy similar entre todas ellas, con una escasa variabilidad de los valores en cada una de ellas (Figura 32, izquierda). La amplitud promedio más alta se registra en zonas de pastizales, cultivos de secano, mientras que los valores promedio más bajos se registran en zonas de viñedo de secano, viñedo-olivar y en bosques mixtos de coníferas con eucaliptos. La variabilidad interanual de la amplitud del NDVI a lo largo del periodo vegetativo es similar en las distintas cubiertas del suelo, aunque tiende a ser más alta en las zonas mixtas de coníferas y eucaliptos, en viñedos de secano y en pastizales (Figura 32, centro). Las tendencias de esta variable son similares en todas las cubiertas, exceptuando los prados naturales y los bosques de eucaliptos con coníferas que muestran tendencias negativas dominantes (Figura 32, derecha).

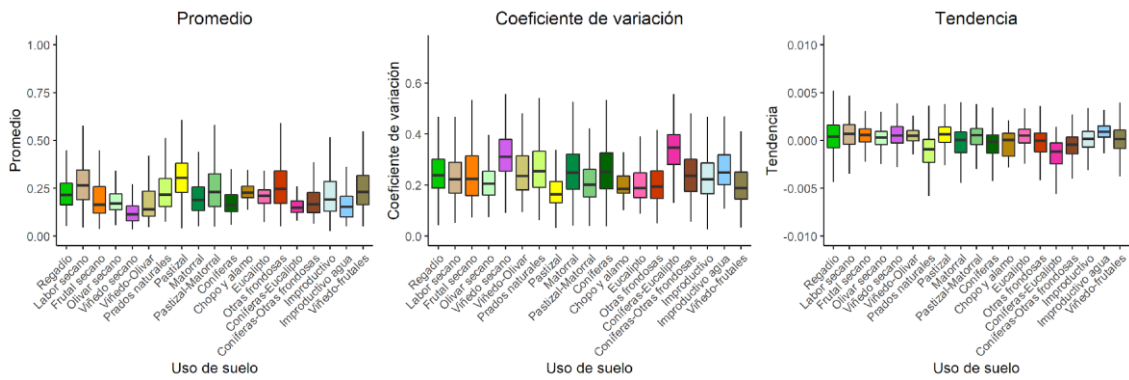


Figura 32. Estadísticas de la amplitud de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos en cada una de las cubiertas del suelo muestra tanto aumentos como disminuciones de la amplitud en todas las cubiertas (Figura 33). Todas las cubiertas han experimentado un aumento de la amplitud en un mínimo de un 5% de la superficie, mientras que en todas se ha experimentado una disminución en casi un 10% de su superficie. Destacan los viñedos con frutales donde un 50% de su superficie ha experimentado aumentos de la amplitud y el olivar y frutal secano que lo han hecho en un 30% de la superficie. Por el contrario, los prados naturales, los bosques mixtos de coníferas con eucaliptos y los chopos y álamos son las superficies que han visto reducida la amplitud en una mayor superficie, de un 30%.

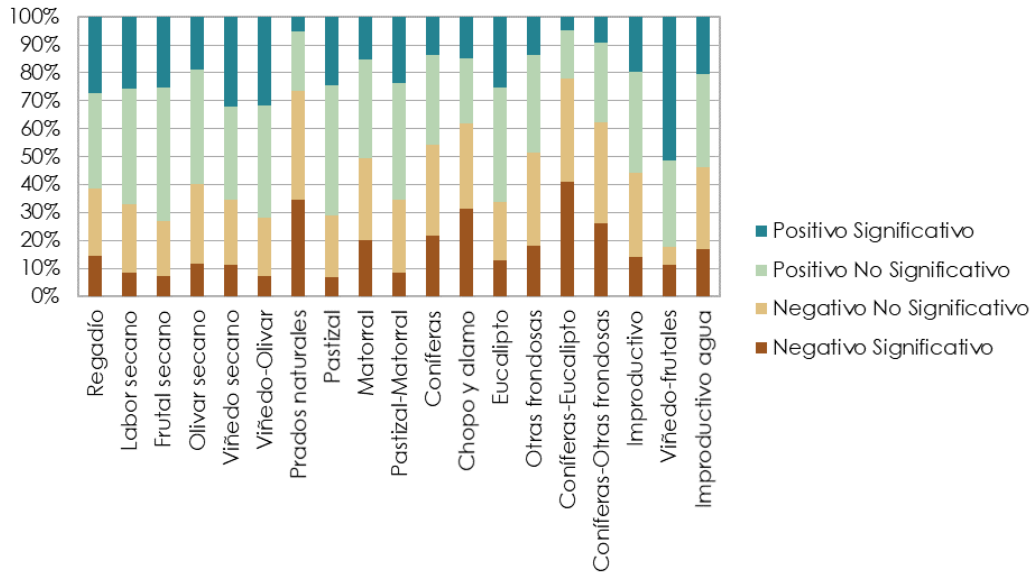


Figura 33. Cambios en la amplitud por uso de suelo.

5.8. Otras variables

En esta sección se comentan los resultados de otras variables fenológicas que presentan una importancia secundaria pero que permiten valorar otros aspectos de la fenología vegetal y que, por consiguiente, se muestran aquí de forma sucinta.

La tasa de disminución del final de la temporada (derivada derecha) (Anexo Figura 1) y la tasa de tasa de crecimiento de inicio de la misma (derivada izquierda) (Anexo Figura 2), muestran diferencias espaciales muy notables con valores promedio más altos en el Pirineo y la cordillera Cantábrica, además de en las regiones más occidentales de España. Por el contrario, los valores promedio son más bajos en la zona este. Los valores en ambas derivadas se ven más pronunciados en las zonas con mayor amplitud (Figura 31). Los datos presentan una alta variabilidad interanual para ambas derivadas, observándose coeficientes de variación muy altos de la derivada derecha en la zona norte de España y de la derivada izquierda casi en la totalidad del país. La magnitud de cambio de las dos derivadas muestra en Galicia y zonas de montaña mediterránea de interior una disminución de la tasa de una centésima y en el oeste de España un aumento de una centésima. Todos los cambios tienden a ser estadísticamente significativos. El análisis por diferentes cubiertas del suelo (Anexo Figuras 3 y 4) muestra promedios son muy similares y de distribución normal en todas, pero son las superficies de pastizales las que presentan tasas promedio más altas (Anexo Figuras 3 y 4, izquierda), y son los prados naturales y las coníferas con eucaliptos las que más han variado (Anexo Figuras 3 y 4,

centro). Estas dos cubiertas son las que presentan una tendencia negativa, tanto su tasa de comienzo como de final de temporada ha disminuido, como también lo han hecho las zonas de ribera (Anexo Figuras 3 y 4, derecha), mientras que en el resto se han mantenido o aumentado. El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos en cada una de las cubiertas del suelo son similares en ambas derivadas (Anexo Figuras 5 y 6), aunque hay más superficie afectada por aumento en la tasa de inicio. En general, el porcentaje de suelo más afectado por el incremento es el viñedo con frutales junto con el viñedo con olivar, frente a estos, los que tienen más superficie en la que ha disminuido las tasas son las choperas y alamedas.

Los análisis de la integral grande (Anexo Figura 7) sigue un patrón similar al valor máximo de la temporada (Figura 28). Presentan una apariencia muy similar porque la integral grande mide el área desde el valor 0 de NDVI hasta el valor máximo y entre las fechas de inicio y fin de temporada. Por esta razón se ven las mismas diferencias espaciales claras entre las zonas del norte y el oeste, que muestran los valores mayores, mientras que las cuencas de los ríos y el este del país presentan los más bajos. En estas últimas hay más variabilidad de los datos que en la parte noreste del país. La magnitud de los cambios presenta en toda España un aumento del área de la integral, siendo estos cambios estadísticamente significativos. El análisis por diferentes cubiertas del suelo muestra, como en el máximo, los valores más altos en los prados naturales y los bosques mixtos de eucaliptos con coníferas (Anexo Figura 8, izquierda). Todas las superficies presentan una variación similar y una tendencia positiva (Anexo Figura 8, central y derecha). El porcentaje de superficie que muestra cambios estadísticamente significativos por cada una de las cubiertas del suelo muestra un aumento de la integral en un 20% de la superficie de todas las coberturas, hallándose el máximo de superficie afectada en las zonas de secano y pastizales en un 40% de su superficie (Figura 9).

Por otra parte, la integral pequeña (Anexo Figura 10) tiene gran similitud con la amplitud (Figura 31). Esto se debe a que esta área se calcula con el nivel base y el máximo, por lo que resalta la diferencia de NDVI de la temporada. Por ese mismo motivo, las áreas con mayor integral pequeña promedio se corresponden también con la mayor amplitud, que son la Cordillera Cantábrica y los Pirineos, así como en la zona oeste del país, mientras que el resto tiene valores muy bajos. La variabilidad es alta en todo el país, excepto en el suroeste. La magnitud de cambio y su significatividad es igual que de la amplitud, en el norte disminuye y en el resto del país aumenta el área. Todas las

superficies presentan el mismo patrón, tanto en la integral pequeña (Anexo Figura 11) como en la amplitud, (Figura 32), respecto al promedio, el coeficiente de variación y las tendencias. De igual forma se ven los mismos cambios significativos en porcentaje de suelos que en la amplitud, siendo un poco menores los porcentajes de superficie afectados por la disminución del área de la integral (Anexo Figura 12).

El valor medio inicial de la temporada (Anexo Figura 13) es prácticamente igual al valor base promedio (Figura 22) y muy similar al valor medio de final de temporada (Anexo Figura 14). Si bien es cierto que el coeficiente de variación es muy bajo en valores iniciales y finales respecto al valor base, la magnitud de cambio y la significatividad es igual o mayor, es decir, en ambas tres aumenta notablemente el NDVI en todo el país excepto en parte de la cuenca del Guadalquivir y la Meseta Sur. Los análisis por diferentes cubiertas del suelo en los valores inicial y final (Anexo Figuras 15 y 16) son prácticamente iguales entre ellas y respecto al análisis del valor base (Figura 23). De igual manera les sucede a las figuras de porcentajes de suelo afectados por cambios significativos (Anexo Figuras 17 y 18 y Figura 24), que en su mayoría presentan más de un 50% de la superficie de todas las coberturas con un aumento significativo de las variables y sin prácticamente ninguna afección por la disminución de esta.

