

Estimación de la fenología de la vegetación a partir de imágenes de satélite: el caso de la península ibérica e islas Baleares (2001-2017)

Caparros-Santiago, J.A. , Rodríguez-Galiano, V.F. 

Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, Calle Doña María de Padilla s/n 41004, Sevilla, España.

Resumen: La dinámica fenológica de la vegetación es considerada un importante indicador biológico para comprender el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. La fenología de la superficie terrestre (*Land Surface phenology*; LSP), el estudio de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de índices de vegetación (IV), ha proporcionado una visión integral de la dinámica de los ecosistemas. La península ibérica es una de las regiones con mayor diversidad de ecosistemas del continente europeo. Constituye, por lo tanto, una excelente área de estudio para la monitorización de la dinámica fenológica de la vegetación. El objetivo de este estudio es analizar la variabilidad espacial de la fenología de la vegetación de la península ibérica e islas Baleares para el periodo 2001-2017. Las series temporales de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) fueron generadas a partir del producto de reflectancia de superficie MOD09Q1 a una resolución espacial de 250 metros y con un periodo de compuesto de 8 días. Las perturbaciones atmosféricas y el ruido de las series temporales fueron atenuadas aplicando el algoritmo de suavizado de Savitzky-Golay. Las diferentes métricas fenológicas o fenométricas fueron extraídas usando un método basado en umbrales. Los resultados pusieron de manifiesto la existencia de un comportamiento diferenciado entre las fenofases de primavera y otoño en las regiones biogeográficas atlántica y mediterránea. Las zonas montañosas mediterráneas presentaron un comportamiento fenológico similar a la vegetación atlántica. La variabilidad interna de cada región biogeográfica también puede asociarse al diferente comportamiento entre cubiertas del suelo (e.g. vegetación natural vs. cultivos).

Palabras clave: primavera, otoño, estacionalidad, MODIS, series temporales.

Vegetation phenology from satellite imagery: the case of the Iberian Peninsula and Balearic Islands (2001-2017)

Abstract: Phenological dynamics of vegetation is considered as an important biological indicator for understanding the functioning of terrestrial ecosystems. Land surface phenology (LSP), the study of vegetation phenology from time series of vegetation indices (IV), has provided a comprehensive overview of ecosystem dynamics. Iberian Peninsula is one of the regions with the greatest diversity of ecosystems in European continent. It is therefore an excellent study area for monitoring phenological dynamics of vegetation. The aim of this study is to analyse the spatial variability of the phenology of the vegetation of the Iberian Peninsula and Balearic Islands for the period 2001-2017. NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) time series were generated from the surface reflectance product MOD09Q1 at a spatial resolution of 250 meters and with a composite period of 8 days.

To cite this article: Caparros-Santiago, J.A., Rodríguez-Galiano, V.F. 2020. Vegetation phenology from satellite imagery: the case of the Iberian Peninsula and Balearic Islands (2001-2017). *Revista de Teledetección*, 57, 25-36. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13632>

* Corresponding author: jacaparros@us.es

Atmospheric disturbances and noise were reduced using a Savitzky-Golay smoothing filter. Different phenological metrics or phenometrics were extracted using a threshold-based method. Results showed the existence of a different behaviour between spring and autumn phenophases in the Atlantic and Mediterranean biogeographic regions. The Mediterranean mountainous areas showed a similar phenological behaviour to the Atlantic vegetation. Biogeographic regions showed an internal variability, which may be derived from the different behaviour of land covers (e.g., natural vegetation vs. crops).

Key words: spring, autumn, seasonality, MODIS, time series.

1. Introducción

La fenología de la vegetación, definida como el estudio de la dinámica de los fenómenos biológicos estacionales que ocurren durante el ciclo vital de las plantas (i. e. fenofases), ha adquirido especial interés en las últimas décadas debido a su conexión con las variaciones en las condiciones climáticas (Piao et al., 2019; Rodríguez-Galiano et al., 2016). Los cambios en los patrones fenológicos pueden influir sobre diferentes procesos ecológicos, tales como el ciclo del agua, el ciclo del carbono, los flujos de energía o la interacción entre especies, y, por lo tanto, alterar el funcionamiento de los ecosistemas (Keenan et al., 2014; Menzel, 2002; Richardson et al., 2013). La variabilidad fenológica también puede tener importantes consecuencias sobre la agricultura, la silvicultura e incluso la salud humana (Peñuelas y Filella, 2001).

Tradicionalmente, la monitorización de la dinámica de las distintas fenofases ha sido realizada mediante observaciones directas en el campo a nivel de planta individual (Ahas et al., 2002; Menzel, 2000; Rodríguez-Galiano et al., 2015b). Esta información fenológica se caracteriza por su alta cobertura temporal, existiendo registros desde principios del siglo XX (Schaber y Badeck, 2005), pero tiene una distribución geográfica muy acotada a unos pocos países. Países como China, Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, Alemania o Austria poseen importantes redes de observación (Chen y Yang, 2020). Sin embargo, este tipo de registros fenológicos son escasos o inexistentes en múltiples regiones del planeta (Adole et al., 2016).

Desde la década de 1980, numerosos estudios han monitorizado el comportamiento de la vegetación a partir de datos derivados de teledetección satelital, aprovechando la capacidad de los programas de teledetección para proporcionar información temporalmente continua y sistemática

de la actividad fotosintética de las plantas a escala global (Garonna et al., 2016; Rodríguez-Galiano et al., 2015a; Verger et al., 2016). Esta aproximación, más reciente, ha sido denominada como “fenología de la superficie terrestre” (*Land Surface Phenology*, LSP), y se define como el estudio de la dinámica fenológica a partir de series temporales de índices de vegetación (IV) obtenidos a partir de sensores remotos (Figura 1) (de Beurs y Henebry, 2005). El aporte de LSP no es tanto la longitud de sus series temporales, pese a que el programa NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) proporciona información satelital desde julio de 1981, sino la caracterización del comportamiento estacional de la vegetación de los ecosistemas terrestres a nivel global (Helman, 2018).

