



# Espectrofenología con datos Sentinel 2: definición de curvas de referencia para la caracterización de ecosistemas forestales

David López Trullén<sup>1,\*</sup> , Jose Manuel Álvarez-Martínez<sup>2</sup> , Jesús David Sánchez Labrador<sup>1</sup> , Borja Jiménez-Alfaro<sup>3</sup> , Ignacio Pérez-Silos<sup>2</sup> , Gonzalo Hernández-Romero<sup>2</sup> , José Barquín<sup>2</sup> 

- (1) ITD MEDIOAMBIENTE, S.L., Isabel Torres, 11, Edificio 3000, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria (PCTCAN), 39011 Santander, Cantabria, España.
- (2) IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria (PCTCAN), C/ Isabel Torres, Nº 15, 39011 Santander, Cantabria, España.
- (3) IMIB - Instituto Mixto de Investigación en Biodiversidad, Universidad de Oviedo, Campus de Mieres, C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Asturias.

\* Autor de correspondencia: D. López [[david@itdmedioambiente.com](mailto:david@itdmedioambiente.com)]

> Recibido el 12 de junio de 2022 - Aceptado el 13 de julio de 2022

**Como citar:** López Trullén, D., Álvarez-Martínez, J. M., Sánchez Labrador, J. D., Jiménez-Alfaro, B., Pérez-Silos, I., Hernández-Romero, G., Barquín, J. 2022. Espectrofenología con datos Sentinel 2: definición de curvas de referencia para la caracterización de ecosistemas forestales. *Ecosistemas* 31(3): 2411. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2411>

## Espectrofenología con datos Sentinel 2: definición de curvas de referencia para la caracterización de ecosistemas forestales

**Resumen:** El seguimiento de la respuesta espectral obtenida por sensores remotos de media resolución espacial relativo a formaciones vegetales puede proporcionar información relevante para el estudio de su distribución y dinámica temporal a lo largo de gradientes ambientales y escalas geográficas. La combinación del ciclo orbital y el ancho de barrido de Sentinel 2 proporciona datos cada 5 días en latitudes medias, lo que permite realizar un seguimiento temporal de alta resolución relacionado con etapas o fases fenológicas de los ecosistemas y posibles alteraciones de su estado de conservación. En este contexto, el objetivo del presente estudio consiste en la obtención de curvas espectrofenológicas promedio para algunas de las principales formaciones arbóreas y de matorral presentes en Cantabria, así como el análisis y la caracterización de métricas fenológicas espaciales que permitirán caracterizar el funcionamiento diferencial de la vegetación en el continuo del paisaje. Para la definición de las curvas se han empleado todos los datos históricos disponibles del sensor MSI, a bordo de los satélites Sentinel 2 A y B, con los que se ha generado una serie temporal de alta resolución del índice NDVI. Los datos se han agregado temporalmente a nivel mensual tras aplicar un filtro de nubes y sombras que maximiza la calidad del dato a nivel de pixel y un suavizado temporal de la serie para eliminar valores anómalos y ausentes. Los valores del índice han sido extraídos para una muestra de 230 puntos localizados con precisión GPS submétrica y cuya composición florística ha sido caracterizada por botánicos en campo. Se han obtenido curvas espectrofenológicas estacionales para los años del 2017 al 2020 y las curvas promedio anual, determinando su variabilidad y el grado de representatividad para las formaciones estudiadas. Finalmente se han obtenido las ecuaciones de las funciones ajustadas a las curvas promedio por formación vegetal aplicando análisis de Fourier. Los resultados muestran rasgos diferenciales para cada una de las tipologías forestales analizadas debido, principalmente, a la existencia de variaciones fenológicas entre sus curvas multianuales promedio. Estos resultados demuestran el interés de emplear series temporales de datos para la determinación de curvas de referencia para diferentes tipologías forestales que permitan identificar su distribución espacial y otros rasgos relativos a su estructura y funcionamiento. Potencialmente, estas series de datos podrían ser utilizadas para la detección temprana de anomalías funcionales relacionadas con efectos derivados de perturbaciones naturales o antrópicas en las formaciones vegetales en un contexto de Cambio Global.

**Palabras clave:** cartografía de vegetación; espectrofenología; hábitats; seguimiento; Sentinel 2

## Spectrophenology from Sentinel 2 data: definition of reference curves for forest ecosystem mapping

**Abstract:** Monitoring the spectral response of habitat types obtained by medium resolution satellite imagery can provide relevant information about the distribution and temporal dynamics of vegetation types through environmental gradients and geographic scales. The combination of the orbital cycle and bandwidth of Sentinel 2 sensor provides data every 5 days in mid-latitudes, which allows high-resolution temporal monitoring related to ecosystem phenology cycles and possible changes of habitats conservation status. In this context, the objective of this study was to obtain average spectrophenological curves for main tree and shrub formations present in Cantabria, as well as the analysis and characterization of phenological metrics that allow characterizing distributions and determining particular vegetation functions across landscape continuum. For the definition of the curves, we have processed all the historical data available from the MSI sensor of Sentinel 2 A and B satellites in order to generate a high temporal resolution time series of the NDVI index. Results have been temporarily averaged for a monthly representation after applying a manual filter of clouds and shadows that maximizes the quality of the data at the pixel level and a temporal smoothing of the series that filters out anomalous and missing values. NDVI values have been extracted at the pixel level for a sample of 230 points located with a subpixel GPS precision and whose floristic composition has been characterized by botanists in the field. Seasonal phenological curves for the years from 2017 to 2020 and annual average curves have been obtained, determining their variability and the degree of representativeness for each habitat type of interest. Finally, the equations of the functions adjusted to the average phenological curves by plant formation have been obtained by applying Fourier analyses. Results show particular

features for each of the habitat type due to the existence of specific functional traits related to phenological variations between their average multiannual curves. These results highlight the interest of using spectrophenological time series of satellite data for defining reference curves of habitat types. These curves allow, on the one hand, identifying the spatial distribution as well as structural and function variations of different ecosystems, and on the other hand, having at hand an early detection system of anomalous phenological responses of vegetation communities that can be related to natural or anthropic disturbances in a context of Global Change.

**Keywords:** vegetation mapping; spectrophenology; habitats; monitoring; Sentinel 2

## Introducción

Los ecosistemas forestales constituyen una pieza imprescindible del funcionamiento de la biosfera y juegan un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos clave para las sociedades humanas. La respuesta de los bosques a las perturbaciones antrópicas y otros efectos del Cambio Global, como eventos climáticos extremos o los cambios en los usos del suelo, pueden afectar a su área de distribución, a su composición, estructura y funcionamiento. Gracias a la creciente disponibilidad de nuevas fuentes de información ambiental, estos cambios pueden ser caracterizados de forma espacialmente explícita con el fin de disponer de herramientas con las que realizar un seguimiento de la dinámica de los ecosistemas y poder diseñar planes y políticas de gestión más sostenibles (Creed y Van Noordwijk 2018). Históricamente, la complejidad del estudio del paisaje ha sido abordada desde su simplificación y homogeneización, analizando de forma local fragmentos de comunidades o ecosistemas independientemente de su contexto espacial o su dinámica temporal. La evolución de la teoría ecológica y el reconocimiento de los paisajes como mosaicos heterogéneos a diferentes escalas espaciales y temporales (Levin 1992; Wiens et al. 2009), fluctuantes en estado de “no-equilibrio” (Sullivan 1996), ha puesto de manifiesto la necesidad de caracterizar la vegetación de forma dinámica con metodologías analíticas, objetivas y reproducibles (Hanski 2011; Fenu et al. 2017).

La puesta a disposición de datos de misiones espaciales de observación de la tierra (OT) que tienen como referencia el sensor MODIS de la NASA a bordo de los satélites AQUA y TERRA a partir del año 2000, continuando el legado del sensor AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer) gestionado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), aceleró en gran medida el estudio de la dinámica de la vegetación a escala global a partir de índices espectrales como el NDVI o el EVI (Hmimina et al. 2013). El desarrollo de productos MODIS estandarizados como el MOD13Q1/MYD13Q1 ha permitido realizar observaciones precisas de las formaciones vegetales sobre los índices espectrales NDVI y EVI con resoluciones espaciales de 250 m. Otras misiones de observación de la tierra como el programa Landsat, producen desde 1972 extensas y continuas series temporales de datos que también han sido empleadas con esta finalidad (Kovalsky et al. 2012). Los últimos sensores adscritos a este programa (ETM+, OLI) a bordo de los satélites Landsat 7 y 8, así como el recientemente operativo Landsat 9, mantienen mayores resoluciones espaciales que el sensor MODIS (30 m multiespectral frente a los 250 m de MODIS), aunque con una resolución temporal que penaliza su empleo en zonas con altos índices de nubosidad por la falta de continuidad de datos libres de contaminación del dato radiométrico por nubosidad. El lanzamiento por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA), en el año 2015, de nuevas misiones OT como los satélites Sentinel 2A y 2B con el sensor MSI a bordo ha supuesto una nueva fuente de datos que incrementan la resolución espacial (10 m) y espectral de sus predecesores. La disponibilidad de forma operativa de ambas plataformas desde el año 2016 ofrece un periodo de revisita de 5 días, incrementando la calidad y continuidad del dato de la cubierta terrestre en zonas con elevado índice de nubosidad. Actualmente, pese a que la serie histórica de datos no ofrece periodos temporales de la extensión MODIS o Landsat, sí ofrece la posibilidad de realizar análisis espectrofenológicos más precisos y resolutivos considerando de forma explícita la heterogeneidad y dinámica del paisaje y las diferentes coberturas vegetales en base a indicadores relativos

a su composición, estructura y funcionamiento (Szostak et al. 2018; Chaves et al. 2020).