5.9. Cambios significativos de las diferentes variables fenológicas

A continuación, se muestra un resumen de los cambios observados en las diferentes variables fenológicas para el conjunto de España. El porcentaje de superficie con cambios estadísticamente significativos en cada una de las variables no demuestra un claro dominio hacia cambios temporales en el inicio y fin del periodo vegetativo (Figura 34). Sin embargo, sí que se ha producido un dominante aumento significativo de los valores de NDVI (base, máximo, inicio y final de temporada) que ha afectado entre un 60% y un 70% de la superficie de España. Igualmente, la fecha de mitad de temporada se adelanta casi en un 20% de España y la amplitud del NDVI a lo largo de la temporada ha tenido cambios significativos positivos y negativos similares, aunque la amplitud aumenta en un 10 % más de superficie de la que disminuye.

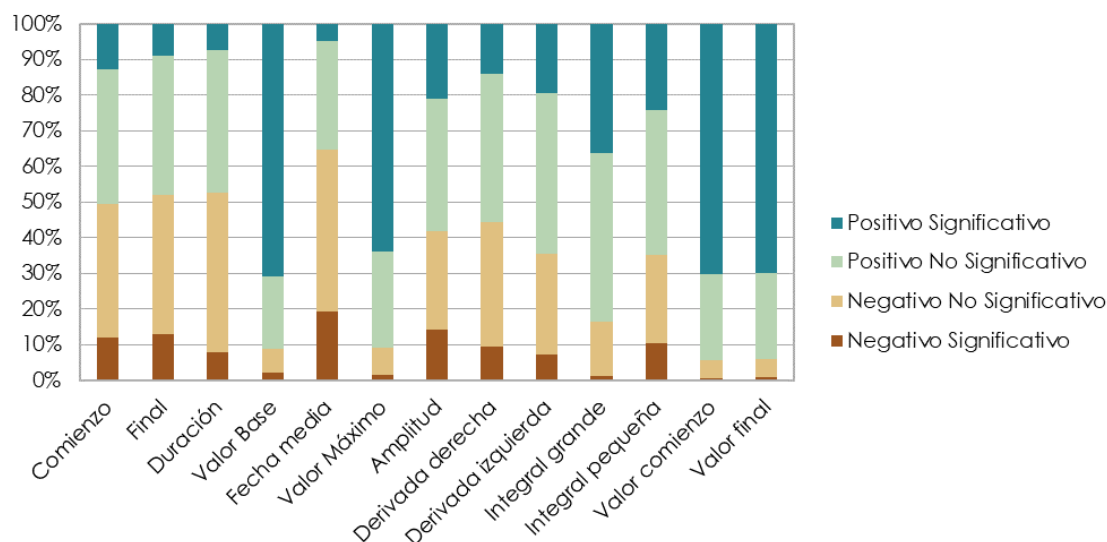


Figura 34. Porcentajes de cambios en la superficie total de España respecto a las 13 variables extraídas de TIMESAT.

6. DISCUSIÓN

En este estudio se ha analizado la fenología vegetal en España (a excepción de las Islas Canarias) desde inicios de la década de 1980 hasta inicios de la década de 2020. El estudio se ha realizado mediante imágenes de satélite de resolución media a partir de una base de datos desarrollada para este fin que fusiona valores de NDVI obtenidos a partir de imágenes NOAA-AVHRR y MODIS. El interés de este tipo de estudios es notable desde un punto de vista ambiental, ya que diferentes estudios a escalas continentales y globales desde la década de 1980 sugieren contables cambios fenológicos en respuesta al cambio climático (Bertín, 2008).

Los estudios previos existentes sobre la fenología en España se han concentrado en localidades concretas del país, especialmente en la región mediterránea (García-Mozo et al., 2010; Gordo y Sanz, 2009; Peñuelas et al., 2002), y aunque existen estudios recientes centrados en la totalidad del territorio peninsular (Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano, 2020; Novillo et al., 2019), éstos se han desarrollado en periodos de tiempo más cortos. Por esta razón, se ha realizado un esfuerzo notable en el desarrollo de una base de datos robusta que permitiera el análisis fenológico en España a partir de una serie de datos quincenales de NDVI desde 1981 hasta 2021, lo que ha permitido un estudio con una amplia perspectiva temporal. El estudio no profundiza a nivel de detalle sino que se centra en aportar los patrones generales de las diferentes variables fenológicas

a nivel nacional que puedan permitir en un futuro analizar en detalle los cambios identificados (por ejemplo, a partir de otros sensores de mayor detalle espacial) y poder determinar el papel de los cambios observados en el clima sobre la fenología vegetal, tal como han apuntado diversos estudios previos (Lunetta et al., 2006; Zhang et al., 2017; Fu et al., 2014; Jeong et al., 2017; Piao et al., 2019).

La metodología de este estudio se ha basado en la herramienta TIMESAT (Eklundh y Jönsson, 2017), que ha permitido el procesamiento de aproximadamente un millón de píxeles para abordar el estudio de la fenología en series de imágenes de satélite de amplia cobertura temporal. En el estudio se ha realizado un esfuerzo para caracterizar la fenología a partir de series de NDVI de la forma más objetiva posible. Este aspecto no es sencillo, ya que los umbrales para definir los periodos de inicio y fin de la temporada vegetativa pueden resultar diversos; por ejemplo, las variaciones en los bosques de coníferas son lentas, pero en pastizales semiáridos son muy rápidas, lo que genera problemas si se quiere captar cambios estacionales en diversos tipos de cubiertas. Ello hace que no haya umbrales universales para definir el comienzo y el final de la temporada (Eklundh y Jönsson, 2015) y por lo tanto se han tenido que definir, a partir del conocimiento empírico de la fenología en diferentes cubiertas del suelo del país, unos umbrales que se consideran satisfactorios y que han permitido a posteriori valorar de forma objetiva la evolución de variables fenológicas de elevado interés ambiental. Una de las limitaciones observadas en la metodología aplicada ha sido la dificultad para abordar el análisis en espacios con una alta variabilidad entre años. Por ello se eliminaron del análisis las superficies con más de 75 días de desviación interanual, lo que excluyó a gran parte de la costa mediterránea del país y parte del sur. Esta aguda inestabilidad podría deberse a los cambios de usos del suelo por la expansión urbana y de infraestructuras turísticas, especialmente en la costa valenciana (Marraccini et al. 2015; Palazón et al., 2016), al aumento de la superficie de regadío, los cambios de decisión en la siembra (Oteros et al. 2015; Stellmes et al., 2013), a la sucesión de incendios forestales (Díaz-Delgado et al., 2002) o a la difícil detección de cambios en bosques de coníferas (siempre verdes) (Eklundh & Jönsson, 2015).

Los resultados principales del análisis fenológico de España destacan que el inicio de la temporada se ha adelantado en amplias zonas de España entre 1 y 2 días por año, es decir, entre 38 y 76 días durante el periodo de estudio. Se trata de unas cifras muy apreciables que sugieren que en España se están produciendo cambios fenológicos muy

notables. Las cubiertas más afectadas por este inicio prematuro son las riberas naturales de los ríos y los cultivos de secano y regadío. Estos resultados son coherentes con los observados en estudios previos como los de Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano (2020) y Oteros et al. (2015), que también detectaron este adelantamiento dominante tanto mediante datos de teledetección como con datos de campo. Estos estudios sugieren que dicho adelanto se relacionaría con el aumento de la temperatura del aire (Oteros et al., 2015). Además, esta tendencia es también coincidente con diversos estudios realizados en Europa (Ahas et al., 2002; Stöckli y Vidal, 2004), Norteamérica (Reed, 2006), Asia (Piao et al., 2006) y en el conjunto del Hemisferio Norte (De Beurs y Henebry, 2005; Jeong, et al., 2011; Zhou et al., 2001). Todos ellos subrayan un adelantamiento precoz desde 1960 del inicio de la temporada tanto con observaciones satelitales como terrestres, pero cuya magnitud difiere según la región de estudio, la escala, el periodo y las especies (Piao et al., 2019).

En el presente trabajo se han encontrado notables diferencias a nivel subregional. Por ejemplo, en las superficies de eucaliptos, coníferas, prados naturales y frondosas hay un cierto retraso en las fechas de inicio de la actividad vegetal, resultados que también concuerdan con los resultados regionales de Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano (2020) y Jato et al. (2002). Este retraso en ciertas regiones y cubiertas podría relacionarse con lo que evidenciaron Jeong et al. (2011), que este avance en el despliegue de las hojas podría haber desacelerado o revertido a partir del año 2000 en el hemisferio norte. También podría deberse a cambios en la temperatura del aire y de la superficie, factor del que dependen las especies vegetales ya que un aumento de la temperatura podría acelerar las fases fenológicas (Lieth, 1974; Cleland et al., 2012). Si bien eso es cierto, según Khorchani et al. (2018) la tendencia de temperatura durante el periodo de estudio en la región eurosiberiana española no ha aumentado notablemente en primavera e incluso en invierno ha disminuido en las últimas décadas, fases cruciales que determinan la latencia y el desarrollo vegetal en las regiones más frías de España (Burroughs, 2002), aspecto que podría explicar el retraso del inicio de la temporada en estas regiones. Por otro lado, el mismo estudio de Khorchani et al. (2018), centrado en los cambios en las temperaturas del suelo en España, sugiere que las mismas zonas que adelantan su inicio de temporada son aquellas que muestran mayores aumentos de temperaturas en otoño.

Los resultados revelan un acuerdo entre los cambios en el inicio y el final de la temporada. En aquellos lugares y coberturas en los que el inicio de la temporada se

adelanta entre 1 y 2 días por año, también lo hace el final de esta un período similar, a excepción de las zonas de ribera en las que el adelantamiento es de más de 2 días al año. Mientras tanto, se observan retrasos en la fecha entre 1 y 2 días las zonas de Galicia y Extremadura, sobre todo las superficies de eucaliptos y bosques de frondosas y mixtos de ambos con coníferas. En general, se han evidenciado tendencias hacia un cierto retraso y adelanto en el fin de la temporada vegetativa, aunque en una magnitud más débil que el cambio de inicio de temporada. En este sentido, y aunque hay una menor cantidad de estudios locales regionales y globales centrados en ello, hay que destacar que la mayor parte de ellos concuerdan en mostrar un retraso dominante en amplias regiones de climas templados (Miao, et al., 2017; Piao et al., 2019), lo que concuerda con el retraso visto en este estudio en la región eurosiberiana española. Por otro lado, el adelantamiento del final de la temporada podría estar asociado con el propio adelantamiento del inicio anteriormente descrito. Similares patrones se observan en la fecha de mitad de temporada, con adelantos entre 1 y 2 días en toda España menos en Galicia, que corresponde con el acortamiento de la estación de crecimiento vegetal que detectaron Oteros et al. (2015).