Los estudios de LSP han estado basados en observaciones de satélite proporcionadas principalmente por los instrumentos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) y AVHRR a una resolución espacial media y grosera (entre 250 metros y 8 kilómetros) (Aragones et al., 2019; Ivits et al., 2013; Vrieling et al., 2013). Aunque estos sensores proporcionan datos casi diariamente, la mayoría de los estudios utilizan compuestos de imágenes de satélite, es decir, composiciones de imágenes de satélite en los que un valor determinado de cada píxel (e.g. máximo) es considerado el más representativo del período temporal de referencia (Holben, 1986). Esto permite, por un lado, reducir posibles efectos de la atmósfera (e.g. cobertura nubosa) y, por otro lado, optimizar los procesos computacionales al reducir el volumen de datos. Las métricas fenológicas derivadas de datos de satélite (e.g. inicio, final o duración de la estación de crecimiento), también conocidas como fenométricas, son estimadas a partir de IV, que permiten cuantificar la biomasa, el vigor vegetal y la dinámica del crecimiento de las plantas a

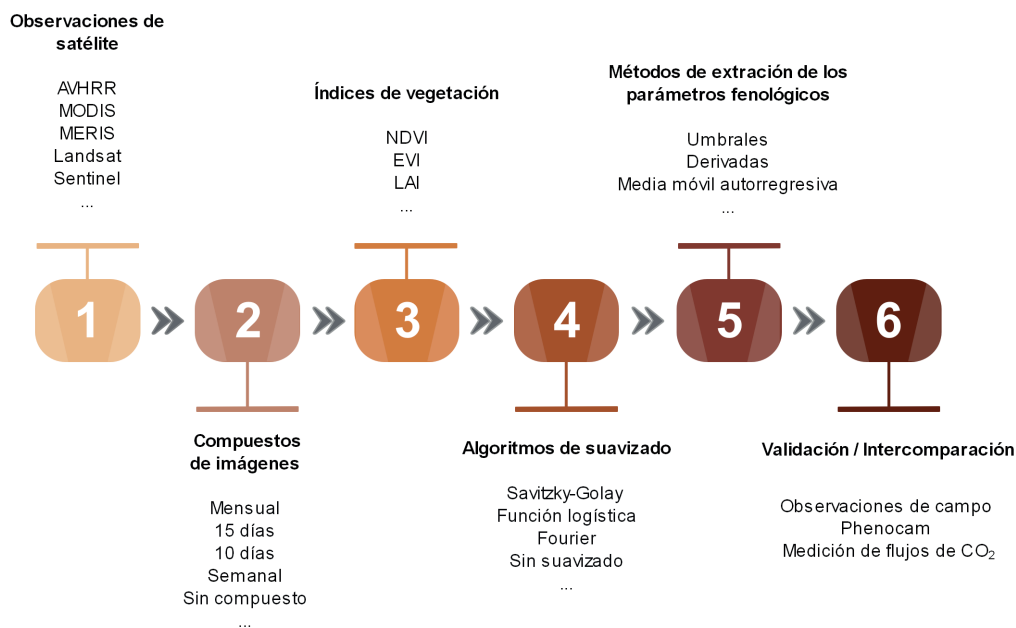


Figura 1. Esquema de los procesos involucrados en la estimación de LSP. LSP es estimada a partir de la información proporcionada por diferentes sensores satelitales (1). Generalmente suelen usarse composiciones temporales de las imágenes de satélite (2) para calcular los IV (3). Las posibles alteraciones de la señal satelital suelen ser reducidas a partir de la aplicación de algoritmos de suavizado (4) y, posteriormente, diferentes métodos son utilizados para extraer las fenométricas: umbrales, derivadas y/o medias móviles autorregresivas (5). Esta información fenológica suele ser comparada con datos fenológicos derivados de observaciones de campo, cámaras digitales fijas o torres de flujo de CO₂.

través de una combinación de valores espectrales de distintas bandas del espectro electromagnético (Huete et al., 2002). Los IV o parámetros biofísicos más usados han sido el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) o LAI (*Leaf Area Index*), entre otros (Atzberger et al., 2013; Julien y Sobrino, 2009; Pastor-Guzman et al., 2018; Verger et al., 2016; Zhang et al., 2003).

La señal fenológica de los IV puede verse influenciada por diferentes factores: a) la mezcla de señales de diferentes especies vegetales y de cubiertas no vegetales (e.g. suelo desnudo, elementos urbanos, cuerpos de agua); b) las condiciones atmosféricas (e.g. cobertura de nubes, efectos de aerosoles atmosféricos o influencia del vapor de agua) o; c) las perturbaciones de los sensores (Chen et al., 2018; Hird y McDermid, 2009). La atenuación del ruido en las series temporales ha sido abordada mediante la aplicación de múltiples técnicas de suavizado, tales como el filtro de Savitzky-Golay, la doble función logística, la función asimétrica gaussiana o la transformada de Fourier, entre otras (Jönsson y Eklundh, 2002;

Julien y Sobrino, 2009; Rodríguez-Galiano et al., 2016; Tong et al., 2019). A partir de las series suavizadas, las fenométricas pueden ser extraídas mediante aproximaciones diferentes, tales como métodos basados en umbrales, derivadas o medias móviles autorregresivas (Aragones et al., 2019; Ivits et al., 2013; Pastor-Guzman et al., 2018; Rodríguez-Galiano et al., 2015a; Vrieling et al., 2018). Algunos estudios complementaron sus estimaciones de LSP con información derivada de observaciones fenológicas directas en el campo (Rodríguez-Galiano et al., 2015b; Sobrino et al., 2013), mediciones de flujos de carbono (Gonsamo et al., 2012) o información derivada de cámaras digitales fijas situadas en estaciones de observación (i. e. phenocam) (Klosterman et al., 2014).

La península ibérica, una de las regiones europeas más vulnerables a los efectos del cambio climático (EEA, 2017), es un área de estudio de elevado interés por su gran diversidad de ecosistemas, consecuencia de su variabilidad climática, edáfica y orográfica. Por lo tanto, es un excelente laboratorio natural para la monitorización de la dinámica de LSP como indicador de cambios ambientales.