La clasificación de imágenes procedentes de teledetección ha permitido durante las últimas décadas mejorar nuestra comprensión de los cambios ocurridos en el paisaje, del pasado al presente y en escenarios de futuro (Álvarez-Martínez et al. 2010; 2011), así como analizar la relación con los factores que los impulsan a través de un número creciente de metodologías basadas en minería de datos y aprendizaje automático (Franklin 2013; Álvarez-Martínez et al. 2014). Estos modelos predictivos utilizan un amplio abanico de indicadores relativos a la distribución potencial de especies y comunidades, como datos climáticos, propiedades del suelo, topografía o factores biológicos (Menzel 2002; Jiménez-Alfaro et al. 2018), juntamente con otros derivados de imágenes satelitales, o datos LIDAR que permiten caracterizar distribuciones realizadas o actuales (Álvarez-Martínez et al. 2018a; Pérez-Silos et al. 2019). Un concepto relacionado con el seguimiento dinámico de la vegetación es la espectrofenología o fenología de la superficie terrestre (*Land Surface phenology*, LSP), que está directamente relacionado con el cambio estacional de las condiciones climáticas y la respuesta de la cubierta vegetal (Badeck et al. 2004). La LSP se refiere al análisis de la dinámica fenológica de los ecosistemas terrestres a partir de series temporales de índices espectrales y a lo largo de ciclos anuales completos (Jakubauskas et al. 2001; De Beurs et al. 2005). En este contexto, la espectrofenología se define como la respuesta espectral dinámica del follaje foliar fotosintéticamente activo (Ding y Nilsson 2016). El análisis de la LSP permite definir para cada punto (o pixel) del territorio una información temporalmente continua y sistemática de la actividad fotosintética estacional de cada tipología vegetal, que denominamos curva espectrofenológica del tipo vegetal considerado (Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano 2020). El empleo de estas variables en el dominio del tiempo permite desarrollar indicadores sintéticos de funcionamiento ecosistémico denominados métricas fenológicas, como puede ser el inicio, final o duración de la estación de crecimiento (Fauvel et al. 2020). El estudio de la dinámica de la vegetación a través de estas curvas y métricas permite describir los eventos periódicos del ciclo de vida de las plantas a lo largo de las estaciones de crecimiento. Los parámetros derivados de la LSP ofrecen por lo tanto un conjunto de indicadores sólidos, transparentes, efectivos y repetibles para monitorear el patrón espacial, el estado de conservación y la variabilidad interanual de los ecosistemas, permitiendo describir niveles de referencia contra los que evaluar los impactos derivados de presiones antrópicas como el cambio climático que pueden provocar alteraciones sobre el ciclo espectrofenológico normal de las formaciones (retrasos o adelantos del ciclo, pérdida de área foliar, pérdida de productividad, preponderancia de especies en masas mixtas u la incidencia de otros fenómenos que pueden alterar de forma más o menos drástica la cubierta vegetal como los incendios forestales u otras). En esta línea de análisis, el programa Copernicus ha desarrollado diversos productos denominados High Resolution Layers dentro del paquete Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) como las capas Forests o Small Woody Features, o la reciente Vegetation Phenology and Productivity (Fenología y productividad de la vegetación en alta resolución) (Faucqueur et al. 2019; Sevillano Marco et al. 2019), que proporcionan información no solo sobre la distribución de las masas forestales, sino sobre diferentes parámetros relacionados con la estructura y funcionamiento de las masas forestales, su tendencia estacional a escala pan europea y resolución temporal.

El objetivo del presente estudio consiste en la obtención de curvas espectrofenológicas promedio para las principales formaciones arboladas presentes en la Cordillera Cantábrica, concretamente en la región de Cantabria. A partir de esta información y mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas, se obtendrá un conjunto de métricas espectrofenológicas que permitirán definir rasgos básicos de las curvas para cada una de las formaciones analizadas. La identificación de estos parámetros permitirá caracterizar e identificar las cubiertas forestales y definir, en futuros trabajos, indicadores dinámicos relacionados con la composición, estructura y funcionamiento de la masa forestal a lo largo de gradientes ambientales y de perturbación antrópica (Worrall et al. 2013).

## Material y métodos

### Área de estudio

El área de estudio se corresponde con la Comunidad Autónoma de Cantabria (Fig. 1), ubicada en la Cordillera Cantábrica oriental. Cantabria cuenta con una superficie de 5329 km<sup>2</sup>, con altitudes que superan los 2600 metros sobre el nivel del mar y más del 30 % del territorio catalogado con algún tipo de protección. Desde un punto de vista biogeográfico, se encuentra ubicada en la frontera meridional de la región Eurosiberiana (Cervellini et al. 2020), que le confiere características climáticas diferenciales condicionadas por la altitud y la distancia al mar. Las condiciones climatológicas dominantes se caracterizan por el predominio de una temperatura media anual suave (14°C) y veranos húmedos (precipitación media anual de 1200 mm), lo que favorece el crecimiento de la vegetación forestal por sucesión secundaria en espacios abandonados, como se ha observado en la Cordillera occidental (Álvarez-Martínez et al. 2014) y como demuestran los resultados del Cuarto Inventario Forestal en la región, con un incremento del 6 % de la superficie forestal (Alberdi et al. 2016). Las zonas con un carácter más Mediterráneo se caracterizan por su riqueza en endemismos ibéricos relacionados con una topografía abrupta y la ausencia de un período de sequía estival suficientemente largo y propio de la España seca.

La superficie arbolada de Cantabria ocupa actualmente casi el 40 % del territorio, siendo las plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) las formaciones más extendidas, seguidas de los bosques mixtos de frondosas autóctonas con hayedos (*Fagus sylvatica*), robledales de especies como el carballo (*Quercus robur*) y/o el roble albar (*Quercus petraea*) y los melojares (*Quercus pyrenaica*). Numerosas zonas presentan bosques de castaño (*Castanea sativa*) con un alto grado de naturalización y los fondos de valle están dominados por bosques aluviales de aliso (*Alnus glutinosa*) y fresno (*Fraxinus excelsior*) entre otras especies, así como forma-

ciones menos representadas pero intercaladas en algunas de las anteriores como las acebedas (*Ilex aquifolium*). Las formaciones de matorral se encuentran representadas predominantemente por los tojales con *Ulex* spp., entre otras especies, desarrollándose en muchos casos sobre superficies ligadas a incendios forestales, así como los helechales de helecho águila (*Pteridium aquilinum*), que conforman tapices continuos de cierta extensión con un origen similar a los tojales.

### Datos de vegetación

El estudio de la vegetación y su dinámica requiere, en primer término, disponer de un catálogo de referencia de las características los hábitats, aplicable a escala regional, nacional y europea de tal modo que se permita su comparación espaciotemporal y homogeneización con otras bases cartográficas. En Cantabria, la información disponible ha sido caracterizada a diferentes niveles integrando dos listados de referencia: 1) la Lista Patrón Española de Hábitats Terrestres (LPHT), definida por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) en colaboración con las CCAA, a partir del sistema de clasificación de EUNIS (Moss 2008; EUNIS 2021-2022, <https://eunis.eea.europa.eu/>), y 2) la lista de hábitats correspondientes al Anexo I de la Directiva 92/43/CEE. Del catálogo regional completo, que incluye 124 tipologías de hábitats homogeneizadas a un nivel EUNIS4, se han analizado en este trabajo las siguientes formaciones forestales y etapas sucesionales de amplia cobertura en la región: hayedos acidófilos u oligótrofos (EUNIS4 G162, Anexo DH 9120), rebollares acidófilos (EUNIS4 G17B, Anexo DH 6230), bosques oligótrofos de carballo (EUNIS4 G186, no incluidos en Anexo DH), acebedas (EUNIS4 G26, Anexo DH 9380), helechales (E531, no incluidos en Anexo DH) y tojales de *Ulex europaeus* (F315, no incluidos en Anexo DH).