Algunos resultados regionales y comportamientos diferenciales por cubiertas del suelo presentan un notable interés. Por ejemplo, la alta variabilidad entre las fechas de final e inicio de temporada en zonas de cultivo podría deberse a diversos factores de origen antrópico como el cambio o la rotación de cultivo, cambios de usos del suelo o incluso a decisiones de cambios de fechas de siembra y cosecha (Oteros et al. 2015; Van Oort et al., 2012). Estos cambios fenológicos en las zonas cultivadas pueden tener notables impactos económicos, ya que el avance de las fases fenológicas podría incrementar la exposición de los cultivos a fenómenos meteorológicos extremos (como es el caso de las heladas tardías), modificar la producción, e incluso favorecer el traslado de los cultivos debido a cambios en las áreas tradicionalmente aptas para el cultivo (Chmielewski et al., 2004; Oteros et al., 2015)

Además de los cambios fenológicos destacados más arriba, uno de los resultados más importantes de este estudio es el aumento del NDVI (el valor inicial y final de temporada, el valor máximo y el de base) a lo largo de toda la serie temporal en prácticamente toda España y en todas las cubiertas. La creciente actividad fotosintética concuerda con otros estudios que han utilizado series temporales de imágenes de satélite a escala global y que han documentado un reverdecimiento generalizado en las últimas décadas en respuesta a cambios en el clima (Nemani et al., 2003; Zhu et al., 2013). A

nivel nacional, durante el periodo 1982-1999, Alcaraz-Segura et al. (2010) también registraron tendencias positivas de NDVI, mientras que entre 2001 y 2016 Novillo et al. (2019) observaron una tendencia positiva en toda la península excepto en la región atlántica, donde la tendencia fue negativa (Vicente-Serrano et al., 2020). En el presente trabajo se ha observado un aumento del valor máximo de NDVI en el 70% de España, siendo prácticamente irrelevantes los descensos del valor del índice. Los factores detrás de este cambio pueden ser de diversa índole, entre los cuales se encontrarían el aumento generalizado de la temperatura (que favorece la fotosíntesis y actividad vegetal (Lieth, 1974)) y los cambios en la gestión del territorio caracterizados por la intensificación de algunas zonas (p.ej mediante la generación de regadíos) (Stellmes et al., 2013) y la extensificación de otras (p.ej debido al abandono de actividades económicas tradicionales como la agricultura de montaña y el pastoreo) (Batllori y Gutiérrez, 2008). Si bien esto es cierto, pequeñas zonas en el sur de España y el centro han mostrado un descenso de los valores de NDVI. Muchas de ellas se corresponden con áreas de secano, donde la disponibilidad de agua tiene mayor impacto en el NDVI que la temperatura. Así lo corroboran distintos estudios que muestran que a pesar del aumento notable de la temperatura en la Península Ibérica (del Río et al., 2012; del Río et al., 2011; Khorchani et al., 2018) también lo han hecho las sequías, asociadas en mayor parte a la disminución de la precipitación y al aumento de la demanda evaporativa del aire, lo que implica una fuerte afección de la aridez en la región (Vicente-Serrano et al., 2017). Estos pequeños parches también se corresponden con algunas con áreas cercanas a grandes ciudades que han disminuido el valor del índice por la expansión urbana (Marraccini et al., 2015).

Por último, los resultados obtenidos en el estudio han mostrado dos comportamientos distintos entre las fenofases de la región biogeográfica mediterránea, que comienza la temporada durante la época de lluvias (otoño) y la finaliza en época más cálida; y la eurosiberiana y las regiones montañosas mediterráneas interiores, que presentan un comportamiento similar puesto que inician su temporada a finales del invierno y la terminan al final del otoño. Si bien la variabilidad en algunas fenométricas parece tener una distribución biogeográfica, existe una variabilidad interna derivada del comportamiento de las distintas coberturas, por ejemplo, pudiendo existir en la misma región cubiertas con adelanto y retraso de las fechas de comienzo y final de temporada. Esto se ha visto en distintos estudios desarrollado tanto a nivel nacional (Caparros-

Santiago y Rodríguez-Galiano, 2020; Novillo et al, 2019) como europeo (Menzel et al., 2006).

Este trabajo, centrado en la descripción de las características fenológicas y los cambios observados en las últimas décadas, constituye una primera etapa que abre nuevas e interesantes líneas de investigación futuras. Los resultados aquí mostrados pueden ser el inicio de otros estudios que traten de explicar tanto la variabilidad como los cambios fenológicos observados a partir de la relación de las fenométricas con los cambios en la gestión del territorio y en el clima observados en España, tanto a nivel nacional como regional.

7. CONCLUSIONES

El estudio de la fenología y sus cambios a lo largo del tiempo es importante para detectar posibles alteraciones en la actividad vegetal a causa del cambio global, ya que pueden tener importantes consecuencias tanto a nivel ecológico como económico. Dentro de este contexto, el uso de herramientas de teledetección como las imágenes de satélite, con gran capacidad para detectar la vegetación y estudiar la variabilidad en su actividad, se presenta como una alternativa eficaz a los estudios de campo. A su vez, el desarrollo de nuevas aplicaciones que simplifican el cálculo de variables fenológicas facilita la realización de estudios a distintas escalas espacio-temporales.

En este estudio se ha empleado una base de datos que fusiona valores de NDVI obtenidos a partir de imágenes NOAA-AVHRR y MODIS; base de datos que ha sido generada específicamente para este estudio y que cubre la mayoría del territorio español. Empleando esta base de datos se ha analizado la variación de trece variables fenológicas a lo largo de cuatro décadas. Se ha observado una tendencia general en toda España hacia el reverdecimiento, indicado por un aumento del valor de NDVI en todas las etapas fenológicas. Por otro lado, se observaron importantes diferencias entre regiones dentro del área de estudio respecto al inicio y el final de la temporada de actividad vegetal. Las zonas del norte, en especial Galicia, así como aquellas cubiertas por bosques mixtos de eucalipto con coníferas han retrasado significativamente sus fechas de inicio y final de temporada a lo largo del periodo de estudio. Por otro lado, en la España mediterránea y en especial en las riberas fluviales y aquellas zonas dominadas por cultivos de secano se

ha observado un significativo adelantamiento del inicio y el final de la temporada fenológica.

Los resultados de este estudio suponen un punto de referencia importante para futuros estudios fenológicos basados en teledetección, tanto por la resolución espacial y temporal empleadas como por los análisis realizados, que permiten observar los cambios en la fenología de la vegetación a lo largo del tiempo y el espacio. Este tipo de estudios contribuyen a profundizar en el conocimiento de las interacciones entre el clima y los ecosistemas a través del estudio de las fenométricas, conocimiento que se presenta fundamental para entender los efectos del cambio global.

8. BIBLIOGRAFÍA

Ahas, R., Aasa, A., Menzel, A., Fedotova, V. G., & Scheifinger, H. (2002). Changes in European spring phenology. *International Journal of Climatology*, 22(14), 1727-1738. <https://doi.org/10.1002/joc.818>

Alcaraz, F. (2017). The Arid Southeast. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 13, pp. 249-274). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54867-8_5

Alcaraz-Segura, D., Liras, E., Tabik, S., Paruelo, J., & Cabello, J. (2010). Evaluating the Consistency of the 1982–1999 NDVI Trends in the Iberian Peninsula across Four Time-series Derived from the AVHRR Sensor: LTDR, GIMMS, FASIR, and PAL-II. *Sensors*, 10(2), 1291-1314. <https://doi.org/10.3390/s100201291>

Amigo, J., Rodríguez-Gutián, M. A., Pradinho Honrado, J. J., et Alves, P. (2017). The Lowlands and Midlands of Northwestern Atlantic Iberia. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 191-250). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_6

Amorós-López, J., Gómez-Chova, L., Alonso, L., Guanter, L., Zurita-Milla, R., Moreno, J., & Camps-Valls, G. (2013). Multitemporal fusion of Landsat/TM and ENVISAT/MERIS for crop monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.12.004>

Aznar, R., Sánchez, J.C., Rodríguez, J.M., Ramos, D., Rodríguez, E., Jordà, G. & Álvarez, E. (2012). Caracterización del clima presente y futuro de las aguas de la Península Ibérica y el mar Mediterráneo. *Asociación Española de Climatología*. Serie A, 8. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8253>

Badeck, F., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J., & Sitch, S. (2004). Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 162(2), 295-309. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x>

Batllori, E., & Gutiérrez, E. (2008). Regional tree line dynamics in response to global change in the Pyrenees. *Journal of Ecology*, 96(6), 1275-1288. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01429.x>

Bertin, R. I. (2008). Plant Phenology And Distribution In Relation To Recent Climate Change. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 135(1), 126-146. <https://doi.org/10.3159/07-RP-035R.1>

Burroughs, W. J. (2002). Gardening and climate change. *Weather*, 57(5), 151-157. <https://doi.org/10.1002/wea.6080570503>

Caparros-Santiago, J. A., & Rodríguez-Galiano, V. F. (2020). Estimación de la fenología de la vegetación a partir de imágenes de satélite: El caso de la península ibérica e islas Baleares (2001-2017). *Revista de Teledetección*, 57, 25. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13632>

Chmielewski, F.-M., Müller, A., & Bruns, E. (2004). Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 69-78. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00161-8)

Cleland, E. E., Allen, J. M., Crimmins, T. M., Dunne, J. A., Pau, S., Travers, S. E., Zavaleta, E. S., & Wolkovich, E. M. (2012). Phenological tracking enables positive species responses to climate change. *Ecology*, 93(8), 1765-1771. <https://doi.org/10.1890/11-1912.1>

Cleland, E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H., & Schwartz, M. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7), 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>

De Beurs, K. M., & Henebry, G. M. (2005). Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere-Biosphere Program high-latitude transects. *Global Change Biology*, 11(5), 779-790. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00949.x>

del Río, S., Cano-Ortiz, A., Herrero, L., & Penas, A. (2012). Recent trends in mean maximum and minimum air temperatures over Spain (1961–2006). *Theoretical and Applied Climatology*, 109(3-4), 605-626. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0593-2>

del Río, S., Herrero, L., Pinto-Gomes, C., & Penas, A. (2011). Spatial analysis of mean temperature trends in Spain over the period 1961–2006. *Global and Planetary Change*, 78(1-2), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.05.012>

Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X., & Terradas, J. (2002). Satellite evidence of decreasing resilience in mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology*, 83(8), 2293-2303. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2293:SEODRI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2293:SEODRI]2.0.CO;2)

Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. (2019). *España en mapas. Una síntesis geográfica* (2.^a ed.). Centro Nacional de Información Geográfica (Ministerio de Fomento). <https://doi.org/10.7419/162.06.2018>

Eklundh, L., & Jönsson, P. (2015). TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics. En C. Kuenzer, S. Dech, & W. Wagner (Eds.), *Remote Sensing Time Series* (Vol. 22, pp. 141-158). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6_7

Eklundh, L., & Jönsson, P. (2017). TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing Software Manual. Sweden: Lund and Malmö University.