En estudios previos como el llevado a cabo por Peñuelas et al. (2004) se analizó el comportamiento fenológico de la vegetación en 2001 para toda la península a partir de series temporales de NDVI de MODIS (1 kilómetro de resolución espacial y compuestos de 16 días). Ramos et al. (2015) y Rodrigues et al. (2013) analizaron la dinámica fenológica de la vegetación a diferentes resoluciones espaciales (250 metros y 1 kilómetro, respectivamente), aunque se centraron en pequeños sectores del territorio peninsular.

El objetivo principal de este estudio es caracterizar espacialmente la LSP de la península ibérica e islas Baleares utilizando series temporales de NDVI-MODIS para el periodo 2001-2017 a una resolución espacial de 250 metros. Los objetivos específicos son: i) detectar patrones espaciales de LSP en el territorio peninsular y archipiélago balear a una resolución espacial media; ii) analizar la dinámica de LSP entre regiones biogeográficas diferenciando entre áreas de vegetación natural y de cultivos y iii) determinar la variabilidad latitudinal y los efectos de la altitud en el comportamiento de LSP.

2. Material y métodos

2.1. Datos

En esta investigación se utilizaron cuatro fuentes de datos: i) series temporales del producto de MOD09Q1 derivado del sensor MODIS (Vermote, 2015); ii) la base cartográfica de la clasificación de las regiones biogeográficas de la península ibérica e islas Baleares (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/biogeographical-regions-europe-3>); iii) el producto global MCD12Q1 de MODIS de tipologías de cubiertas del suelo (Friedl et al., 2010) y iv) el modelo digital de elevaciones derivado de la STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Farr et al., 2007).

LSP se extrajo a partir de la serie temporal de 17 años (2001-2017) del producto de reflectancia de superficie MOD09Q1 (Vermote, 2015). Este producto de MODIS está basado en compuestos de imágenes satelitales de 8 días a una resolución espacial de 250 metros. Las teselas (*tiles*) “h17v04”, “h18v04”, “h17v05” y “h18v05”, con una dimensión de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ cada una, fueron obtenidas del NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) EOSDIS (*Earth Observing System Data and Information System*) LP DAAC (*Land*

Processes Distributed Active Archive Center) (<https://lpdaac.usgs.gov/>). Estas cuatro teselas fueron mosaicadas y reproyectadas desde una proyección sinusoidal a un sistema de coordenadas geográficas con *datum* WGS84 (*World Geodetic System 1984*) usando *MODIS Reprojection Tool*. El mosaico reproyectado se enmascaró incluyendo únicamente el territorio peninsular e islas Baleares. Posteriormente se consideró la banda de evaluación de calidad del producto MOD09Q1 en cada píxel, seleccionando aquellos píxeles que cumplieran una serie de criterios (e.g. corrección atmosférica, corrección del efecto de adyacencia). Posteriormente, se generaron series temporales de NDVI para el periodo comprendido entre enero de 2001 y diciembre de 2017 (782 compuestos de imágenes satelitales). Este IV se caracteriza por la sencillez de su cálculo, basado en la relación entre las bandas roja e infrarroja cercana, que permite el estudio de la variabilidad estacional de la actividad fotosintética de la vegetación, minimizando algunos tipos de ruido que podrían ser encontrados en distintas bandas espectrales del espectro electromagnético (e.g. sombras de la topografía y/o de las nubes) (Huete et al., 2002).

La cartografía de la clasificación de las regiones biogeográficas europeas, cuya delimitación está basada en la Directiva Hábitats (92/43/CEE) y el Convenio relativo a la conservación de la vida silvestre y del medio natural de Europa (Convenio de Berna), se utilizó para estratificar el paisaje peninsular y balear (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/biogeographical-regions-europe-3>). Esta base cartográfica identifica tres regiones biogeográficas para toda el área de estudio: i) la región biogeográfica alpina; ii) la región biogeográfica atlántica y iii) la región biogeográfica mediterránea.

La información de cubiertas del suelo del periodo 2001-2017 se utilizó para establecer una diferenciación entre las áreas de vegetación natural y de cultivos. Estos datos derivaron de la clasificación de cubiertas del suelo propuesta por el IGBP (*International Geosphere Biosphere Programme*) en el producto MCD12Q1, que está basado en imágenes MODIS a una resolución espacial 500 metros (Friedl et al., 2010).

Los datos altimétricos se obtuvieron a partir de las imágenes del modelo digital de elevaciones proporcionado por la STRM de la NASA, que fueron

adquiridas a una resolución espacial de aproximadamente 90 metros (Farr et al., 2007).

2.2. Estimación de LSP

El software TIMESAT 3.3 (Jönsson y Eklundh, 2004) fue utilizado para: i) el suavizado de los datos y, ii) la extracción de las fenométricas. El ruido de las series temporales de NDVI fue reducido a partir de un filtro de suavizado Savitzky-Golay, que está basado en un modelo de ajuste de la serie temporal a partir de funciones polinómicas locales (Savitzky y Golay, 1964). La Figura 2 muestra el

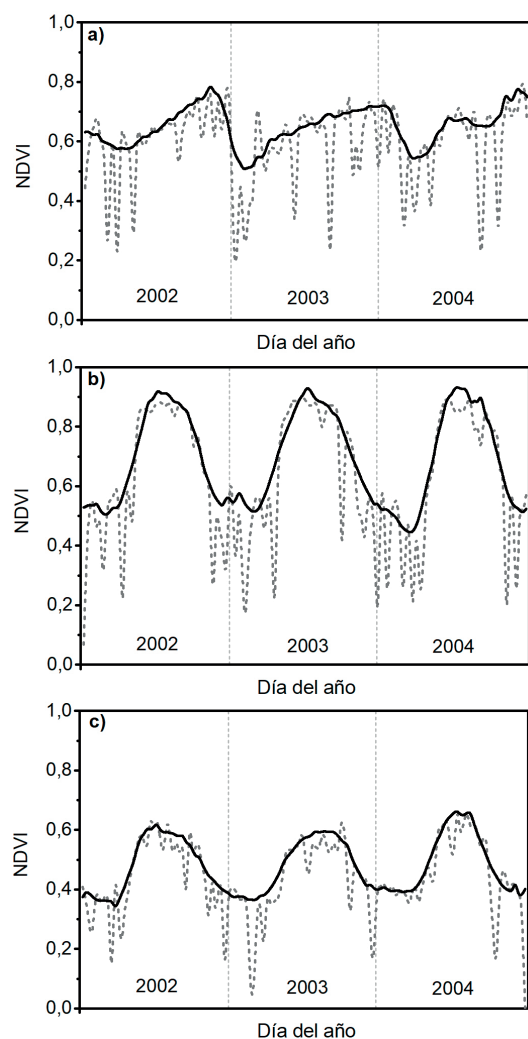


Figura 2. Ilustración gráfica de la serie temporal bruta de NDVI (línea gris) y la suavizada a partir de un filtro de Savitzky-Golay (línea negra) para tres tipos funcionales de vegetación: a) bosques perennifolios de hoja acicular; b) bosques caducifolios de hoja ancha; c) pastizales.