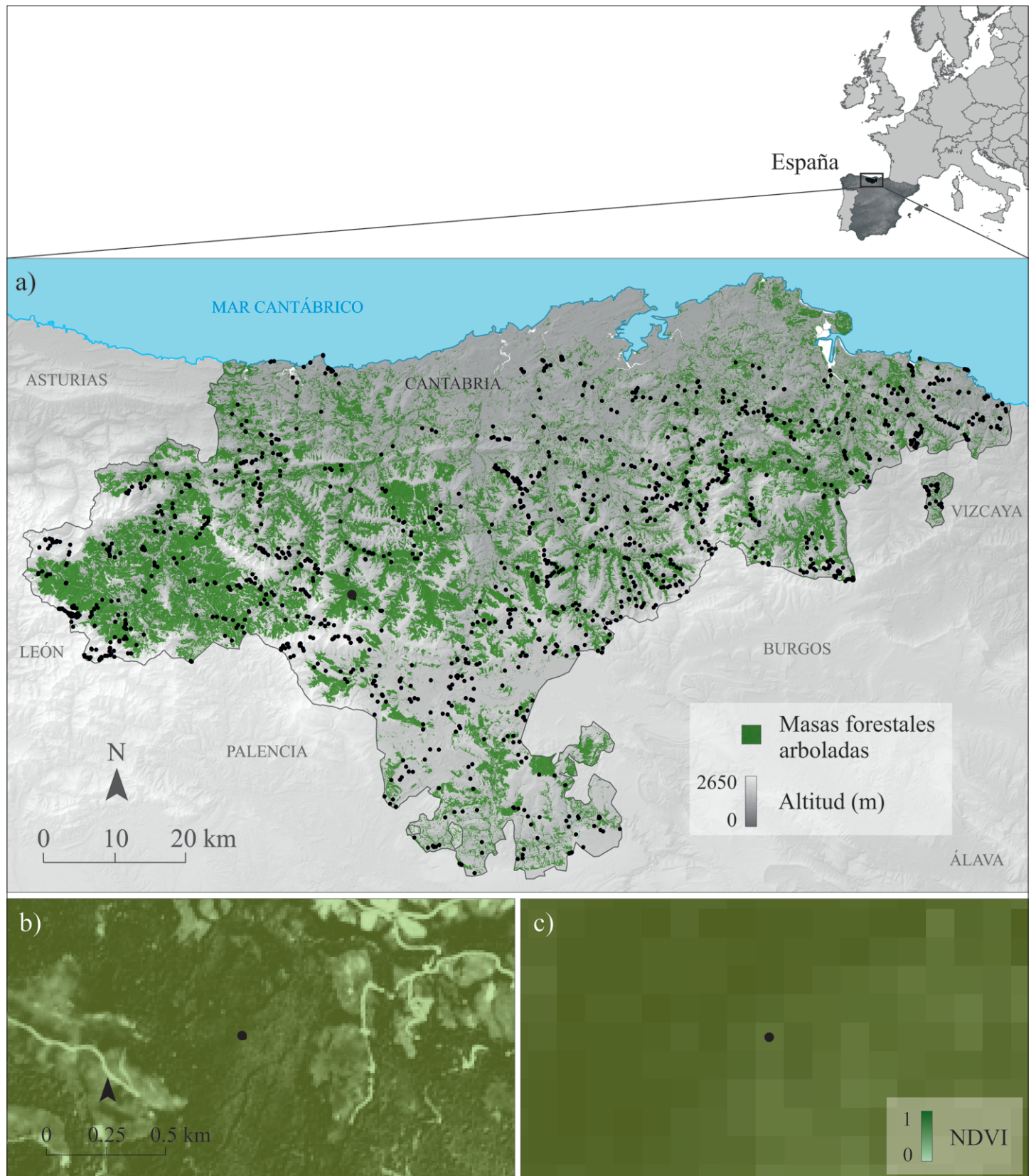
Para cada tipología se han obtenido datos de ocurrencia o “*in situ*” procedentes de trabajos de campo realizados entre los años 2016 y 2021 (ver Álvarez-Martínez et al. 2018a). Estas campañas tienen como objetivo la obtención de puntos cartográficos de precisión GPS centimétrica, menor en cualquier caso a los 10 metros de las imágenes Sentinel 2, validados mediante la confirmación experta del hábitat a nivel de composición y datos relativos al estado de conservación a nivel de estructura y presiones antrópicas como fuego o presencia de especies invasoras. Se dispone actualmente de 1451 puntos GPS relativos a hábitats forestales (Fig. 1a), de los que se seleccionaron 230 correspondientes a aquellos de interés para este trabajo (Tabla 1). Cada punto se ha hecho corresponder a nivel de pixel (10 x 10 m) con las imágenes de satélite Sentinel 2 (Figs. 1b y c).

**Tabla 1.** Distribución de los puntos de muestreo de campo por formación vegetal analizada.

**Table 1.** Distribution of field sampling points by plant formation.

| Tipología de hábitat forestal    | Códigos EUNIS4 | Nº de puntos “in situ” |
|----------------------------------|----------------|------------------------|
| Hayedos oligótrofos              | G162           | 61                     |
| Rebollares acidófilos            | G17B           | 58                     |
| Bosques oligótrofos de carballo  | G186           | 38                     |
| Acebedas                         | G26            | 13                     |
| Helechales                       | E531           | 23                     |
| Tojales de <i>Ulex europaeus</i> | F315           | 37                     |
| <b>Total</b>                     | <b>230</b>     |                        |





**Figura 1. a)** Distribución de puntos de muestreo con calidad GPS centimétrica sobre las formaciones arboladas y matorrales en Cantabria, obtenidas de Álvarez-Martínez et al. (2018a). **b)** Localización de un punto de muestreo sobre valores del índice NDVI a escala de paisaje. **c)** Detalle de la localización del punto de muestreo anterior, permitiendo apreciar los píxeles individuales del satélite Sentinel 2 (10 x 10 m) y su variación espacial.

**Figure 1. a)** Distribution of sampling points with centimetric GPS quality on forest and shrub formations in Cantabria, obtained from Álvarez-Martínez et al. (2018a). **b)** Location of a sampling point on NDVI values at the landscape scale. **c)** Detail of the location of the previous sampling point, allowing to appreciate individual pixels of Sentinel 2 satellite (10 x 10 m) and their spatial variation.

## Procesamiento de imágenes

Los datos satelitales utilizados se corresponden con los proporcionados por el sensor MultiSpectral Instrument (MSI), instalado en los satélites de observación de la tierra Sentinel 2A y Sentinel 2B (en adelante S2), incluidos en el Programa Copernicus, gestionado y coordinado por la Comisión Europea (CE) en colaboración con la ESA. Las escenas utilizadas son la 30TUP, 30TVP, 30TUN y 30TVN, necesarias para cubrir la totalidad de la Comunidad Autónoma de Cantabria. El acceso a los datos se realizó desde el *Copernicus Open Access Hub* (ver <https://scihub.copernicus.eu/>). El nivel de procesamiento utilizado fue el correspondiente al nivel L1C que incluye correcciones radiométricas y geométricas, incluida la ortorectificación y el registro espacial de los datos con una precisión sub-píxel sobre un sistema de referencia cartográfico global EPSG:4326 - World Geodetic System 1984.

Las teselas de vegetación objeto del estudio se distribuyen en un territorio de características orográficas singulares, con gradientes altimétricos acentuados y un relieve muy complejo, ofreciendo una alta variabilidad de condiciones de iluminación del suelo en función de los valores de la pendiente y orientación, así como de las condiciones de geometría solar variable a lo largo del año. Por este motivo, en el procesamiento de los datos S2 L1C se aplicaron correcciones atmosféricas y de eliminación de los efectos de la topografía en la iluminación solar sobre el terreno (Álvarez-Martínez et al. 2018b), manteniendo las resoluciones de 10 m para las bandas del sensor MSI. La obtención de reflectancias a nivel de superficie (BOA) a partir de las radiancias por encima de la atmósfera (TOA) se ha realizado mediante el modelo de corrección atmosférica desarrollado por Song et al. (2001), aplicando las siguientes ecuaciones:

Cálculo de la transmitancia atmosférica (ecuación 1):

$$T_z = \exp(-\tau_{a,r}/\cos\theta_z) \quad (\text{ec. 1})$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar y  $\tau_{a,r}$  es el espesor óptico de la dispersión de Rayleigh, calculado de acuerdo con (Kaufman et al. 1997) (ecuación 2):

$$\tau_{a,r} = 0.008569 \lambda^{-4} (1 + 0.0113 \lambda^{-2} + 0.00013 \lambda^{-4}) \quad (\text{ec. 2})$$

donde,  $\lambda$  es la longitud de onda central de cada banda.

Cálculo de la reflectancia BOA (ecuación 3):

$$\rho = \{(L_{\text{sat}} - L_{\text{haze}})\pi d^2\}/\{E_0 \cos\theta_z T_z\} \quad (\text{ec. 3})$$

donde,  $\rho$  es la reflectancia BOA;  $L_{\text{haze}}$  es la trayectoria radiante (ecuación 4),  $d$  es la distancia tierra-sol en unidades astronómicas (AU) y  $E_0$  es la radiancia solar exoatmosférica.

$$L_{\text{haze}} = \text{Rad}_{\text{min}} - (0.01 E_0 \cos\theta_z T_z)/\pi d^2 \quad (\text{ec. 4})$$

donde,  $\text{Rad}_{\text{min}}$  es la radiancia mínima detectada sobre determinadas láminas de agua.

La corrección de los efectos sobre la iluminación del terreno provocados por la topografía se ha realizado mediante un MDT de 10 m derivado por interpolación bilineal del MDT05 (5 metros de resolución espacial), facilitado por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). La metodología empleada para la normalización de las reflectancias BOA se efectúa mediante el modelo propuesto por Teillet et al. (1982) (ecuación 5):

$$\rho_{h,i} = \rho_T (\cos\theta_i + C_k)/(IL + C_k) \quad (\text{ec. 5})$$

donde,

$$IL = \cos\theta_i \cos\theta_p + \sin\theta_i \sin\theta_p \cos(\Phi_a - \Phi_o) \quad (\text{ec. 6})$$

$$C_k = (b_k/m_k) \quad (\text{ec. 7})$$

$$\rho_T = b_k + m_k IL \quad (\text{ec. 8})$$

$$m_k = \{n \Sigma IL \rho_T - (\Sigma IL)(\Sigma \rho_T)\}/\{\Sigma IL^2 - (\Sigma IL)^2\} \quad (\text{ec. 9})$$

$$b_k = \{\Sigma \rho_T - m_k(\Sigma IL)\}/n \quad (\text{ec. 10})$$

donde,  $\rho_h$  es la reflectancia BOA corregida;  $\rho_T$  es la reflectancia BOA sin corregir;  $\theta_i$  es el ángulo cenital solar;  $\theta_p$  es el ángulo de pendiente;  $\Phi_a$  es el ángulo azimutal solar y  $\Phi_o$  es el ángulo de orientación de la pendiente.

A partir de las reflectancias BOA corregidas se calculó el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al. 1973), ampliamente utilizado en procesos de caracterización y seguimiento de cubiertas vegetales (Pettorelli et al. 2005) (ecuación 11):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED})/(\text{NIR} + \text{RED}) \quad (\text{ec. 11})$$

Los índices de vegetación están ligados a la cantidad de biomasa verde y permiten diferenciar la intensidad de la actividad fotosintética, proporcionando una medida integrada de las respuestas de los ecosistemas a factores climáticos como la temperatura, las precipitaciones, así como a los incendios u otras perturbaciones antrópicas que afecten a su estructura y funcionamiento.