Espírito-Santo, D., Capelo, J., Neto, C., Pinto-Gomes, C., Ribeiro, S., Quinto Canas, R., et Costa, J. C. (2017). Lusitania. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 13, pp. 35-82). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54867-8_2

Fernandes, R., & G. Leblanc, S. (2005). Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil–Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 303-316. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.005>

Fernández-González, F., Crespo, G., Rojo, J., et Pérez-Badia, R. (2017). La Mancha. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 13, pp. 83-142). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54867-8_3

Fischer, M. L., Billesbach, D. P., Berry, J. A., Riley, W. J., & Torn, M. S. (2007). Spatiotemporal Variations in Growing Season Exchanges of CO₂, H₂O, and Sensible Heat in Agricultural Fields of the Southern Great Plains. *Earth Interactions*, 11(17), 1-21. <https://doi.org/10.1175/EI231.1>

Fisher, J., Mustard, J., & Vadeboncoeur, M. (2006). Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 100(2), 265-279. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.022>

Fu, Y. H., Piao, S., Op de Beeck, M., Cong, N., Zhao, H., Zhang, Y., Menzel, A., & Janssens, I. A. (2014). Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations: Multiscale observation of spring phenology. *Global Ecology and Biogeography*, 23(11), 1255-1263. <https://doi.org/10.1111/geb.12210>

García-Mozo, H., Mestre, A., & Galán, C. (2010). Phenological trends in southern Spain: A response to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 575-580. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.023>

Ge, Q., Wang, H., Rutishauser, T., & Dai, J. (2015). Phenological response to climate change in China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 21(1), 265-274. <https://doi.org/10.1111/gcb.12648>

Gill, A. L., Gallinat, A. S., Sanders-DeMott, R., Rigden, A. J., Short Gianotti, D. J., Mantooth, J. A., & Templer, P. H. (2015). Changes in autumn senescence in northern hemisphere deciduous trees: A meta-analysis of autumn phenology studies. *Annals of Botany*, 116(6), 875-888. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv055>

Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>

Gómez, C., Alejandro, P., & Montes, F. (2020). Phenological characterization of *Fagus sylvatica* L. in Mediterranean populations of the Spanish Central Range with Landsat OLI/ETM+ and Sentinel-2A/B. *Revista de Teledetección*, 55, 71. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13561>

Gordo, O., & Sanz, J. J. (2009). Long-term temporal changes of plant phenology in the Western Mediterranean. *Global Change Biology*, 15(8), 1930-1948. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01851.x>

Güçlü, Y. S. (2018). Multiple Şen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test. *Journal of Hydrology*, 566, 685-704. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.034>

Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2014). Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis* (1.^a ed., pp. 1217-1308). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.028>

Jato, V., Rodríguez-Rajo, F., Méndez, J. et al. (2002). Phenological behaviour of *Quercus* in Ourense (NW Spain) and its relationship with the atmospheric pollen season. *International Journal of Biometeorology*, 46(4), 176-184. <https://doi.org/10.1007/s00484-002-0132-4>

Jeong, S.-J., Ho, C.-H., Gim, H.-J., & Brown, M. E. (2011). Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008: PHENOLOGY SHIFTS AT START VS. END OF GROWING SEASON. *Global Change Biology*, 17(7), 2385-2399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x>

Jeong, S.-J., Schimel, D., Frankenberg, C., Drewry, D. T., Fisher, J. B., Verma, M., Berry, J. A., Lee, J.-E., & Joiner, J. (2017). Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology

and function over northern high latitude forests. *Remote Sensing of Environment*, 190, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.021>

Jönsson, P., & Eklundh, L. (2002). Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1824-1832. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802519>

Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>

Karkauskaite, P., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2017). Evaluation of the Plant Phenology Index (PPI), NDVI and EVI for Start-of-Season Trend Analysis of the Northern Hemisphere Boreal Zone. *Remote Sensing*, 9(5), 485. <https://doi.org/10.3390/rs9050485>

Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.

Kharouba, H. M., Ehrlén, J., Gelman, A., Bolmgren, K., Allen, J. M., Travers, S. E., & Wolkovich, E. M. (2018). Global shifts in the phenological synchrony of species interactions over recent decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(20), 5211-5216. <https://doi.org/10.1073/pnas.1714511115>

Khorchani, M., Vicente-Serrano, S. M., Azorin-Molina, C., Garcia, M., Martin-Hernandez, N., Peña-Gallardo, M., El Kenawy, A., & Domínguez-Castro, F. (2018). Trends in LST over the peninsular Spain as derived from the AVHRR imagery data. *Global and Planetary Change*, 166, 75-93. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.04.006>

Kim, J. H., Hwang, T., Yang, Y., Schaaf, C. L., Boose, E., & Munger, J. W. (2018). Warming-Induced Earlier Greenup Leads to Reduced Stream Discharge in a Temperate Mixed Forest Catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(6), 1960-1975. <https://doi.org/10.1029/2018JG004438>

Kim, S.-R., Prasad, A. K., El-Askary, H., Lee, W.-K., Kwak, D.-A., Lee, S.-H., & Kafatos, M. (2014). Application of the Savitzky-Golay Filter to Land Cover

Classification Using Temporal MODIS Vegetation Indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(7), 675-685. <https://doi.org/10.14358/PERS.80.7.675>

Kudo, G., & Ida, T. Y. (2013). Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators. *Ecology*, 94(10), 2311-2320. <https://doi.org/10.1890/12-2003.1>

Lieth, H. (1974). Purposes of a Phenology Book. En H. Lieth (Ed.), *Phenology and Seasonality Modeling* (Vol. 8, pp. 3-19). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8_1

Lim, P. O., Kim, H. J., & Gil Nam, H. (2007). Leaf Senescence. *Annual Review of Plant Biology*, 58(1), 115-136. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105316>

Liu, Q., Fu, Y. H., Zeng, Z., Huang, M., Li, X., & Piao, S. (2016). Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 22(2), 644-655. <https://doi.org/10.1111/gcb.13081>

Llorens, L., & Gil, L. (2017). The Balearic Islands. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 13, pp. 3-33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54867-8_1

Loidi, J. (2017a). Introduction to the Iberian Peninsula, General Features: Geography, Geology, Name, Brief History, Land Use and Conservation. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 3-27). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_1

Loidi, J. (2017b). The Ebro Basin. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 513-547). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_12

Loranty, M. M., Berner, L. T., Goetz, S. J., Jin, Y., & Randerson, J. T. (2014). Vegetation controls on northern high latitude snow-albedo feedback: Observations and CMIP5 model simulations. *Global Change Biology*, 20(2), 594-606. <https://doi.org/10.1111/gcb.12391>

Lunetta, R. S., Knight, J. F., Ediriwickrema, J., Lyon, J. G., & Worthy, L. D. (2006). Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 105(2), 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.018>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MAPA (1992). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos 1980-1990. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Gobierno de España. https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/publicaciones/agricultura/mac_1980_1990.aspx

Marraccini, E., Debolini, M., Moulery, M., Abrantes, P., Bouchier, A., Chéry, J.-P., Sanz Sanz, E., Sabbatini, T., & Napoleone, C. (2015). Common features and different trajectories of land cover changes in six Western Mediterranean urban regions. *Applied Geography*, 62, 347-356. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.004>

Martínez, B., & Gilabert, M. A. (2009). Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1823-1842. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.016>

Matesanz, S., Escudero, A., & Valladares, F. (2009). Impact of three global change drivers on a Mediterranean shrub. *Ecology*, 90(9), 2609-2621. <https://doi.org/10.1890/08-1558.1>

Menzel, A. (2002). Phenology: its importance to the global change community. *Climatic Change*, 54(4), 379-385. <https://doi.org/10.1023/A:1016125215496>

Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jateczak, K., Måge, F., ... Zust, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern: EUROPEAN PHENOLOGICAL RESPONSE TO CLIMATE CHANGE. *Global Change Biology*, 12(10), 1969-1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>

Miao, L., Müller, D., Cui, X., & Ma, M. (2017). Changes in vegetation phenology on the Mongolian Plateau and their climatic determinants. *PLOS ONE*, *12*(12), e0190313. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190313>

MITECO. (s.f.). Fenología y cambio climático en la Red Española de Reservas de Biosfera. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/red-espanola-reservas-biosfera/fenologia-cambio-climatico-reservas-biosfera.aspx>

Molero, J., & Marfil, J. M. (2017). Betic and Southwest Andalusia. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 13, pp. 143-247). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54867-8_4

Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H., & Tsuchida, S. (2010). Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. *Remote Sensing*, *2*(10), 2369-2387. <https://doi.org/10.3390/rs2102369>

Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R. B., & Running, S. W. (2003). Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, *300*(5625), 1560-1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>

Ninot, J. M., Carrillo, E., et Ferré, A. (2017). The Pyrenees. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 323-366). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_8

Novillo, C., Arrogante-Funes, P., & Romero-Calcerrada, R. (2019). Recent NDVI Trends in Mainland Spain: Land-Cover and Phytoclimatic-Type Implications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(1), 43. <https://doi.org/10.3390/ijgi8010043>

Oteros, J., García-Mozo, H., Botey, R., Mestre, A., & Galán, C. (2015). Variations in cereal crop phenology in Spain over the last twenty-six years (1986–2012). *Climatic Change*, *130*(4), 545-558. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1363-9>

Palazón, A., Aragonés, L., & López, I. (2016). Evaluation of coastal management: Study case in the province of Alicante, Spain. *Science of The Total Environment*, *572*, 1184-1194. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.032>

Pastor, F., Valiente, J. A., & Khodayar, S. (2020). A Warming Mediterranean: 38 Years of Increasing Sea Surface Temperature. *Remote Sensing*, 12(17), 2687. <https://doi.org/10.3390/rs12172687>

Peinado, M., Aguirre, J.L., Aparicio, A. (2017). The Iberian Ranges and Highlands. In: Loidi, J. (eds) *The Vegetation of the Iberian Peninsula*. Plant and Vegetation, vol 12. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_11

Penas, Á., del Río, S., Herrero, L., et Ladero, M. (2017). The Duero Basin. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 395-437). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_10

Peng, H., Wang, S., & Wang, X. (2008). Consistency and asymptotic distribution of the Theil–Sen estimator. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 138(6), 1836-1850. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2007.06.036>