comportamiento bruto de la serie temporal NDVI y su ajuste a partir del filtro Savitzky-Golay para tres tipos funcionales de vegetación.

El método de umbrales fue aplicado para extraer las fenométricas a partir de las series temporales de NDVI suavizadas: a) el inicio de la estación de crecimiento o comienzo de la primavera (CP); b) el final de la estación de crecimiento o el final de la senescencia (FS) (i. e. final del otoño) y c) la duración de la estación de crecimiento (DEC) (Figura 3). El CP se definió como la fecha en la que el valor de NDVI suavizado alcanzó el 10% de su amplitud antes del máximo, mientras que el FS se definió como la fecha en la que el valor de NDVI post-máximo decreció hasta el 10% de su amplitud. La DEC fue definida como el periodo comprendido entre las fenométricas anteriores.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de los patrones espaciales de la LSP

La Figura 4 muestra las fenométricas del CP, el FS y la DEC de la vegetación de la península ibérica e islas Baleares para el periodo 2001-2017. Esta cartografía muestra una importante variabilidad espacial de la fenología en el territorio peninsular, que pudiera asociarse con las distintas respuestas de la vegetación a las condiciones ambientales.

A nivel general, se observó un comportamiento diferenciado de las fechas medias del CP y FS entre el norte y el sur peninsular, que coincide con la distribución de las dos principales regiones

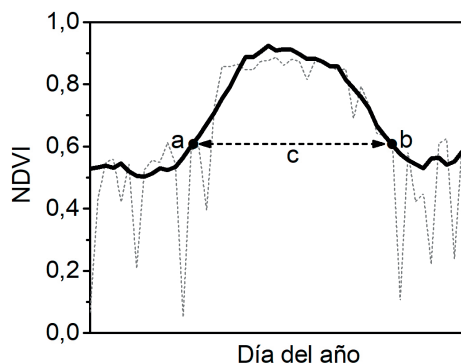


Figura 3. Fenométricas extraídas a partir de un umbral relativo: a) CP; b) FS y c) DEC. La línea gris representa la serie temporal bruta y la línea negra representa la serie suavizada usando el filtro de Savitzky-Golay.

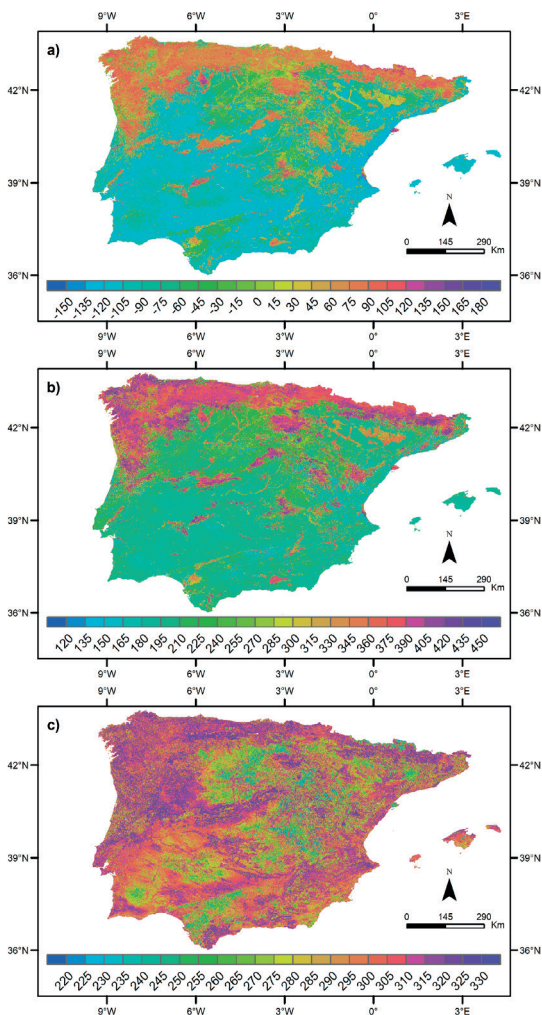


Figura 4. Fecha promedio (días julianos) de las fenométricas de la península ibérica: a) CP; b) FS; y c) DEC.

biogeográficas que se encuentran representadas en la península ibérica: la región biogeográfica atlántica y la región biogeográfica mediterránea. La región biogeográfica alpina, también presente en la península ibérica, presentó un comportamiento fenológico similar a la región atlántica, aunque las fechas del CP y el FS fueron algo más tardías en la región alpina. Esto pudiera explicarse por la influencia de la altitud sobre las condiciones térmicas de la región biogeográfica alpina, así como por la dinámica de la cubierta de nieve (Asam et al., 2018). En la fachada septentrional y gran parte del sector noroccidental, área que coincide principalmente con la región atlántica, el CP se extendió desde marzo a abril, mientras que el FS