Para la aplicación operativa de los procedimientos de corrección descritos se ha programado una cadena de procesamiento automática, implementada en lenguaje C/C++ con tecnología multinúcleo, lo que permite una alta eficiencia en el procesamiento de un gran volumen de datos. Conjuntamente al operacional, se han efectuado controles de calidad de los datos mediante filtrado manual basado en operador experto, para asegurar la consistencia de los mismos y eliminar valores afectados por nubosidad, sombras u otras alteraciones no representativas de la reflectancia de las formaciones vegetales. En estudios que utilizan series temporales de datos multispectrales, una de las principales cuestiones que ha de tenerse en cuenta es la variación temporal en la señal multispectral que resulta de los efectos atmosféricos y bidireccionales, los cuales no están relacionados con los cambios fenológicos de la vegetación objeto de estudio. El ruido resultante de tales efectos debe minimizarse antes de analizar estas series multitemporales utilizando diferentes técnicas estadísticas (p.ej. De Oliveira et al. 2014). En numerosas ocasiones, la falta de información auxiliar detallada (p.ej. composición instantánea de la columna de la atmósfera), hace que las correcciones atmosféricas y topográficas precisas y absolutamente rigurosas no sean prácticas ni factibles (Hird y McDermid 2009). En estas situaciones, los suavizadores de datos no lineales son un método útil para filtrar datos "contaminados" con ruido procedente de los extremos de la distribución u ocasionalmente alejados de la media. En este contexto, la serie S2 utilizada en este trabajo ha sido agregada mensualmente mediante la técnica empleada por Goward et al. (1994), basada en la aplicación de algoritmos para la generación de compuestos temporales de datos. Posteriormente se ha aplicado un algoritmo propuesto por Velleman (1980) para la eliminación de ruido blanco asociado a la señal mediante la aplicación de filtros sucesivos basados en medianas móviles.

## Análisis de series temporales S2

Los datos empleados para el análisis de la serie temporal S2 se corresponden con series de 4 años, desde 2016 a 2020. Se ha tomado como referencia el año hidrológico (comienzo el 1 de octubre y final el 30 de septiembre) debido a una mejor adaptación a los periodos de actividad vegetativa en nuestras latitudes. Los datos se han estimado a nivel mensual para todo el periodo descrito, calculando el valor promedio mensual del NDVI para cada una de las muestras de cada formación vegetal. Con estos valores promedio mensual se obtuvieron las curvas espectrofenológicas asociadas al NDVI (Fig. 2) para cada una de las formaciones vegetales analizadas. Estas curvas promedio descritas en el dominio del tiempo se pueden considerar como curvas sinusoides (Zeng et al. 2020). Al margen de los rasgos particulares que se pueden observar en cada una de ellas (posición de los máximos y mínimos, amplitud, etc.) todas siguen un patrón sinusoidal (Fisher et al.



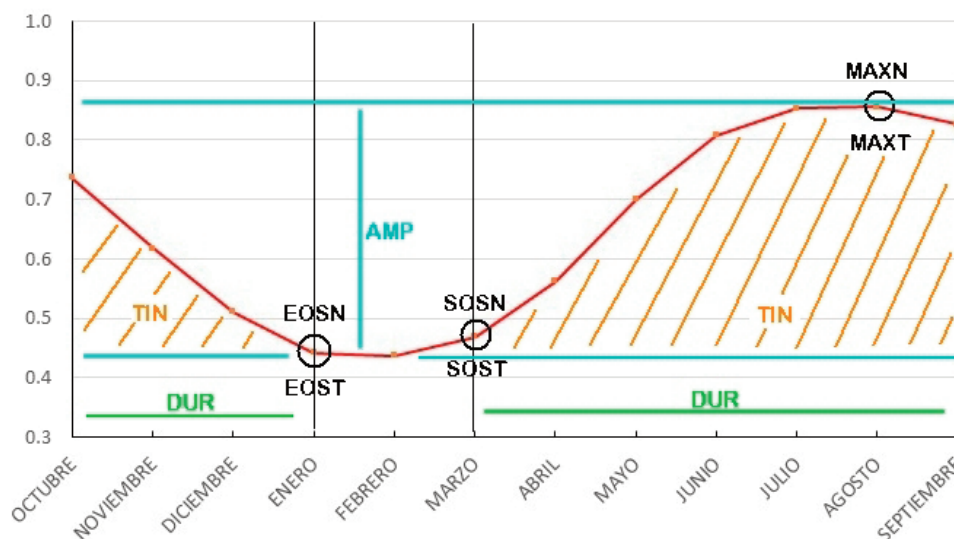
2006). Este hecho tiene sentido físico y biológico teniendo en cuenta el origen de muchos de los factores que tienen influencia sobre el ciclo fenológico (como la radiación solar o evolución de la temperatura promedio) y que desarrollan este tipo de patrón espacio-temporal. En este contexto, y con la finalidad de parametrizar las curvas obtenidas a partir de los datos discretos mensuales, se han obtenido ecuaciones mediante ajuste al modelo de Fourier (Andres et al. 1994), idóneo para funciones de tipo senoide, y realizado mediante la herramienta disponible en el software Matlab R2021 (ecuación 12).

$$y = a_0 + \sum_{n=1}^n (a_i \cos(iwx) + b_i \sin(iwx)) \quad (\text{ec. 12})$$

Para el desarrollo de este modelo se utilizó un ajuste de cinco términos, como se muestra más adelante. Una vez se obtuvieron las ecuaciones que representan las curvas espectrofenológicas de NDVI promedio, se calcularon las principales métricas fenológicas para cada una de las formaciones vegetales (Tabla 2).

Con el objeto de determinar la dependencia lineal de los valores mensuales promedio obtenidos entre cada una de las formaciones dos a dos se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (ecuación 13).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)(y_i - y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}} \quad (\text{ec. 13})$$



**Figura 2.** Representación sobre curva espectro-temporal de NDVI las métricas espectrofenológicas.

**Figure 2.** Representation on spectro-temporal curve of NDVI the spectrophenological metrics.

**Tabla 2.** Métricas fenológicas obtenidas de las curvas sinusoidales de cada formación vegetal.

**Table 2.** Phenological metrics obtained from the sinusoidal curves of each plant formation.

| Acrónimo | Interpretación fenológica  | Descripción  |
|----------|--|--|
| SOST     | Inicio de la fotosíntesis medible en el dosel de la vegetación                           | Mes del año identificado con una tendencia ascendente constante en la serie temporal de NDVI                             |
| SOSN     | Nivel de actividad fotosintética al comienzo de la fotosíntesis medible                  | Valor de NDVI (o línea de base) a partir del que se produce una tendencia ascendente constante en la serie anual de NDVI |
| EOST     | Fin de la fotosíntesis medible en el dosel de la vegetación                              | Mes del año identificado al final de una tendencia descendente constante en la serie anual de NDVI                       |
| EOSN     | Nivel de actividad fotosintética al final de la fotosíntesis medible                     | Valor del NDVI al final de una tendencia descendente constante en la serie anual de NDVI                                 |
| MAXT     | Tiempo de fotosíntesis máxima en el dosel  | Mes en el que se produce el NDVI máximo en la serie anual de NDVI  |
| MAXN     | Nivel máximo de actividad fotosintética en el dosel                                      | NDVI máximo en la serie anual de NDVI  |
| DUR      | Duración de la actividad fotosintética (la temporada de crecimiento)                     | Número de meses desde el SOST hasta el EOST  |
| AMP      | Incremento máximo en la actividad fotosintética del dosel por encima de la línea de base | Diferencia entre MAXN y SOSN   |
| TIN      | Actividad fotosintética del dosel durante toda la temporada de crecimiento               | Integración diaria (interpolada) de NDVI por encima de la línea de base durante toda la temporada de crecimiento         |

Por otra parte, para determinar el desfase entre las ecuaciones promedio obtenidas para cada una de las formaciones se efectuó un análisis de correlación cruzada normalizada entre las señales promedio de cada una de las formaciones dos a dos. La correlación cruzada normalizada mide la similitud entre las ecuaciones de dos formaciones y las copias desplazadas en la fase (desfasadas). Se trata de una medida de similitud utilizada para encontrar características relevantes en una señal desconocida por medio de la comparación con otra que sí se conoce. Este análisis se realizó mediante el software Matlab R2021 (ecuación 14).

$$\hat{R}_{x,y,coeff}(m) = \frac{\hat{R}_{x,y}(m)}{\sqrt{\hat{R}_{x,x}(0) \hat{R}_{y,y}(0)}} \quad (\text{ec. 14})$$

## Resultados

### Funciones de referencia

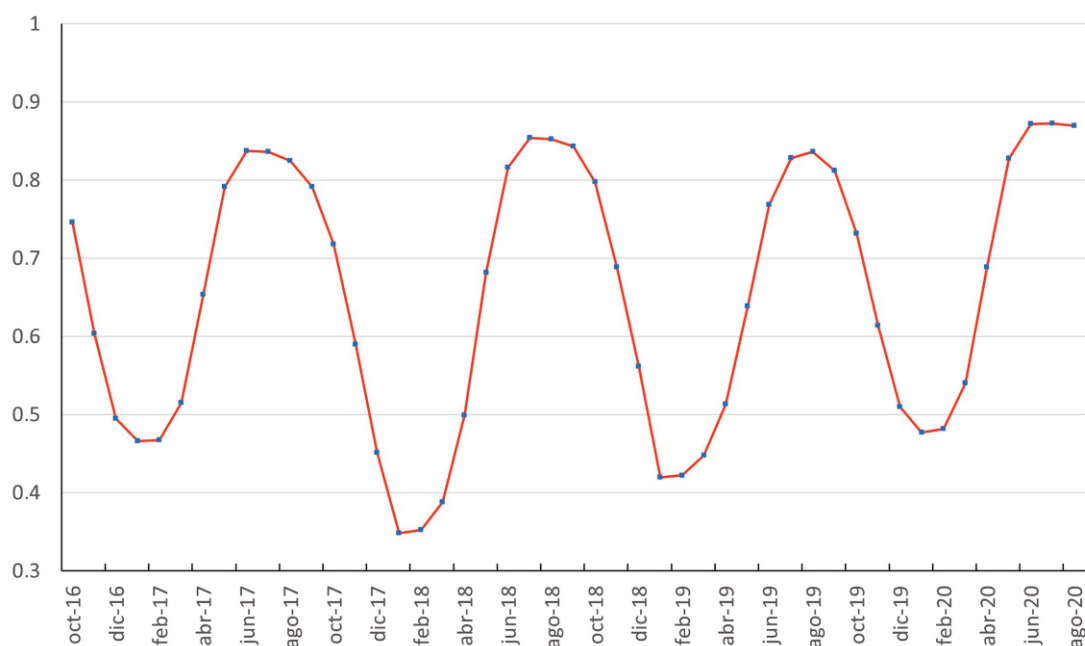
La Figura 3 muestra un ejemplo de serie de datos completa para el punto de muestreo representado en la Figura 1.