Peñuelas, J., Filella, I., & Comas, P. (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region: PHENOLOGICAL EFFECTS OF CLIMATE WARMING. *Global Change Biology*, 8(6), 531-544. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00489.x>

Peñuelas, J., Rutishauser, T., & Filella, I. (2009). Phenology Feedbacks on Climate Change. *Science*, 324(5929), 887-888. <https://doi.org/10.1126/science.1173004>

Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Ciais, P., & Zhu, B. (2006). Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation: SATELLITE-DERIVED PHENOLOGY IN CHINA. *Global Change Biology*, 12(4), 672-685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01123.x>

Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., & Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6), 1922-1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>

Prieto, P., Penuelas, J., Ogaya, R., & Estiarte, M. (2008). Precipitation-dependent Flowering of *Globularia alypum* and *Erica multiflora* in Mediterranean Shrubland Under

Experimental Drought and Warming, and its Inter-annual Variability. *Annals of Botany*, 102(2), 275-285. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn090>

Prislan, P., Gričar, J., Čufar, K., de Luis, M., Merela, M., & Rossi, S. (2019). Growing season and radial growth predicted for *Fagus sylvatica* under climate change. *Climatic Change*, 153(1-2), 181-197. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02374-0>

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Rathcke, B., & Lacey, E. P. (1985). Phenological Patterns of Terrestrial Plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 16(1), 179-214. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.16.110185.001143>

Reed, B. C. (2006). Trend Analysis of Time-Series Phenology of North America Derived from Satellite Data. *GIScience & Remote Sensing*, 43(1), 24-38. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.43.1.24>

Reed, B. C., Schwartz, M. D., & Xiao, X. (2009). Remote Sensing Phenology. En A. Noormets (Ed.), *Phenology of Ecosystem Processes* (pp. 231-246). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0026-5_10

Richardson, A. D., Keenan, T. F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., & Toomey, M. (2013). Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 156-173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>

Rivas-Martínez, S., Penas, Á., Díaz González, T. E., Cantó, P., del Río, S., Costa, J. C., Herrero, L., & Molero, J. (2017). Biogeographic Units of the Iberian Peninsula and Balearic Islands to District Level. A Concise Synopsis. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 131-188). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_5

Rodriguez-Galiano, V. F., Dash, J., & Atkinson, P. M. (2015). Intercomparison of satellite sensor land surface phenology and ground phenology in Europe: Inter-annual comparison and modelling. *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2253-2260. <https://doi.org/10.1002/2015GL063586>

Rossi, S., Morin, H., Deslauriers, A., & Plourde, P.-Y. (2011). Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming: XYLEM PHENOLOGY UNDER CLIMATE WARMING. *Global Change Biology*, 17(1), 614-625. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02191.x>

Royé, D. (2015). El uso de bases de datos climáticos netCDF con estructura matricial en el entorno de R. En *SÉMATA. Ciencias Sociais e Humanidades* (Vol. 27, pp. 11-37). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5734511>

Rubio-Cuadrado, Á., Camarero, J. J., Rodríguez-Calcerrada, J., Perea, R., Gómez, C., Montes, F., & Gil, L. (2021). Impact of successive spring frosts on leaf phenology and radial growth in three deciduous tree species with contrasting climate requirements in central Spain. *Tree Physiology*, 41(12), 2279-2292. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab076>

Rustom, J., Espinoza, A., Fernández, L., & Mansilla, M. (2012). Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia: una visión conceptual y aplicada. *Universidad de Chile*. <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1569>

Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N., & Ohno, H. (2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4), 366-374. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.008>

Sánchez-Mata, D., Gavilán, R. G., et de la Fuente, V. (2017). The Sistema Central (Central Range). En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 549-588). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_13

Soriano, P., & Costa, M. (2017). The Coastal Levantine Area. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (Vol. 12, pp. 589-625). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_14

Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040. <https://doi.org/10.1002/joc.4267>

Stéfanon, M., Drobinski, P., D'Andrea, F., & de Noblet-Ducoudré, N. (2012). Effects of interactive vegetation phenology on the 2003 summer heat waves: EFFECTS OF PHENOLOGY ON HEAT WAVES. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D24), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2012JD018187>

Stellmes, M., Röder, A., Udelhoven, T., & Hill, J. (2013). Mapping syndromes of land change in Spain with remote sensing time series, demographic and climatic data. *Land Use Policy*, 30(1), 685-702. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.05.007>

Stöckli, R., & Vidale, P. L. (2004). European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 25(17), 3303-3330. <https://doi.org/10.1080/01431160310001618149>

Van Oort, P. A. J., Timmermans, B. G. H., & van Swaaij, A. C. P. M. (2012). Why farmers' sowing dates hardly change when temperature rises. *European Journal of Agronomy*, 40, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.005>

Verger, A., Filella, I., Baret, F., & Peñuelas, J. (2016). Vegetation baseline phenology from kilometric global LAI satellite products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.057>

Vicente-Serrano, S. M., Martín-Hernández, N., Reig, F., Azorin-Molina, C., Zabalza, J., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., El Kenawy, A., Peña-Gallardo, M., Noguera, I., & García, M. (2020). Vegetation greening in Spain detected from long term data (1981–2015). *International Journal of Remote Sensing*, 41(5), 1709-1740. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1674460>

Vicente-Serrano, S. M., Rodríguez-Camino, E., Domínguez-Castro, F., El Kenawy, A., & Azorín-Molina, C. (2017). An updated review on recent trends in observational surface atmospheric variables and their extremes over Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43(1), 209-232. <https://doi.org/10.18172/cig.3134>

Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2), 318-332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)

Vrieling, A., Meroni, M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Wang, T., Zurita-Milla, R., Oosterbeek, K., O'Connor, B., & Paganini, M. (2018). Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, 215, 517-529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.014>

White, K., Pontius, J., & Schaberg, P. (2014). Remote sensing of spring phenology in northeastern forests: A comparison of methods, field metrics and sources of uncertainty. *Remote Sensing of Environment*, 148, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.017>

White, M. A., De Beurs, K. M., Didan, K., Inouye, D. W., Richardson, A. D., Jensen, O. P., O'Keefe, J., Zhang, G., Nemani, R. R., Van Leeuwen, W. J. D., Brown, J. F., De Wit, A., Schaepman, M., Lin, X., Dettinger, M., Bailey, A. S., Kimball, J., Schwartz, M. D., Baldocchi, D. D., ... Lauenroth, W. K. (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, 15(10), 2335-2359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>

Willmott, C. J. (1981). ON THE VALIDATION OF MODELS. *Physical Geography*, 2(2), 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>

Wolfe, D. W., Schwartz, M. D., Lakso, A. N., Otsuki, Y., Pool, R. M., & Shaulis, N. J. (2005). Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *International Journal of Biometeorology*, 49(5), 303-309. <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0248-9>

Yang, L. H., & Rudolf, V. H. W. (2010). Phenology, ontogeny and the effects of climate change on the timing of species interactions. *Ecology Letters*, 13(1), 1-10. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01402.x>

Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C., & Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471-475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)

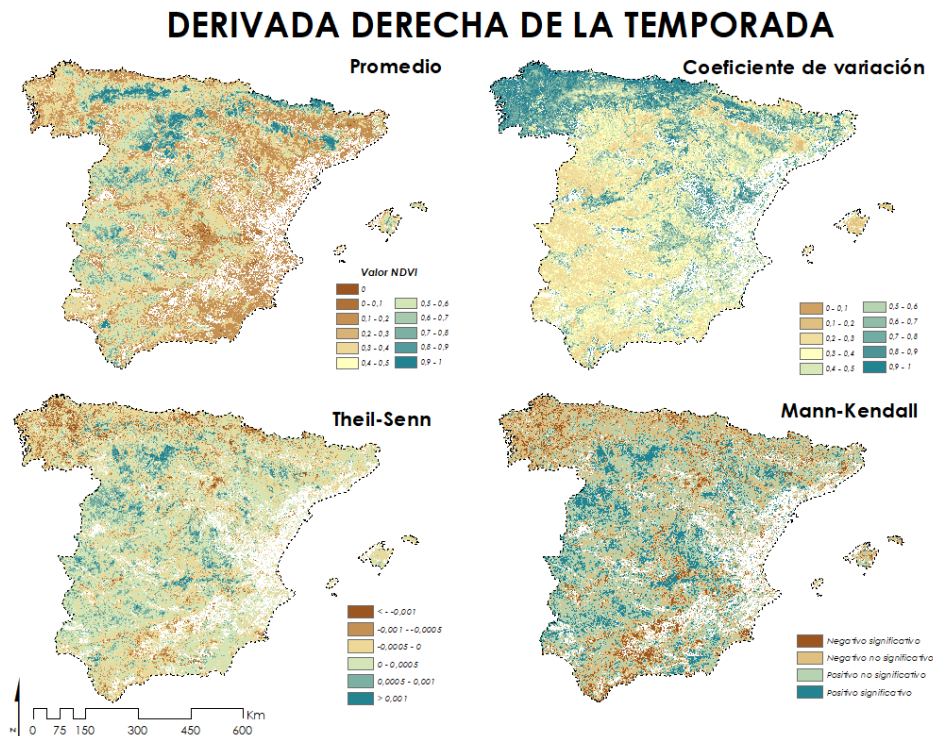
Zhang, X., Wang, J., Gao, F., Liu, Y., Schaaf, C., Friedl, M., Yu, Y., Jayavelu, S., Gray, J., Liu, L., Yan, D., & Henebry, G. M. (2017). Exploration of scaling effects on

coarse resolution land surface phenology. *Remote Sensing of Environment*, 190, 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.001>

Zhou, L., Tucker, C. J., Kaufmann, R. K., Slayback, D., Shabanov, N. V., & Myneni, R. B. (2001). Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17), 20069-20083. <https://doi.org/10.1029/2000JD000115>