tuvo lugar entre enero y febrero. Por otro lado, la vegetación de la región biogeográfica mediterránea presentó el CP entre septiembre y octubre y el FS entre junio y principios de agosto. Sin embargo, el comportamiento fenológico de la vegetación en determinados sectores de esta región biogeográfica fue muy similar al mostrado por la vegetación de la región biogeográfica atlántica (e.g. regiones montañosas). Además, también existió cierta variabilidad dentro de cada región biogeográfica, que podría responder al distinto comportamiento propio de las diferentes cubiertas del suelo. Por ejemplo, las fechas medias del CP y el FS fueron muy diferentes al de las coberturas colindantes en varias zonas que tradicionalmente han estado dominadas por la presencia de cultivo en regadío (e.g. las marismas de Doñana, el delta del Ebro, el mar Menor, o el páramo leonés) (Gómez-Limón y Picazo-Tadeo, 2012). Estudios como los llevados a cabo por Atzberger et al. (2013) y Rodríguez-Galiano et al. (2015a), que analizaron la LSP en el continente europeo, encontraron patrones espaciales de variabilidad fenológica similares a los descritos en este estudio para las tres regiones biogeográficas presentes en la península ibérica e islas Baleares. Sin embargo, las fechas del CP y el FS mostraron ligeras diferencias, que pudieran deberse a los diferentes procesos metodológicos utilizados para estimar las fenométricas (e.g. características de las imágenes de satélite, IV o variables biofísicas, técnicas de pre-procesamiento de las series temporales o métodos de extracción de fenométricas) (Atkinson et al., 2012; White et al., 2009).

La Figura 5 representa las variaciones existentes entre las zonas de vegetación natural y las áreas de cultivos para cada región biogeográfica. Las fechas medias del CP y del FS no mostraron diferencias considerables entre las áreas de vegetación natural y las de cultivos en la región biogeográfica alpina. A pesar de ello, el CP y el FS ocurrió más temprano en los cultivos (principios de marzo y enero, respectivamente) que en la vegetación natural (finales de marzo y enero, respectivamente). La vegetación natural de la región biogeográfica atlántica presentó un comportamiento fenológico similar al de la vegetación de la región biogeográfica alpina, aunque las fechas promedio del CP y el FS fueron ligeramente más tempranas en la región atlántica. Sin embargo, el comportamiento fenológico de los cultivos atlánticos fue

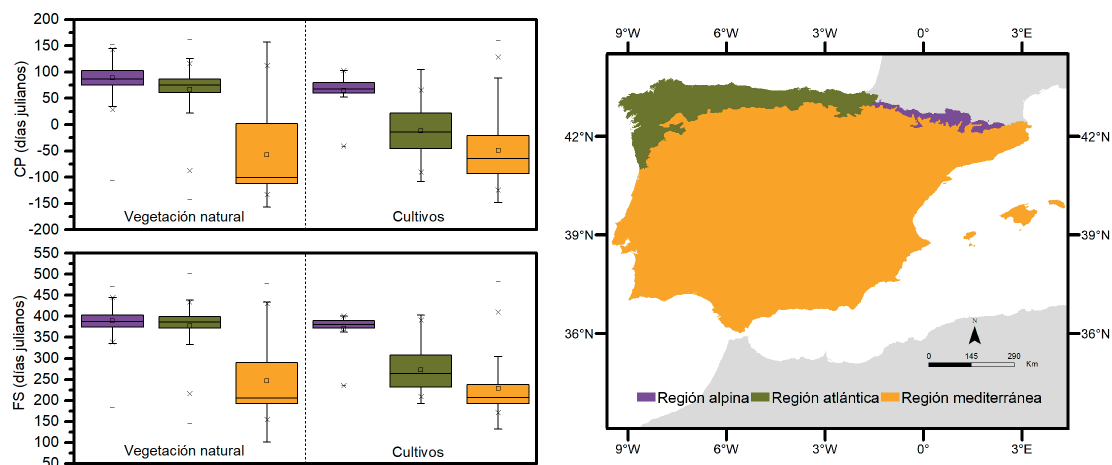


Figura 5. Diagramas de cajas que muestran el CP y el FS de las áreas de vegetación natural y de cultivos por región biogeográfica. Solo se consideraron los píxeles en los que la cobertura del suelo se mantuvo constante en la totalidad del periodo de estudio (2001-2017). En los diagramas de cajas, la línea horizontal y el símbolo cuadrado del interior de cada caja representan la mediana y la media, respectivamente. Los límites de cada caja son los percentiles 25 y 75 (i. e. rango intercuartílico), y los extremos superior e inferior de las líneas verticales son una prolongación de 1,5 veces el rango intercuartílico. Los valores atípicos máximo y mínimo son representados con un guion, y el 1^{er} y el 99^o percentil con una x. El mapa muestra la distribución espacial de las regiones biogeográficas del área de estudio.

significativamente diferente al de la vegetación natural. La estación de crecimiento de los cultivos de la región atlántica se extendió desde mediados de diciembre (CP) a finales de septiembre (FS). En la región biogeográfica mediterránea, tanto la vegetación natural como los cultivos presentaron una dinámica muy diferente a la de las regiones atlántica y alpina. Las fechas promedio del CP y el FS tanto de la vegetación natural como de los cultivos presentaron escasas diferencias. El CP tuvo lugar en noviembre, y el FS ocurrió a mediados de agosto en los cultivos y a principios de septiembre en la vegetación natural. En esta región biogeográfica, las fechas medianas de las fenométricas difieren de las fechas medias en aproximadamente 40 días en la vegetación natural y en 20 días en los cultivos. Estas importantes diferencias, especialmente elevadas en la vegetación natural, podrían estar asociadas a la alta variabilidad del comportamiento fenológico de las diversas formaciones vegetales mediterráneas (e.g. formaciones vegetales desarrolladas en zonas llanas o de altitud media vs. vegetación desarrollada en zonas de elevada altitud; áreas forestales naturales vs. plantaciones forestales destinadas al sector industrial; cultivos de regadío vs. cultivos de secano). Por el contrario, las diferencias entre las fechas medias y medianas son relativamente

bajas (2-10 días) en las regiones biogeográficas alpina y atlántica. Por tanto, la alta variabilidad fenológica de la diversa vegetación mediterránea pudiera influir especialmente sobre la sensibilidad de las fechas promedio de las fenométricas, lo que podría explicar las escasas diferencias del CP y el FS promedio tanto de la vegetación natural como de los cultivos mediterráneos.

La DEC no mostró un patrón de distribución espacial tan marcado como el CP y el FS (Figura 4). Generalmente, la vegetación presentó una DEC superior a los 7 meses. La DEC fue de aproximadamente 10-11 meses en una parte importante de la península ibérica. Por otro lado, las estaciones de crecimiento más cortas suelen coincidir con regiones como el valle del Guadalquivir, la Submeseta Norte, la Submeseta Sur o el valle del Ebro, probablemente asociadas a zonas de cultivo y pastizales.