Los resultados obtenidos para el NDVI promedio mensual de la muestra para cada formación vegetal (Tabla 3) mantienen una distribución de valores particulares, que una vez representados en las curvas correspondientes (Fig. 4) muestran rasgos diferenciadores entre formaciones. Los valores máximos y mínimos, así como la distribución de los valores a lo largo del ciclo, mantienen una relación con la formación a la que pertenecen, observándose una repetición cíclica de dicha distribución temporal de valores por formación. Esto

**Tabla 3.** Datos promedio mensual interanual y desviación típica mensual interanual por formación vegetal para el período de análisis. En rojo se señalan los valores mensuales máximos y en verde los valores mínimos. Códigos EUNIS 4: Hayedos oligótrofos (G162), rebollares acidófilos (G17B), bosques oligótrofos de carballo (G186), acebedas (G26), helechales (E531), tojales de *Ulex europaeus* (F315).

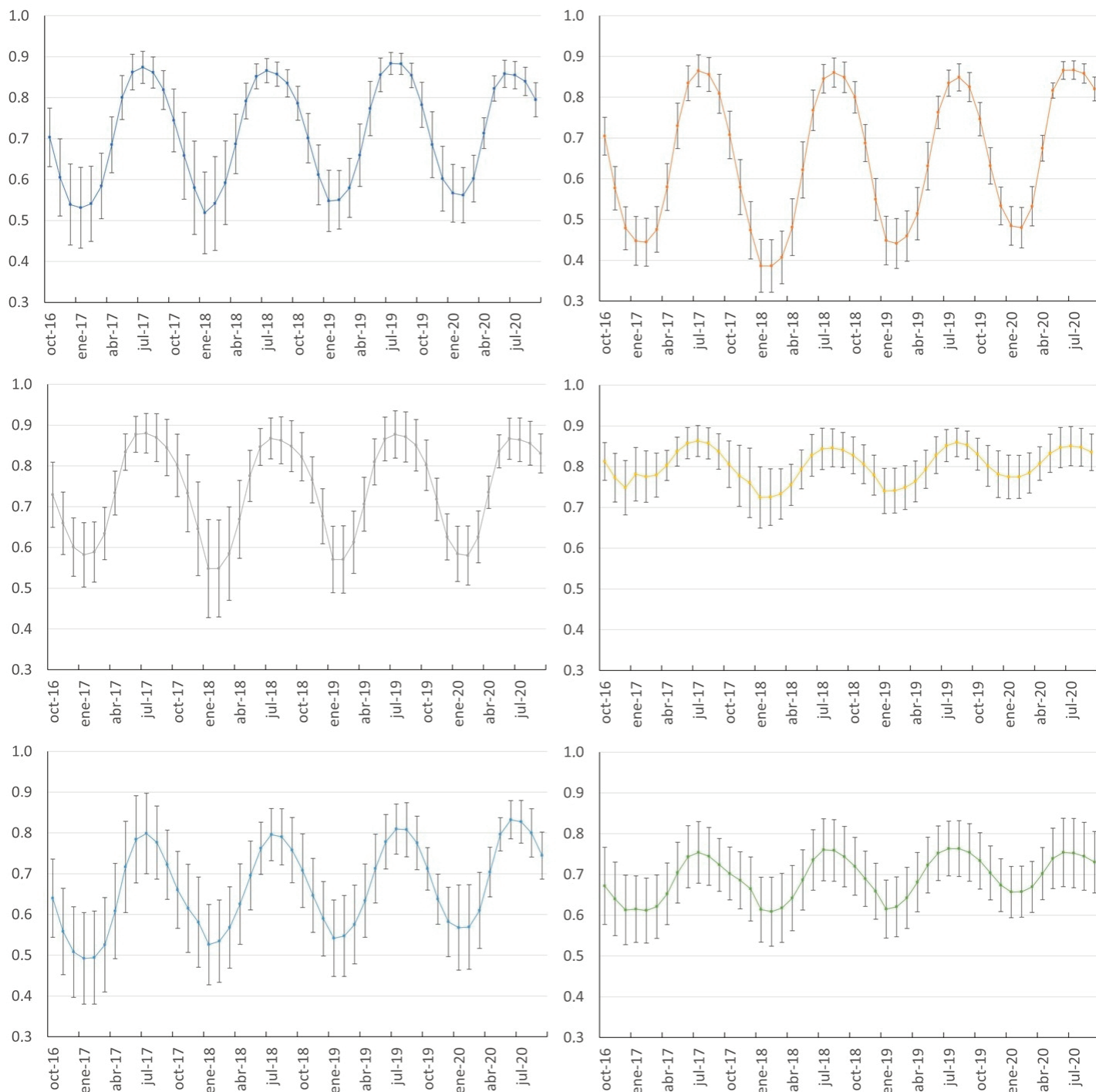
**Table 3.** Monthly interannual average data and monthly interannual standard deviation by plant formation for the period analyzed. The maximum monthly values are indicated in red and the minimum values in green. EUNIS 4 Codes: Oligotrophic beech forests (G162), acidophilus oak forests (G17B), oligotrophic oak forests (G186), holly groves (G26), ferns (E531), gorse of *Ulex europaeus* (F315).

|      |          | NDVI MENSUAL |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|----------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      |          | O            | N    | D    | E    | F    | M    | A    | M    | J    | J    | A    | S    |
| G162 | $\mu$    | 0.75         | 0.66 | 0.58 | 0.54 | 0.55 | 0.59 | 0.69 | 0.80 | 0.86 | 0.87 | 0.86 | 0.83 |
|      | $\sigma$ | 0.01         | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| G17B | $\mu$    | 0.74         | 0.62 | 0.51 | 0.44 | 0.44 | 0.47 | 0.56 | 0.70 | 0.81 | 0.85 | 0.86 | 0.83 |
|      | $\sigma$ | 0.01         | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| G186 | $\mu$    | 0.79         | 0.71 | 0.64 | 0.57 | 0.57 | 0.61 | 0.71 | 0.81 | 0.86 | 0.87 | 0.86 | 0.84 |
|      | $\sigma$ | 0.01         | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| G26  | $\mu$    | 0.82         | 0.79 | 0.77 | 0.76 | 0.75 | 0.76 | 0.78 | 0.81 | 0.84 | 0.85 | 0.85 | 0.84 |
|      | $\sigma$ | 0.01         | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| E531 | $\mu$    | 0.68         | 0.61 | 0.57 | 0.53 | 0.54 | 0.57 | 0.64 | 0.73 | 0.79 | 0.81 | 0.79 | 0.75 |
|      | $\sigma$ | 0.02         | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| F315 | $\mu$    | 0.71         | 0.68 | 0.66 | 0.63 | 0.62 | 0.64 | 0.67 | 0.71 | 0.75 | 0.76 | 0.75 | 0.74 |
|      | $\sigma$ | 0.01         | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |



**Figura 3.** Curva espectrofenológica (NDVI) para un punto de muestreo correspondiente a un rebollar acidófilo (G17B) durante el período histórico analizado.

**Figure 3.** Spectrophenological curve (NDVI) for a sampling point corresponding to an acidophilus oak forest (G17B) during the historical period analyzed.



**Figura 4.** Curvas espectrofenológicas (NDVI) promedio de los valores mensuales de la muestra para el periodo histórico analizado y representación de la desviación estándar mensual muestral para cada una de las formaciones vegetales. Gráfico superior izquierda: hayedos oligotrofos (G162); superior derecha: rebollares acidófilos (G17B); central izquierda: bosques oligotrofos de carbayo (G186); central derecha: acebedas (G26); inferior izquierda: helechales (E531); inferior derecha: tojales de *Ulex europaeus* (F315).

**Figure 4.** Average spectrophenological curves (NDVI) of the monthly values of the sample for the historical period analyzed and representation of the monthly sample standard deviation for each of the plant formations. Upper left graph: oligotrophic beech forests (G162); top right: acidophilus oak trees (G17B); center left: oligotrophic forests of carbayo (G186); center right: holly trees (G26); bottom left: ferns (E531); bottom right: gorse of *Ulex europaeus* (F315).

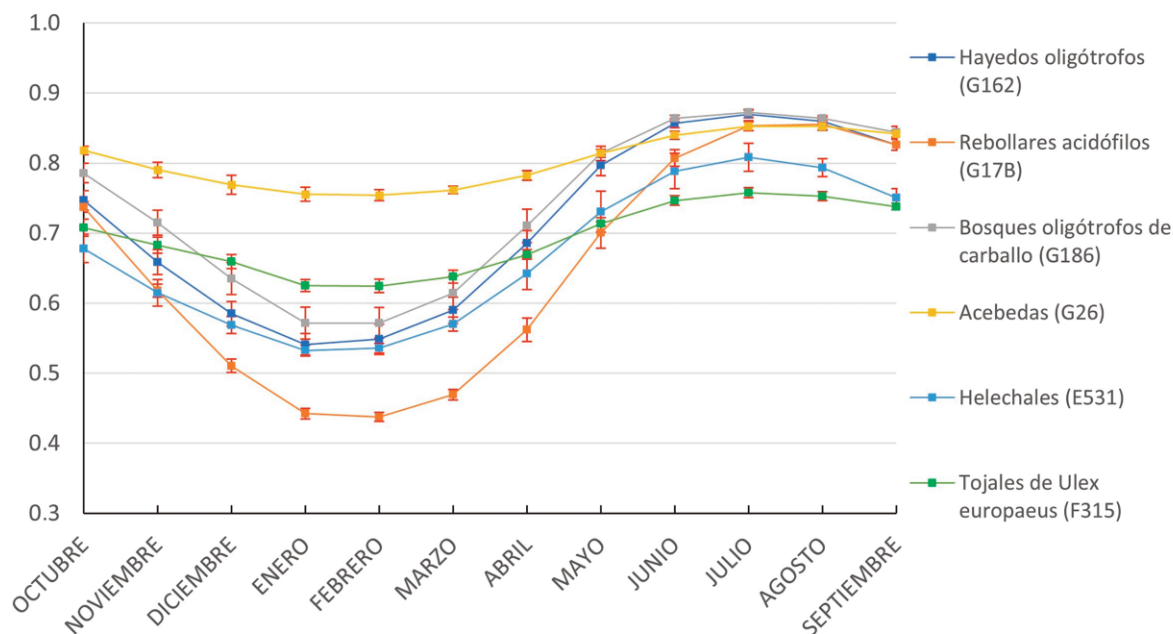
se hace más evidente cuando se representan las curvas promedio de los cuatro ciclos fenológicos analizados (Fig. 5), en las que pueden observarse diferencias significativas a lo largo de todo el ciclo anual que tienden a reducirse en la época estival pero que mantienen, no obstante, diferencias entre unidades fisionómicas y tipos funcionales de vegetación. Las desviaciones típicas obtenidas muestran un agrupamiento significativo de los datos por formación.