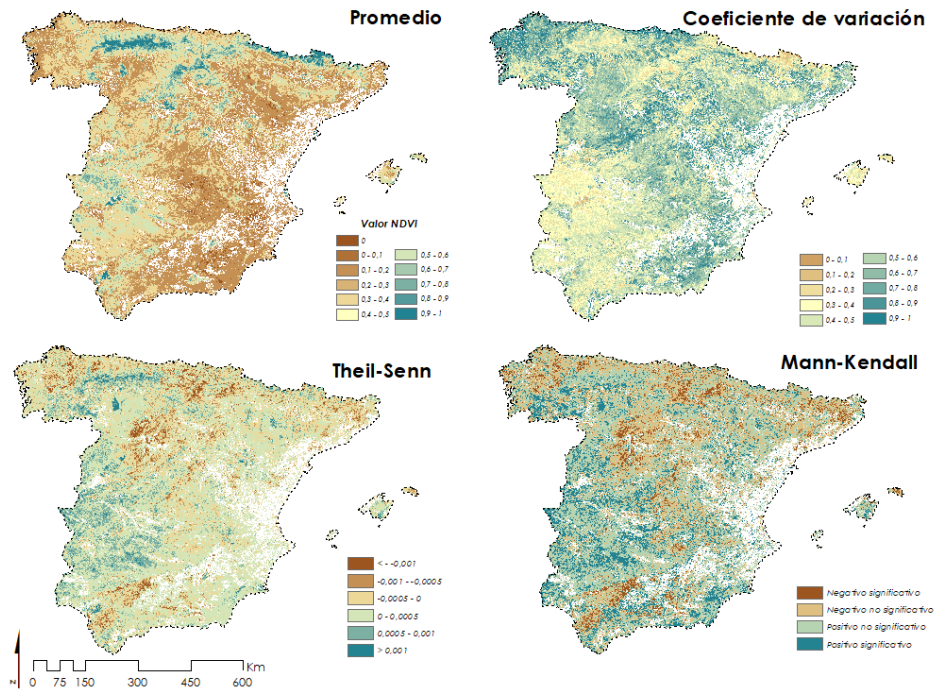
Zhu, Z., Bi, J., Pan, Y., Ganguly, S., Anav, A., Xu, L., Samanta, A., Piao, S., Nemani, R., & Myneni, R. (2013). Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the Period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 5(2), 927-948. <https://doi.org/10.3390/rs5020927>

ANEXO

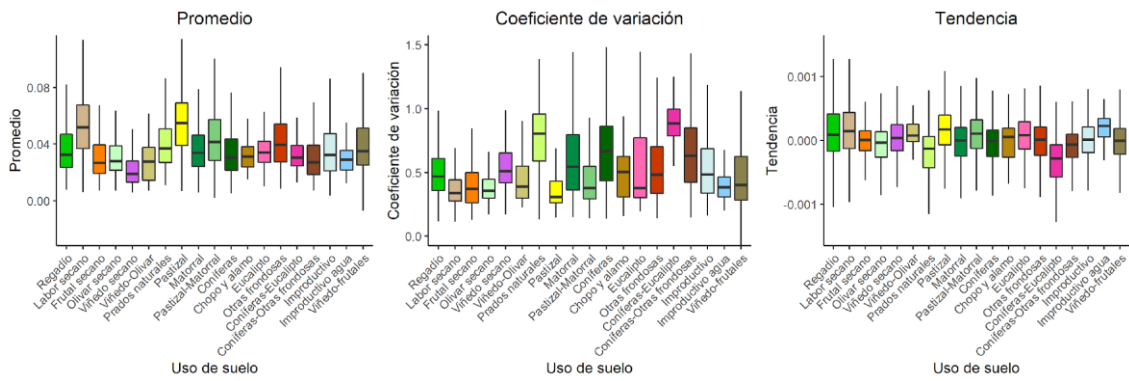


Anexo Figura 1. Mapas de las estadísticas para la derivada derecha de la temporada.

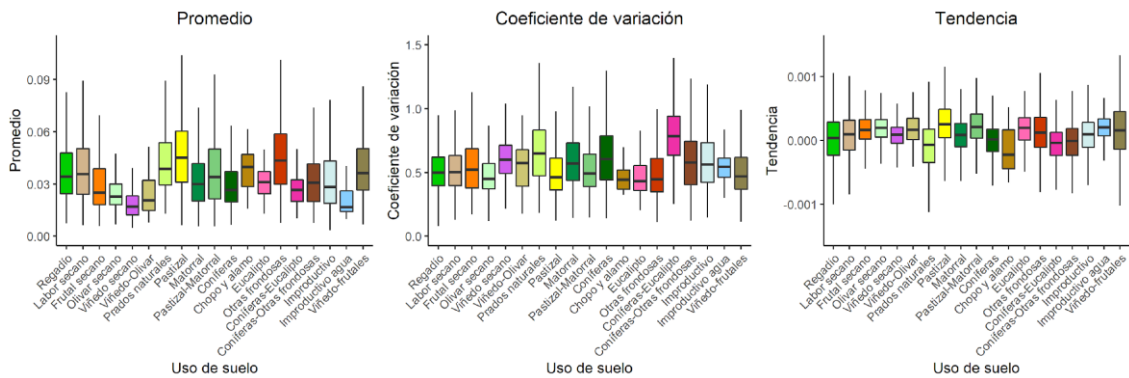
DERIVADA IZQUIERDA DE LA TEMPORADA



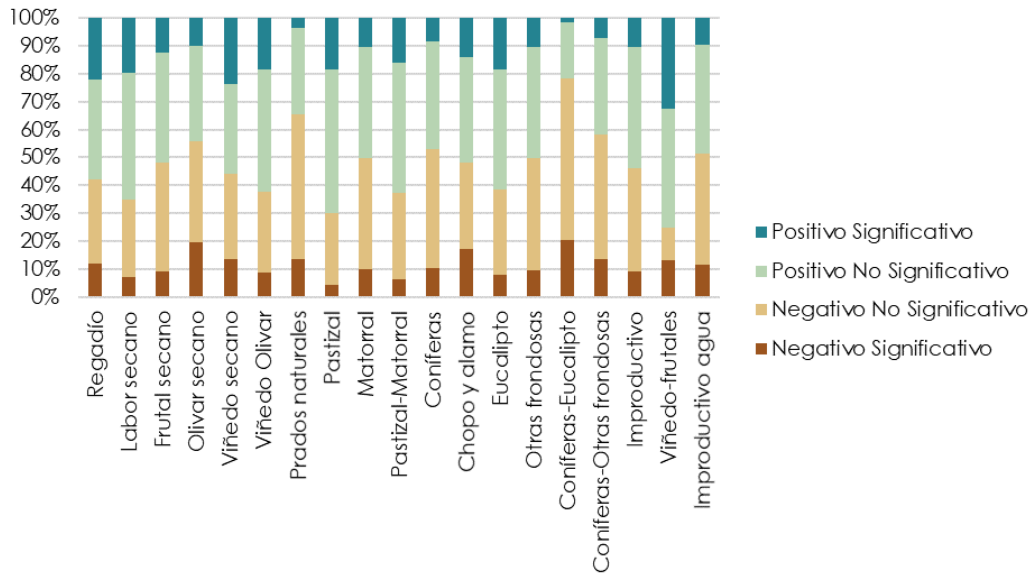
Anexo Figura 2. Mapas de las estadísticas para la derivada izquierda de la temporada.



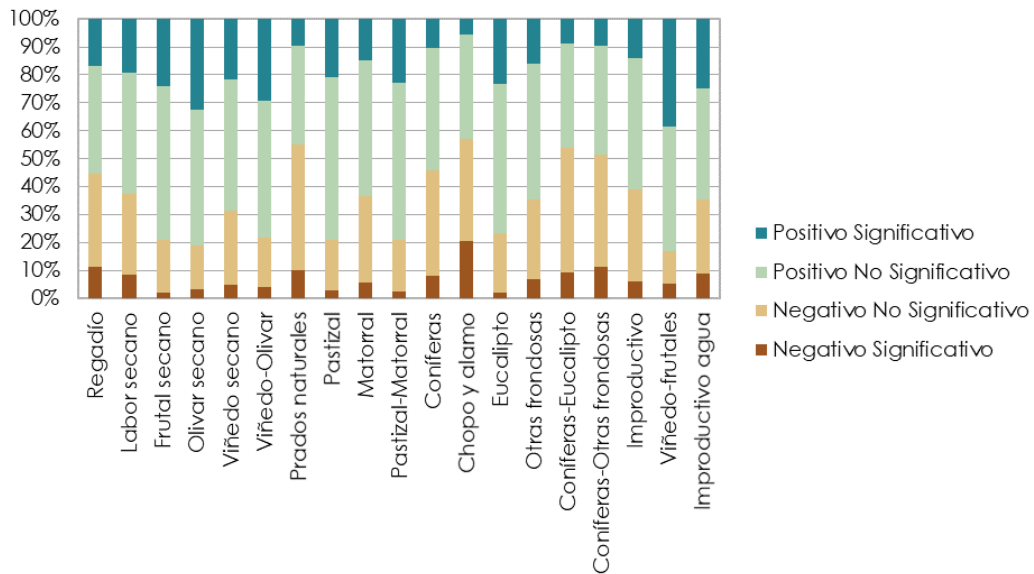
Anexo Figura 3. Estadísticas de la derivada derecha de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.



Anexo Figura 4. Estadísticas de la derivada izquierda de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.

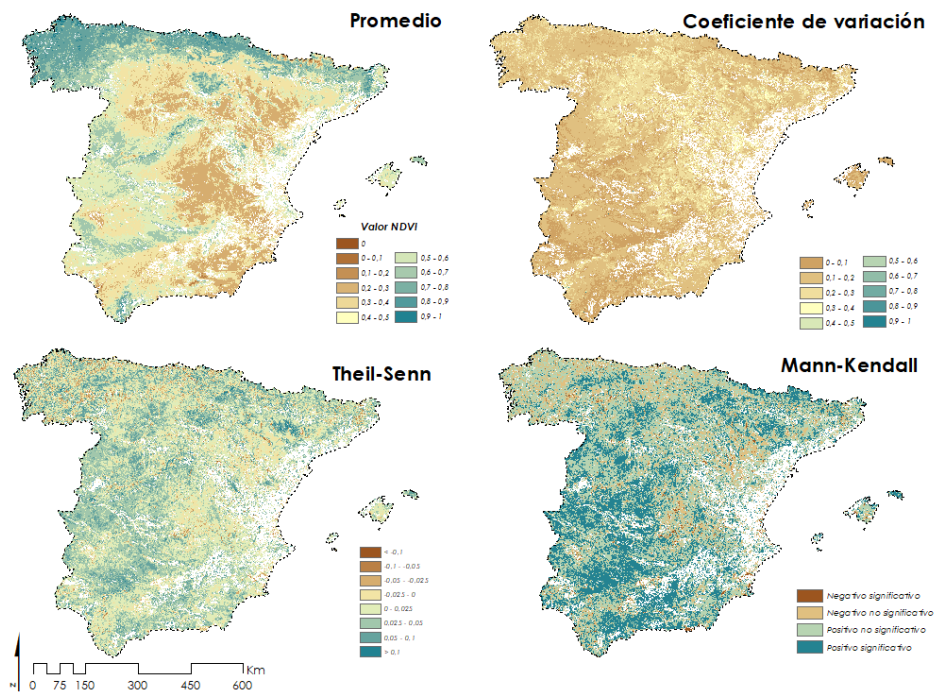


Anexo Figura 5. Cambios en la derivada derecha por uso de suelo.