3.2. Variabilidad temporal en las fenométricas

La Figura 6 muestra la variabilidad interanual de las fenométricas para todo el periodo de estudio (2001-2017) en términos de desviación estándar. En términos generales, el FS presentó una mayor

variabilidad temporal que el CP en una importante extensión de la región biogeográfica atlántica y en la región alpina. La desviación estándar del FS fue de aproximadamente 0-50 días, mientras que en el CP fue de aproximadamente 10-20 días. Esto puede deberse a la mayor complejidad del comportamiento de la fenología de otoño, que presenta un mayor grado de incertidumbre (Richardson et al., 2013). En cuanto a la región biogeográfica mediterránea, la variabilidad interanual de ambas fenométricas fue generalmente baja, siendo ligeramente superior la del CP (aproximadamente 5-10 días). Estos cambios en las fenométricas podrían asociarse con la respuesta de la vegetación a factores ambientales, especialmente climáticos (Rodríguez-Galiano et al., 2016). Sin embargo, los valores de la desviación estándar de ambas fenométricas fueron muy elevados en determinados sectores de esta región biogeográfica. Esta alta variabilidad temporal podría estar relacionada con diferentes factores, tales como la rotación de cultivos (Qader et al., 2015), el cambio en las coberturas del suelo (White et al., 2009) o el impacto de fenómenos naturales o antrópicos sobre las cubiertas (e.g. incendios forestales, deforestación) (Valderrama-Landeros et al., 2016), entre otros. La variabilidad temporal de ambas fenométricas fue de aproximadamente 40-60 días en regiones con una destacable presencia de zonas agrícolas, tales como el valle del Guadalquivir, la Submeseta Norte, la Submeseta Sur o el valle del Ebro, que podría ser explicada por la rotación de cultivos. En las estribaciones meridionales del Sistema Ibérico los valores de desviación estándar superaron incluso los 100 días. Esta alta variabilidad de las fenométricas podría deberse a los efectos

del incendio que afectó en 2009 a una gran extensión de la superficie forestal de la Serranía de Cuenca. Estos valores de desviación estándar también fueron muy elevados en el sector septentrional de Portugal, ya que esta zona tiene una importante presencia de plantaciones arbóreas (e.g. eucaliptos) destinadas principalmente a la industria maderera (Catry et al., 2015).

3.3. Gradiente latitudinal/longitudinal y efectos de la altitud en las fenométricas

El perfil fenológico (NW-SE peninsular) mostrado en la Figura 7 pone de manifiesto la variabilidad latitudinal/longitudinal de la fenología en la península ibérica. El CP y el FS ocurrieron más temprano en la región biogeográfica mediterránea. Sin embargo, estas fenométricas fueron más tardías en las zonas mediterráneas más elevadas (i. e. Sierra Nevada (Cordilleras Béticas), Sistema Central, Cordillera Cantábrica) (alrededor de 150 -180 días). Esto podría deberse al efecto de la altitud sobre las condiciones climáticas (e.g. temperatura y/o humedad) propio de las regiones montañosas. También se observaron fenofases más tardías en zonas que pudieran estar asociadas con áreas de cultivo (e.g. valle del Guadalquivir, valle del Tajo y determinados sectores de la Submeseta Norte) (alrededor de 25-50 días). Este gradiente latitudinal/longitudinal se relaciona principalmente con la variabilidad de los patrones de temperatura y precipitación (Rodríguez-Galiano et al., 2016). Además, el gradiente latitudinal pudiera también ser atribuido a factores como el fotoperiodo (Adole et al., 2019). La variabilidad de las fenométricas también responde al diferente

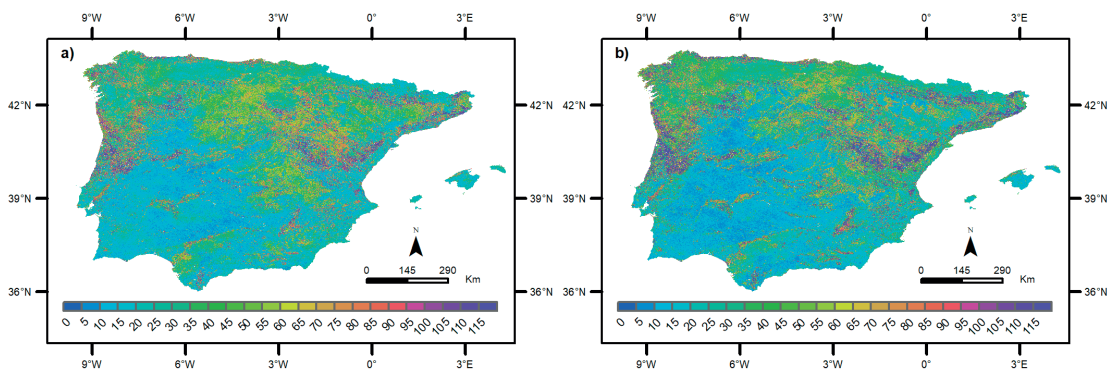


Figura 6. Desviación estándar de la fecha del CP (a) y el FS (b).