A partir del ajuste al modelo de Fourier se obtienen las ecuaciones de referencia (Tabla 4) y los valores de ajuste para cada una de las formaciones vegetales analizadas. La variable indepen-

diente se corresponde con un periodo de la sinusoide, tomando el rango de valores  $[0, 2\pi]$ . Los valores de correlación del ajuste (coeficiente de correlación de Pearson) son elevados ( $\approx 1$ , así como su nivel de significación, para todas las formaciones analizadas.

Los resultados obtenidos para las matrices de correlación entre valores promedios mensuales de las distintas formaciones muestran que, aunque las funciones ofrecen valores sensiblemente diferentes entre formaciones, la correlación promedio muestra valores altos (Tabla 5). Esto avala por un lado las posibilidades del análisis en la discriminación de cubiertas, pero apunta el interés





**Figura 5.** Funciones espectrofenológicas promedio, representadas por el índice NDVI, para el periodo histórico y las formaciones vegetales analizadas. En rojo se muestra la desviación estándar mensual interanual. Códigos EUNIS 4: hayedos oligótrofos (G162), rebollares acidófilos (G17B), bosques oligótrofos de carballo (G186), acebedas (G26), helechales (E531), tojales de *Ulex europaeus* (F315).

**Figure 5.** Average spectrophenological functions, represented by the NDVI index, for the historical period and the plant formations analyzed. The interannual monthly standard deviation is shown in red. EUNIS 4 codes: oligotrophic beech forests (G162), acidophilus oak forests (G17B), oligotrophic oak forests (G186), holly groves (G26), ferns (E531), gorse of *Ulex europaeus* (F315).

**Tabla 4.** Ecuaciones obtenidas mediante ajuste al modelo de Fourier de cinco términos y mediante coeficiente de correlación de Pearson para todas las formaciones analizadas. Códigos EUNIS 4: Hayedos oligótrofos (G162), rebollares acidófilos (G17B), bosques oligótrofos de carballo (G186), acebedas (G26), helechales (E531), tojales de *Ulex europaeus* (F315). \*\*\* probabilidad de hipótesis nula inferior a  $p=1e-8$ .

**Table 4.** Equations obtained by fitting the five-term Fourier model and using the Pearson correlation coefficient for all the formations analyzed. EUNIS 4 Codes: Oligotrophic beech forests (G162), acidophilus oak forests (G17B), oligotrophic oak forests (G186), holly groves (G26), ferns (E531), gorse of *Ulex europaeus* (F315). \*\*\* Probability of null hypothesis less than  $p=1e-8$ .

|      | Ecuación   | Coef. corr. Pearson |
|------|--|---------------------|
| G162 | $0.7137 + 0.109 \cdot \cos(x^*1) - 0.1336 \cdot \sin(x^*1) - 0.006405 \cdot \cos(2^*x^*1) + 0.009965 \cdot \sin(2^*x^*1) + 0.007652 \cdot \cos(3^*x^*1) + 0.003573 \cdot \sin(3^*x^*1) + 0.0005647 \cdot \cos(4^*x^*1) - 0.002937 \cdot \sin(4^*x^*1) + 0.001458 \cdot \cos(5^*x^*1) + 0.001188 \cdot \sin(5^*x^*1)$       | 9.99998E-01 ***     |
| G17B | $0.6514 + 0.1724 \cdot \cos(x^*1) - 0.1409 \cdot \sin(x^*1) - 0.00555 \cdot \cos(2^*x^*1) + 0.004188 \cdot \sin(2^*x^*1) + 0.004704 \cdot \cos(3^*x^*1) + 0.008983 \cdot \sin(3^*x^*1) + 0.001748 \cdot \cos(4^*x^*1) - 0.00228 \cdot \sin(4^*x^*1) + 0.001261 \cdot \cos(5^*x^*1) + 0.00163 \cdot \sin(5^*x^*1)$          | 9.99993E-01 ***     |
| G186 | $0.7384 + 0.1081 \cdot \cos(x^*1) - 0.1139 \cdot \sin(x^*1) - 0.01006 \cdot \cos(2^*x^*1) + 0.02095 \cdot \sin(2^*x^*1) + 0.004557 \cdot \cos(3^*x^*1) + 0.001927 \cdot \sin(3^*x^*1) + 0.0007649 \cdot \cos(4^*x^*1) - 0.003549 \cdot \sin(4^*x^*1) + 0.001935 \cdot \cos(5^*x^*1) + 0.00147 \cdot \sin(5^*x^*1)$         | 9.99997E-01 ***     |
| G26  | $0.8025 + 0.03877 \cdot \cos(x^*1) - 0.03452 \cdot \sin(x^*1) - 0.001387 \cdot \cos(2^*x^*1) - 0.001379 \cdot \sin(2^*x^*1) + 0.001217 \cdot \cos(3^*x^*1) + 0.001401 \cdot \sin(3^*x^*1) + 0.0004302 \cdot \cos(4^*x^*1) - 0.0003876 \cdot \sin(4^*x^*1) + 8.871e-05 \cdot \cos(5^*x^*1) + 0.0004174 \cdot \sin(5^*x^*1)$ | 9.99988E-01 ***     |
| E531 | $0.6677 + 0.0857 \cdot \cos(x^*1) - 0.1117 \cdot \sin(x^*1) - 0.009118 \cdot \cos(2^*x^*1) - 0.0005829 \cdot \sin(2^*x^*1) + 0.003372 \cdot \cos(3^*x^*1) - 0.0002574 \cdot \sin(3^*x^*1) + 0.001702 \cdot \cos(4^*x^*1) - 0.001897 \cdot \sin(4^*x^*1) + 0.001071 \cdot \cos(5^*x^*1) + 0.001402 \cdot \sin(5^*x^*1)$     | 9.99990E-01 ***     |
| F315 | $0.6928 + 0.04926 \cdot \cos(x^*1) - 0.04545 \cdot \sin(x^*1) - 0.006904 \cdot \cos(2^*x^*1) + 0.001912 \cdot \sin(2^*x^*1) - 0.0003256 \cdot \cos(3^*x^*1) - 0.0004048 \cdot \sin(3^*x^*1) + 0.002359 \cdot \cos(4^*x^*1) - 0.001884 \cdot \sin(4^*x^*1) + 0.001099 \cdot \cos(5^*x^*1) + 0.001515 \cdot \sin(5^*x^*1)$   | 9.99948E-01***      |

**Tabla 5.** Matriz de correlación entre valores promedio mensuales de cada formación. Códigos EUNIS 4: Hayedos oligotrofos (G162), rebollares acidófilos (G17B), bosques oligotrofos de carballo (G186), acebedas (G26), helechales (E531), tojales de *Ulex europaeus* (F315).

**Table 5.** Correlation matrix between monthly average values of each formation. EUNIS 4 Codes: Oligotrophic beech forests (G162), acidophilus oak forests (G17B), oligotrophic oak forests (G186), holly groves (G26), ferns (E531), gorse of *Ulex europaeus* (F315).

|      | G162  | G17B  | G186  | G26   | E531  | F315  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| G162 | 1.000 | 0.979 | 0.994 | 0.984 | 0.997 | 0.985 |
| G17B | 0.979 | 1.000 | 0.984 | 0.998 | 0.972 | 0.993 |
| G186 | 0.994 | 0.984 | 1.000 | 0.983 | 0.985 | 0.990 |
| G26  | 0.984 | 0.998 | 0.983 | 1.000 | 0.981 | 0.994 |
| E531 | 1.000 | 0.983 | 1.000 | 0.983 | 1.000 | 0.983 |
| F315 | 0.983 | 1.000 | 0.983 | 1.000 | 0.983 | 1.000 |

de abordar la parametrización de las funciones mediante métodos matemáticos más avanzados, como se discute más adelante.

A partir del análisis de correlación cruzada normalizada efectuado combinando cada una de las formaciones con las otras (G162-G17B; G162-G186; G162-G26; G162-E531; G162-F315; G17B-G186; G17B-G26; G17B-E531; G17B-F315; G186-G26; G186-E531; G186-F315; G26-E531; G26-F315; E531-F315), se obtienen resultados similares para todas las combinaciones efectuadas (Fig. S1). Los resultados muestran que las funciones promedio de todas las formaciones se encuentran en fase (el valor máximo de la función de correlación cruzada normalizada se sitúa en el valor 0 del eje de abscisas). Este hecho se produce incluso reduciendo la escala de remuestreo de la señal a valores de 0.1 radianes, lo que permite observar desplazamientos superiores a 0.1 radianes en el análisis efectuado.