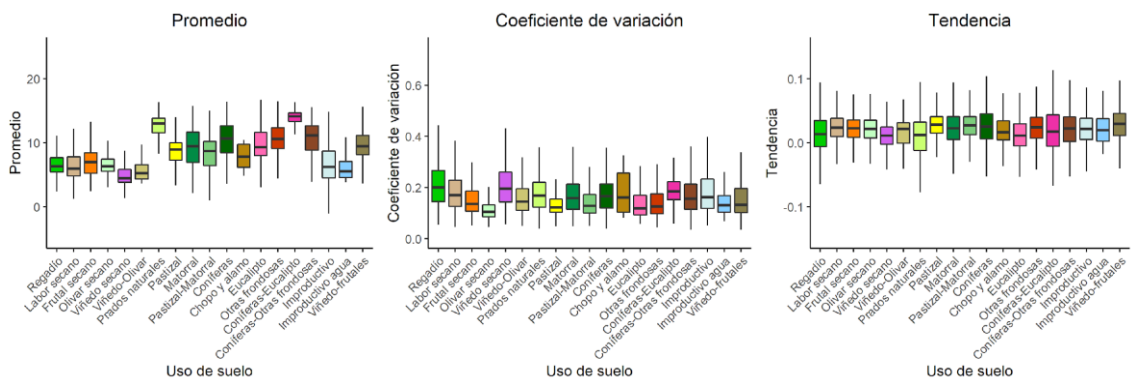


Anexo Figura 6. Cambios en la derivada izquierda por uso de suelo.

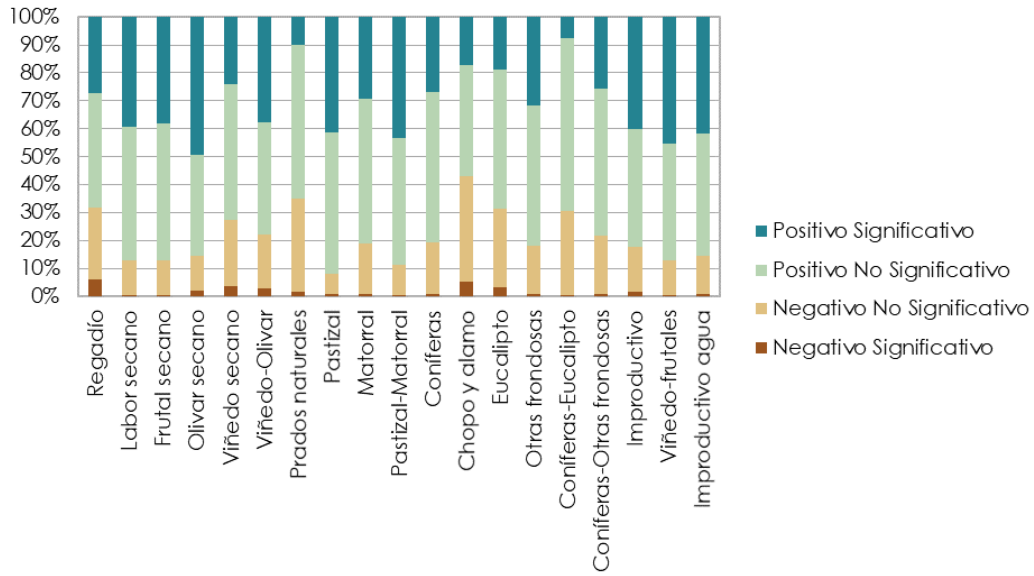
INTEGRAL GRANDE DE LA TEMPORADA



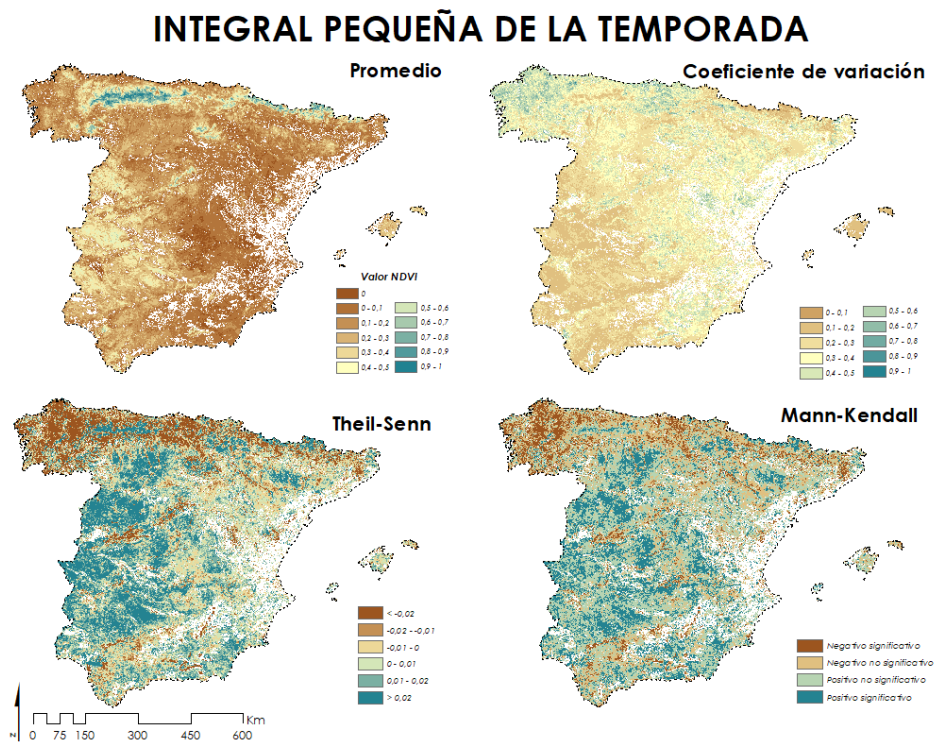
Anexo Figura 7. Mapas de las estadísticas para la integral grande de la temporada.



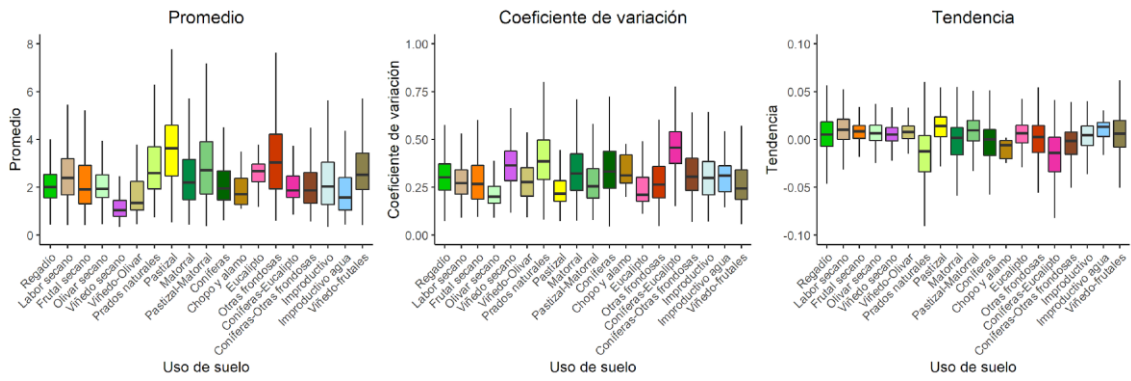
Anexo Figura 8. Estadísticas de la integral grande de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.



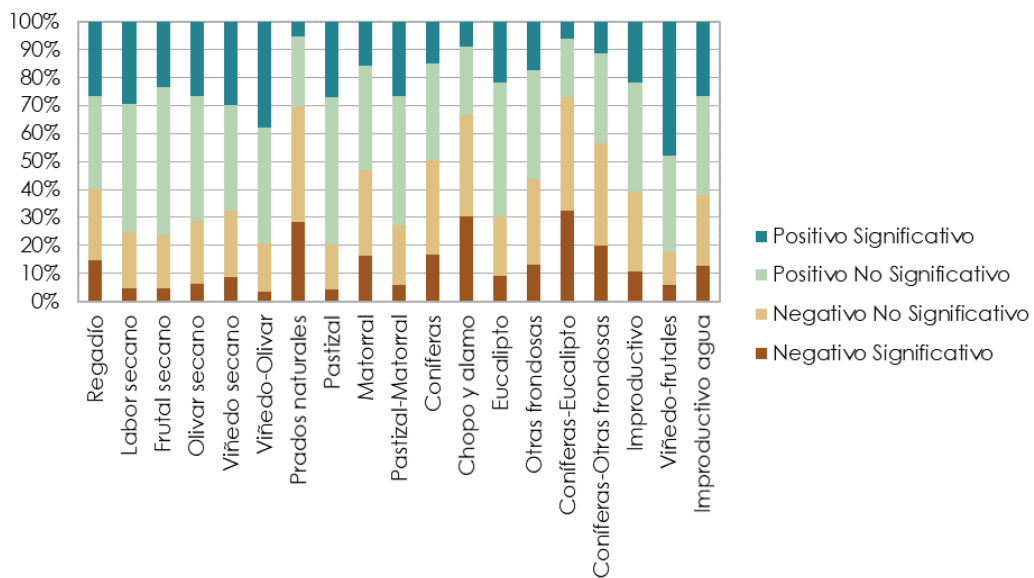
Anexo Figura 9. Cambios en la integral grande por uso de suelo.



Anexo Figura 10. Mapas de las estadísticas para la integral pequeña de la temporada.