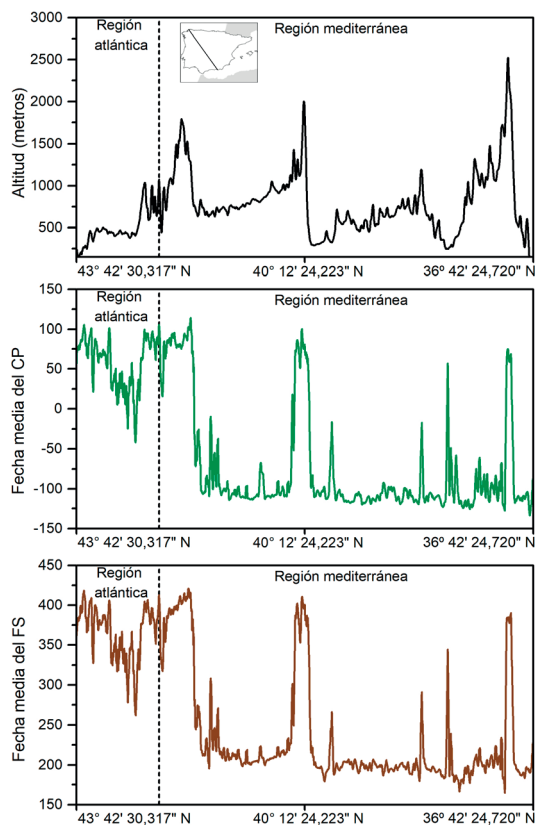


Figura 7. Perfil fenológico de la vegetación de la península ibérica.

comportamiento fenológico de las cubiertas del suelo propias de cada región biogeográfica. Las suaves temperaturas y la regularidad anual de las abundantes precipitaciones favorecen la presencia de bosques caducifolios en la región biogeográfica atlántica, compuestos principalmente por especies arbóreas como el haya o el roble (Rivas-Martínez, 1987). Sin embargo, la región biogeográfica mediterránea se caracteriza por la presencia de bosques perennifolios formados por especies adaptadas a ciertas condiciones de sequía (e.g. encina o pino carrasco) y, en las zonas con una aridez más pronunciada, la vegetación herbácea y/o arbustiva xerófila (Rivas-Martínez, 1987).

4. Conclusiones

En este estudio, se ha realizado una caracterización del comportamiento de la fenología de la vegetación para toda la península ibérica e islas Baleares. Para ello se han utilizado series

temporales de NDVI-MODIS a una resolución espacial de 250 metros y a una alta frecuencia temporal (8 días). Aunque existen estudios previos centrados en el territorio peninsular, la cartografía generada en este trabajo es, a conocimiento de los autores, la que presenta una mayor resolución espacial y frecuencia temporal hasta la fecha. Esta cartografía muestra, en términos generales, una importante variabilidad espacial de la fenología de la vegetación entre las regiones biogeográficas alpina, atlántica y mediterránea. Por lo general, el CP y el FS ocurrió de forma más temprana en la región biogeográfica mediterránea. Las regiones biogeográficas atlántica y alpina presentaron una dinámica fenológica muy similar, aunque las fenofases fueron ligeramente más tardías en la región biogeográfica alpina. Estos ámbitos biogeográficos presentaron, a su vez, cierta variabilidad fenológica interna, que podría estar provocada bien por los efectos de las diferentes cubiertas del suelo (e.g. cultivos - vegetación natural), o bien, en el caso de la región mediterránea, por el efecto de la altitud de las regiones montañosas sobre las condiciones climáticas. A nivel general, las fenométricas de la región biogeográfica mediterránea mostraron una mayor homogeneidad a lo largo de todo el periodo de estudio. Esta baja variabilidad temporal pudiera estar relacionada con la respuesta de la vegetación a las condiciones climáticas. Sin embargo, en determinadas zonas mediterráneas se observó una alta variabilidad interanual tanto en el CP como en el FS, que pudiera estar asociada a fenómenos antrópicos, tales como la rotación de cultivos, deforestación, etc. Por tanto, este estudio ha permitido conocer la fenología típica o de referencia (i. e. *baseline phenology*) de la península ibérica e islas Baleares. Las variaciones de estos patrones fenológicos pudieran ser utilizados como indicadores para evaluar futuros impactos del cambio climático sobre los ecosistemas peninsulares y baleares, a fin de poder establecer directrices para mitigarlos.

Agradecimientos

El primer autor es un contratado pre-doctoral FPU financiado por el "Ministerio de Universidades" (Referencia FPU15/03758). Los autores agradecen el apoyo de los proyectos RTI2018-096561-A-I00 y US-1262552, financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal

de Investigación / FEDER - Junta de Andalucía (Consejería de Economía y Conocimiento), respectivamente.

Referencias

- Adole, T., Dash, J., Atkinson, P.M. 2016. A systematic review of vegetation phenology in Africa. *Ecological Informatics*, 34, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.05.004>
- Adole, T., Dash, J., Rodríguez-Galiano, V., Atkinson, P.M. 2019. Photoperiod controls vegetation phenology across Africa. *Communications Biology*, 2(1), 391. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0636-7>
- Ahas, R., Aasa, R., 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>
- Aragones, D., Rodríguez-Galiano, V.F., Caparros-Santiago, J.A., Navarro-Cerrillo, R.M. 2019. Could land surface phenology be used to discriminate Mediterranean pine species? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.003>
- Asam, S., Callegari, M., Matiu, M., Fiore, G., De Gregorio, L., Jacob, A., Menzel, A., Zebisch, M., Notarnicola, C. 2018. Relationship between spatiotemporal variations of climate, snow cover and plant phenology over the Alps-An Earth observation-based analysis. *Remote Sensing*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/rs10111757>
- Atkinson, P.M., Jeganathan, C., Dash, J., Atzberger, C. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 123, 400-417. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.001>
- Atzberger, C., Klisch, A., Mattiuzzi, M., Vuolo, F. 2013. Phenological metrics derived over the European continent from NDVI3g data and MODIS time series. *Remote Sensing*, 6(1), 257-284. <https://doi.org/10.3390/rs6010257>
- Catry, F.X., Moreira, F., Deus, E., Silva, J.S., Águas, A. 2015. Assessing the extent and the environmental drivers of Eucalyptus globulus wildling establishment in Portugal: results from a countrywide survey. *Biological Invasions*, 17(11), 3163-3181. <https://doi.org/10.1007/s10530-015-0943-y>
- Chen, X., Wang, D., Chen, J., Wang, C., Shen, M. 2018. The mixed pixel effect in land surface phenology: A simulation study. *Remote Sensing of Environment*, 211, 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.030>
- Chen, X., Yang, Y. 2020. Observed earlier start of the growing season from middle to high latitudes across the Northern Hemisphere snow-covered landmass for the period 2001-2014. *Environmental Research Letters*, 15(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d39>
- 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>
- EEA. 2017. *Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report*. Copenhagen: Environmental Science and Engineering - European Environment Agency (EEA).
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Garonna, I., de Jong, R., Schaepman, M.E. 2016. Variability and evolution of global land surface phenology over the past three decades (1982-2012). *Global Change Biology*, 22(4), 1456-1468. <https://doi.org/10.1111/gcb.13168>
- Gómez-Limón, J.A., Picazo-Tadeo, A.J. 2012. Irrigated agriculture in Spain: Diagnosis and Prescriptions for Improved governance. *International Journal of Water Resources Development*, 28(1), 57-72. <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.640876>
- Gonsamo, A., Chen, J.M., David, T.P., Kurz, W.A., Wu, C. 2012. Land surface phenology from optical satellite measurement and CO2 eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(3). <https://doi.org/10.1029/2012JG002070>
- Helman, D. 2018. Land surface phenology: What do we really 'see' from space? *Science of the Total Environment*, 618, 665-673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237>
- Hird, J.N., McDermid, G.J. 2009. Noise reduction of NDVI timeseries: An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.003>

- Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417-1434. <https://doi.org/10.1080/01431168608948945>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Ivits, E., Cherlet, M., Horion, S., Fensholt, R. 2013. Global biogeographical pattern of ecosystem functional types derived from earth observation data. *Remote Sensing*, 5(7), 3305-3330. <https://doi.org/10.3390/rs5073305>
- 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 and Geosciences*, 30(8), 833-845. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>
- Julien, Y., Sobrino, J.A. 2009. Global land surface phenology trends from GIMMS database. *International Journal of Remote Sensing*, 30(13), 3495-3513. <https://doi.org/10.1080/01431160802562255>
- Keenan, T.F., Gray, J., Friedl, M.A., Toomey, M., Bohrer, G., Hollinger, D.Y., Munger, J.W., O'Keefe, J., Schmid, H.P., Wing, I.S., Yang, B., Richardson, A.D. 2014. Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. *Nature Climate Change*, 4(7), 598-604. <https://doi.org/10.1038/nclimate2253>
- Klosterman, S.T., Hufkens, K., Gray, J.M., Melaas, E., Sonnentag, O., Lavine, I., Mitchell, L., Norman, R., Friedl, M.A., Richardson, A.D. 2014. Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using PhenoCam imagery. *Biogeosciences*, 11(16), 4305-4320. <https://doi.org/10.5194/bg-11-4305-2014>
- Menzel, A. 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 44(2), 76-81. <https://doi.org/10.1007/s004840000054>
- Menzel, A. 2002. Phenology: Its importance to the global change community: An editorial comment. *Climatic Change*, 54(4), 379-385. <https://doi.org/10.1023/A:1016125215496>
- Pastor-Guzman, J., Dash, J., Atkinson, P.M. 2018. Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers. *Remote Sensing of Environment*, 205, 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.009>
- Peñuelas, J., Filella, I. 2001. Phenology: Responses to a warming world. *Science*, 294(5543), 793-795. <https://doi.org/10.1126/science.1066860>
- Peñuelas, J., Filella, I., Zhang, X., Llorens, L., Ogaya, R., Lloret, F., Comas, P., Estiarte, M., Terradas, J. 2004. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytologist*, 161(3), 837-846. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01003.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>
- Qader, S.H., Atkinson, P.M., Dash, J. 2015. Spatiotemporal variation in the terrestrial vegetation phenology of Iraq and its relation with elevation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 41, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.04.021>
- Ramos, A., Pereira, M.J., Soares, A., Rosário, L.D., Matos, P., Nunes, A., Branquinho, C., Pinho, P. 2015. Seasonal patterns of Mediterranean evergreen woodlands (Montado) are explained by long-term precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.021>
- 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. 1987. Memoria del mapa de series de vegetación de España. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación -Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA).
- Rodrigues, A., Marcal, A.R.S., Cunha, M. 2013. Monitoring vegetation dynamics inferred by satellite data using the pheno sat tool. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(4), 2096-2104. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2223475>
- Rodriguez-Galiano, V.F., Dash, J., Atkinson, P.M. 2015a. Characterising the land surface phenology of Europe using decadal MERIS data. *Remote Sensing*, 7(7), 9390-9409. <https://doi.org/10.3390/rs70709390>

- Rodríguez-Galiano, V.F., Dash, J., Atkinson, P.M. 2015b. Intercomparison of satellite sensor land surface phenology and ground phenology in Europe. *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2253-2260. <https://doi.org/10.1002/2015GL063586>
- Rodríguez-Galiano, V.F., Sanchez-Castillo, M., Dash, J., Atkinson, P.M., Ojeda-Zujar, J. 2016. Modelling interannual variation in the spring and autumn land surface phenology of the European forest. *Biogeosciences*, 13(11), 3305-3317. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3305-2016>
- Savitzky, A., Golay, M.J.E. 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Schaber, J., Badeck, F.W. 2005. Plant phenology in Germany over the 20th century. *Regional Environmental Change*, 5(1), 37-46. <https://doi.org/10.1007/s10113-004-0094-7>
- Sobrino, J.A., Julien, Y., Soria, G. 2013. Phenology estimation from meteosat second generation data. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), 1653-1659. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2259577>
- Tong, X., Tian, F., Brandt, M., Liu, Y., Zhang, W., Fensholt, R. 2019. Trends of land surface phenology derived from passive microwave and optical remote sensing systems and associated drivers across the dry tropics 1992-2012. *Remote Sensing of Environment*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111307>
- Valderrama-Landeros, L.H., España-Boquera, M.L., Baret, F. 2016. Deforestation in Michoacan, Mexico, from CYCLOPES-LAI Time Series (2000-2006). *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12), 5398-5405. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2597742>
- Verger, A., Filella, I., Baret, F., Peñuelas, J. 2016. Caracterización de la fenología de la vegetación a escala global mediante series temporales SPOT VEGETATION. *Revista de Teledetección*, 47, 1-11. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.5718>
- Vermote, E. 2015. MOD09Q1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09Q1.006>
- Vrieling, A., De Leeuw, J., Said, M.Y. 2013. Length of growing period over africa: Variability and trends from 30 years of NDVI time series. *Remote Sensing*, 5(2), 982-1000. <https://doi.org/10.3390/rs5020982>
- 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, 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., Lee, J.T., 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>
- 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)