### Métricas fenológicas

Los resultados obtenidos para las métricas fenológicas derivadas de las formaciones vegetales analizadas muestran valores similares para algunos de los parámetros descritos (Tabla 2) como el SOST y EOSN (Tabla 6). Los valores observados para el SOSN son más bajos en aquellas formaciones caducifolias con una estacionalidad más marcada (G17B, G162, G186), destacando la formación rebollares acidófilos (G17B) con un valor sensiblemente inferior. Estos mismos valores son notablemente más elevados para las acebedas (G26), formación perennifolia. Los valores observados de AMP, relacionados con la estacionalidad forestal, siguen este mismo patrón, siendo mayor cuanto menor es el SOSN.

En este sentido, el valor correspondiente al MAXN se muestra muy similar para todos los sistemas (sin tener en cuenta cuándo se alcanza). En los valores de AMP se obtienen notables diferencias para aquellas formaciones con una marcada estacionalidad (G17B, G162, G186) respecto a otras de carácter perennifolio (G26; Tabla 6). Del mismo modo, los valores del TIN son sensiblemente mayores en el caso de la formación perennifolia (G26) que para las caducifolias (G17B, G162, G186), aunque cabe destacar que los valores más bajos se producen en la formación marcescente de rebollares acidófilos (G17B), que mantiene una marcada estacionalidad y retraso en la adquisición del MAXN (similar para todas las formaciones arboladas; Tabla 6).

Para las dos formaciones no arboladas analizadas, helechales (E531) y tojales (F315) se observan diferencias sensibles en el MAXN con respecto a las arboladas (Tabla 6). Mientras que las masas forestales arboladas adquieren valores muy similares para este parámetro, tanto la formación herbácea (E531) como la arbus-tiva (F315) toman valores inferiores ( $\approx 5 - 10\%$ ). La formación arbus-tiva (F315) mantiene una curva muy similar a la descrita por la formación arbolada G26 (Fig. 5), ambas perennifolias, aunque con valores notablemente inferiores en todo su ciclo ( $\approx 10\%$ ). La formación herbácea (E531) muestra una curva similar a las formaciones arboladas caducifolias (G162, G186; Fig. 5), con la diferencia descrita con anterioridad para el MAXN y con signos de una pérdida de masa foliar viva más temprana que las formaciones arboladas. Esta particularidad provoca un posible "apuntamiento" de la curva en sus valores máximos y unos valores del TIN relativamente bajos.

**Tabla 6.** Resultados obtenidos para las métricas fenológicas utilizadas (unidades numéricas referidas al NDVI en porcentaje). Códigos EUNIS 4: hayedos oligotrofos (G162), rebollares acidófilos (G17B), bosques oligotrofos de carballo (G186), acebedas (G26), helechales (E531), tojales de *Ulex europaeus* (F315).

**Table 6.** Results obtained for the phenological metrics used (numerical units refer to NDVI in percentage). EUNIS 4 codes: oligotrophic beech forests (G162), acidophilus oak forests (G17B), oligotrophic oak forests (G186), holly groves (G26), ferns (E531), gorse of *Ulex europaeus* (F315).

|      | SOST  | SOSN | EOST  | EOSN | MAXT   | MAXN | DUR | AMP  | TIN  |
|------|-------|------|-------|------|--------|------|-----|------|------|
| G162 | MARZO | 0.59 | ENERO | 0.54 | JULIO  | 0.87 | 9   | 0.28 | 4.28 |
| G17B | MARZO | 0.47 | ENERO | 0.44 | AGOSTO | 0.86 | 10  | 0.39 | 4.09 |
| G186 | MARZO | 0.61 | ENERO | 0.57 | JULIO  | 0.87 | 10  | 0.26 | 4.63 |
| G26  | MARZO | 0.76 | ENERO | 0.76 | AGOSTO | 0.85 | 10  | 0.09 | 5.03 |
| E531 | MARZO | 0.57 | ENERO | 0.53 | JULIO  | 0.81 | 9   | 0.24 | 4.19 |
| F315 | MARZO | 0.64 | ENERO | 0.63 | JULIO  | 0.76 | 10  | 0.12 | 4.35 |

## Discusión

La definición de variables y métricas espectrofenológicas permite convertir las series de datos procedentes de fuentes de observación remota en indicadores del funcionamiento ecológico, abriendo nuevas vías a la obtención de resultados de predicción y seguimiento complementarios a los datos de referencia recogidos en terreno con criterio experto, difíciles de conseguir y a menudo limitantes por su disponibilidad espaciotemporal. En los últimos años, son varios los trabajos que han utilizado la LSP para definir información referente a la fenología de la vegetación (Helman 2018; Caparros-Santiago y Rodríguez-Galiano 2020; Gómez et al. 2020) y detección de cambios (Zhu 2017; Rubio-Cuadrado et al. 2021), a partir de series temporales de índices de vegetación procedentes de imágenes satelitales y sensores aerotransportados. No obstante, a pesar de la actual disponibilidad de datos y las posibilidades de la LSP como herramienta de monitoreo ambiental, muy pocos estudios han evaluado la definición matemática de curvas tipo para hábitats o especies forestales a escala regional. En este trabajo se ha abordado un análisis espectral de la fenología de una serie de hábitats forestales dominantes en la región de Cantabria, con el objetivo de identificar y describir matemáticamente respuestas diferenciales entre las tipologías analizadas que puedan ser aplicadas, en una fase posterior, a determinar la distribución y estado de conservación de los hábitats, o su evolución temporal siguiendo un marco de modelado basado en predictores ambientales y sensores remotos (Corbane et al. 2015; Álvarez-Martínez et al. 2018a; Aragonés et al. 2019). Este tipo de estudios deben complementarse con un análisis de la variabilidad dentro de cada formación o la determinación del número de años necesario para establecer curvas de referencia verdaderamente representativas, factores ligados al comportamiento diferencial de algunas formaciones en función de la edad de los individuos, la densidad de pies o las perturbaciones históricas sufridas en su rango de distribución.

De forma específica, como se demuestra en este trabajo, el uso de herramientas matemáticas permite evaluar la similitud (y las diferencias) entre curvas espectrofenológicas detectadas sobre un área concreta y, con ello, la definición de métricas específicas para cada tipología (De Keersmaecker et al. 2017). Hay que tener en cuenta, no obstante, que los indicadores obtenidos representan un modelo matemático para cada tipología de hábitat que tiende a compartir rasgos con tipologías diferentes en aquellos lugares en los que las especies presentan un funcionamiento ecosistémico y requerimientos ambientales similares (Nagendra 2001; Roelofsen et al. 2014), como ocurre con las hayas y algunas especies de roble (p.ej. carballos) en prácticamente toda el área de estudio. De este modo, algunas de las métricas definidas (Tabla 2) comparten valores similares para dos o más tipos de hábitat (p.ej. SOSN y EOSN, los niveles de actividad fotosintética al comienzo y final de la fotosíntesis medible, respectivamente), mientras que otras como el desarrollo del área foliar en la fecha de inicio de la temporada fotosintéticamente activa, su duración o la fecha de finalización, representan etapas específicas en la curva de crecimiento estacional. Por ejemplo, el valor correspondiente al MAXN, o nivel máximo de actividad fotosintética en el dosel, se muestra muy similar para todos los sistemas analizados, lo que indica una mayor relevancia del SOSN para la caracterización espacial de cubiertas forestales. La similitud para los valores observados del MAXN pueden indicar una "saturación" o falta de sensibilidad del índice NDVI en valores muy altos, en condiciones de un elevado índice de área foliar (Huete et al. 1997; Gu et al. 2013). El análisis de otros índices disponibles a partir de otras bandas de MSI (como el *Normalized Difference Red Edge Index* (NDRE) o el *Normalized Burn Ratio* (NBR) podría ofrecer una mayor sensibilidad en ciertas partes de la curva, lo que abre un campo nuevo de análisis para fases posteriores de esta línea de investigación.

Es importante señalar que el número de puntos de campo utilizados en este trabajo no es constante entre formaciones, oscilando entre los 61 puntos de los hayedos oligótrofos y los 13 puntos de

las acebedas, ya que su distribución en el área de estudio es más reducida y el esfuerzo de muestreo necesario para aumentar estas cifras sin incurrir en problemas de autocorrelación es muy elevado. Esto hace que las formaciones no se encuentren igualmente representadas por la muestra de entrenamiento, lo que dificulta las comparaciones y abre un hueco de incertidumbre que debe ser analizado en detalle en fases posteriores. Por otra parte, la selección de los puntos de muestreo no se ha realizado conforme a criterios de regionalización del territorio sujetos a factores ambientales (p. ej. climáticos o topográficos) de influencia directa en el ciclo fenológico (Bajocco et al. 2019). Esto podría tener consecuencias significativas sobre la variabilidad de las curvas obtenidas para una formación, haciendo que los patrones promedio observados pierdan representación y se produzcan similitudes entre diferentes tipologías para ámbitos de distribución completos a escala biogeográfica. Esta cuestión es muy relevante ya que la selección de una muestra representativa para cada una de las formaciones, en un óptimo estado de conservación desde el punto de vista compositivo, estructural y funcional, puede permitir identificar desviaciones del ciclo relacionadas con disfunciones de la biomasa foliar viva, entre otros aspectos, siempre y cuando estos cambios superen el valor umbral de incertidumbre asociado a la muestra. Del mismo modo, la existencia de datos *in situ* correspondientes a distintos grados de alteración de una formación vegetal podría conducir a la obtención de respuestas espectrofenológicas relacionadas con alteraciones del estado de conservación de esa misma tipología y, por lo tanto, de baja utilidad para la detección y seguimiento de tipos de hábitat.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de correlación cruzada normalizada indican que las funciones promedio obtenidas por formación se encuentran en fase. Parece poco probable que esta coincidencia pudiera tener origen en el empleo de una elevada escala de análisis numérico, ya que las funciones han sido muestreadas con valores ciertamente bajos (0.1 radianes). El empleo de una muestra no estratificada para cada formación, y teniendo en cuenta las variables ambientales que tienen influencia directa sobre las variaciones del ciclo fenológico, puede haber ejercido un efecto suavizador de las particularidades propias de cada formación respecto del "adelanto" o "retraso" del ciclo, mostrando una falsa coincidencia de la fase para las funciones analizadas en base a un efecto de regionalización del territorio (Bajocco et al. 2019). En cualquier caso, esta cuestión debe ser analizada de forma específica ya que podría demostrar si las variables ambientales dentro de una formación (p. ej. altitud, orientación, etc.) tienen o no un efecto significativo sobre la fase, o sobre otros rasgos como la integral o apuntamiento de la curva. Esta hipótesis se ve reforzada por la coincidencia observada entre formaciones cuya muestra se desarrolla sobre gradientes ambientales bien definidos (p. ej. G162 y G17B) (Misra et al. 2020).