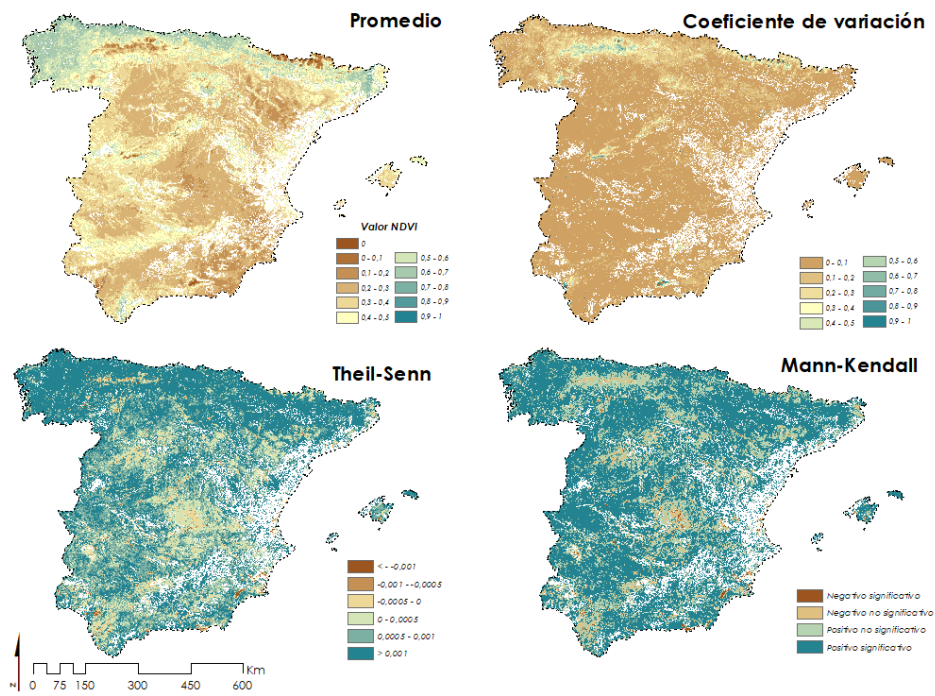


Anexo Figura 11. Estadísticas de la integral pequeña de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.



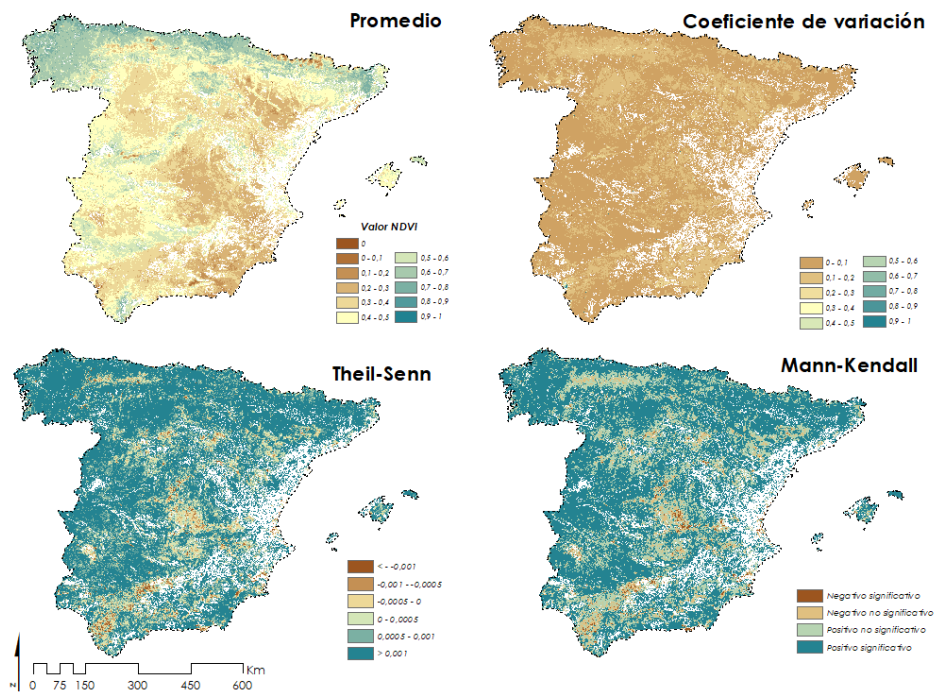
Anexo Figura 12. Cambios en la integral pequeña por uso de suelo.

VALOR INICIAL DE LA TEMPORADA

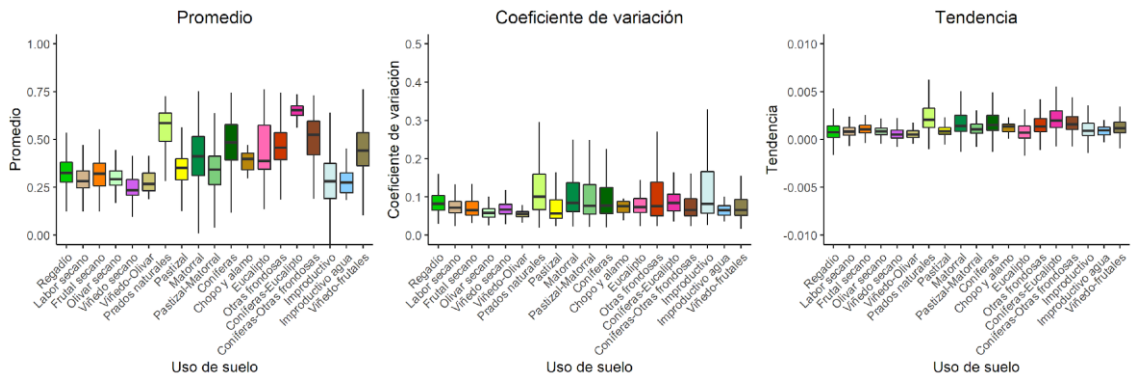


Anexo Figura 13. Mapas de las estadísticas para el valor inicial de la temporada.

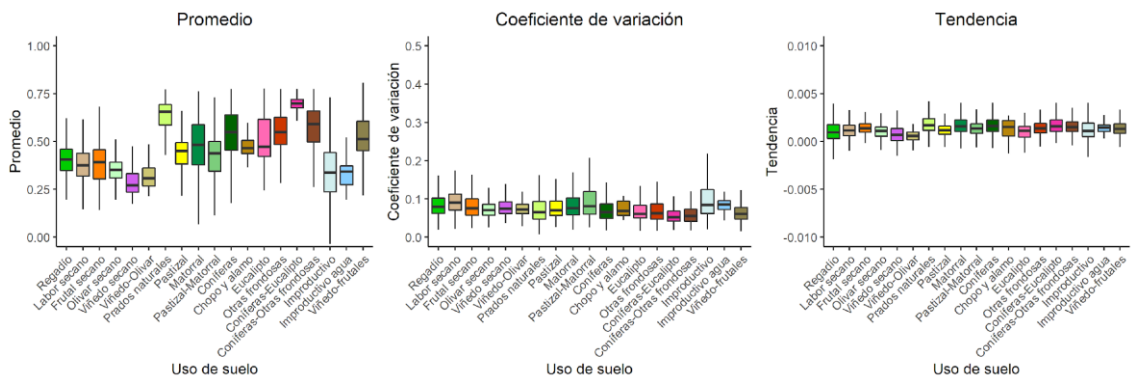
VALOR FINAL DE LA TEMPORADA



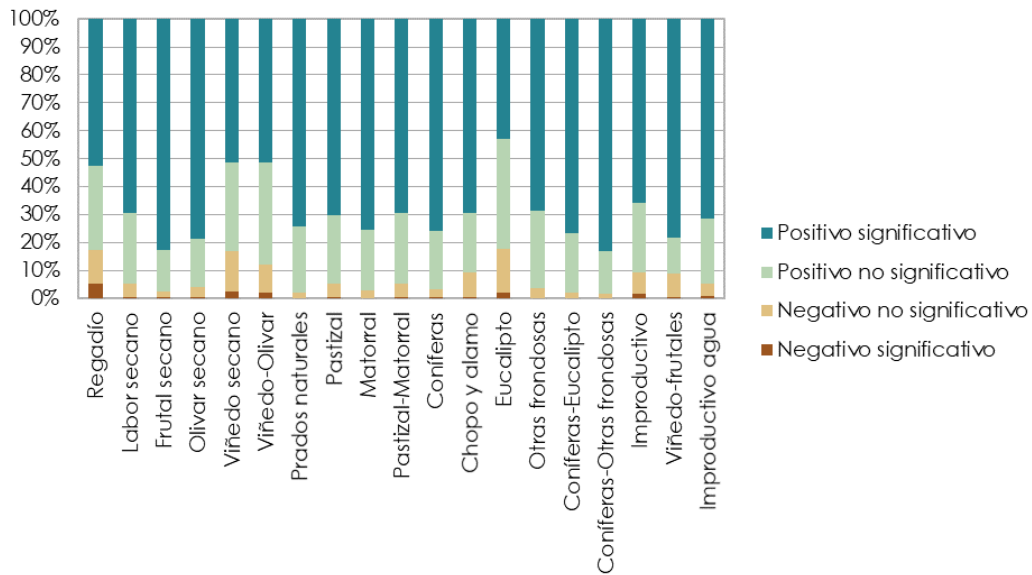
Anexo Figura 14. Mapas de las estadísticas para el valor final de la temporada.



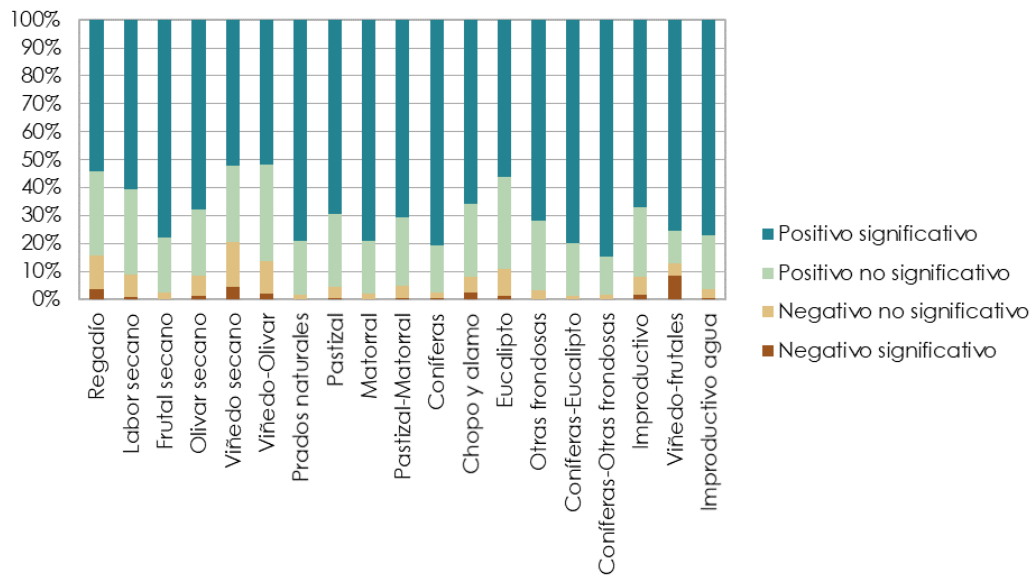
Anexo Figura 15. Estadísticas del valor de comienzo de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.



Anexo Figura 16. Estadísticas del valor de final de temporada a lo largo de la serie según los distintos tipos de cobertura.



Anexo Figura 17. Cambios en el valor de comienzo de temporada por uso de suelo.



Anexo Figura 18. Cambios en el valor de final de temporada por uso de suelo