Por último, es importante resaltar que los resultados obtenidos a partir del análisis de indicadores espectrofenológicos pueden no mostrar el verdadero potencial de las curvas. El empleo de métodos matemáticos de análisis más avanzados podría ofrecer resultados más precisos y concluyentes. En este sentido, la naturaleza senoidal de la señal y los buenos resultados obtenidos en su ajuste mediante la transformada de Fourier (ecuación 14) podrían indicar una mejora de la discriminación de las señales a través de un análisis específico en el dominio de las frecuencias. Mediante este análisis, las curvas podrían mostrar cierta información que no resulta evidente a través del dominio temporal (ecuación 15).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{ec. 15})$$

Estos análisis avanzados podrían desvelar aspectos ambientales responsables de la variabilidad observada en la composición, estructura y funcionamiento de las comunidades vegetales y especies dominantes, abriendo un abanico de posibilidades para la caracterización de ecosistemas forestales (Gautam y Mehta 2007).



## Conclusiones

Los resultados obtenidos para los valores promedio y las medidas de dispersión de los datos mensuales del índice considerado (NDVI) en periodo histórico analizado y por formación vegetal, indican que el método aplicado para el tratamiento, corrección y procesamiento de datos ofrece resultados estables y coherentes a nivel espectrot temporal. Las curvas promedio obtenidas, asumiendo como representativa la variabilidad inter e intra anual observada, ofrecen una buena estimación de la respuesta espectral para los puntos de muestreo utilizados. Podemos concluir de este modo que el empleo de datos multiespectrales sometidos a un exhaustivo control de calidad, mediante corrección y filtrado de la nubosidad y otras alteraciones de la señal con criterio experto, ofrece resultados coherentes y estables en el tiempo para las distintas formaciones analizadas.

Por otra parte, a través del análisis de correlación cruzada efectuado entre todas las formaciones se constata que las curvas espectrales promedio (NDVI) obtenidas se encuentran en fase, lo que puede indicar que no existe una diferencia significativa de desfase en las curvas promedio de referencia entre formaciones. En cualquier caso, este hecho puede estar condicionado por la obtención de curvas de referencia promedios en base a una regionalización del territorio.

La parametrización de las curvas obtenidas a través de las principales métricas fenológicas muestra diferencias numéricas entre formaciones. Se constata que algunos de estos parámetros fenológicos permiten identificar rasgos particulares de las curvas que pueden ser empleados para la discriminación de tipologías. En cualquier caso, aunque estas métricas identifican de forma discreta algunos de los rasgos más destacables de las curvas pudiéndose emplear como herramienta de discriminación, la disposición de ecuaciones matemáticas representativas de cada una de las formaciones puede permitir un análisis más profundo de este tipo de señales. En este sentido, la descomposición de funciones seno-oidales en sus distintas componentes armónicas y el análisis no únicamente en el dominio del tiempo sino también en el de la frecuencia puede ofrecer una información más completa y representativa.

En síntesis, la obtención de curvas espectrofenológicas promedio derivadas de uno o más índices espectrales, que demuestren ser representativas de formaciones vegetales en determinados contextos territoriales de referencia y bajo determinados grados de desarrollo y estados de conservación, pueden resultar de gran utilidad como herramientas de referencia para la monitorización de tendencias o anomalías de parámetros funcionales relacionados con el estado de conservación de las formaciones vegetales a escala regional.

## Contribuciones de los autores

David López Trullén y Jose Manuel Álvarez-Martínez comparten la autoría principal. David López Trullén y José Manuel Álvarez-Martínez: conceptualización, metodología, análisis formal y redacción – borrador original, revisión y edición. Jesús David Sánchez Labrador: conceptualización – revisión y edición. Borja Jiménez Alfaro: conceptualización – revisión y edición. Ignacio Pérez Silos: conceptualización – revisión y edición. Gonzalo Hernández Romero: conceptualización – revisión y edición. José Barquín: conceptualización – revisión y edición.

## Agradecimientos

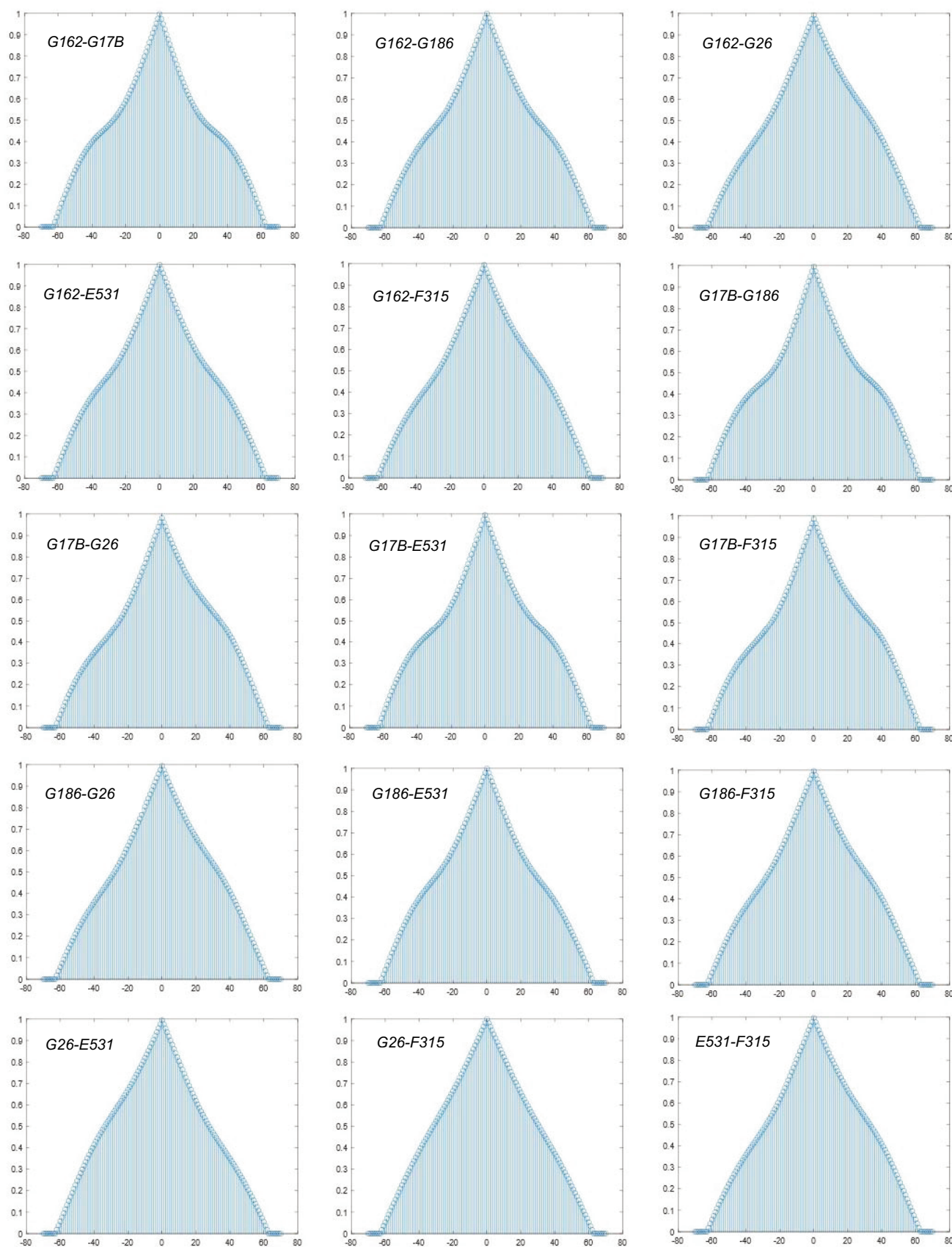
Proyecto WATERLANDS", código PID2019-107085RB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por FEDER; "A way of making Europe, that seeks to understand the linkages between water (river) and land cover (forest) dynamics in mountain systems" <https://waterlands.ihcantabria.com/>.

## Referencias

- Alberdi, I., Sandoval, V., Condes, S., Cañellas, I., Vallejo, R. 2016. El Inventario Forestal Nacional español, una herramienta para el conocimiento, la gestión y la conservación de los ecosistemas forestales arbolados. *Ecosistemas* 25(3): 88-97. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.10>
- Álvarez-Martínez, J.M., Stoorvogel, J.J., Suárez-Seoane, S., de Luis Calabuig, E. 2010. Uncertainty analysis as a tool for refining land dynamics modelling on changing landscapes: a case study in a Spanish Natural Park. *Landscape Ecology* 25:1385-1404.
- Álvarez-Martínez, J.M., Suárez-Seoane, S., De Luis Calabuig, E. 2011. Modelling the risk of land cover change from environmental and socio-economic drivers in heterogeneous and changing landscapes: The role of uncertainty. *Landscape and Urban Planning* 101:108-119.
- Álvarez-Martínez, J.M., Suárez-Seoane, S., Stoorvogel, J.J., de Luis Calabuig, E. 2014. Influence of land use and climate on recent forest expansion: a case study in the E urosiberian-M editerranean limit of north-west Spain. *Journal of Ecology* 102:905-919.
- Álvarez-Martínez, J.M., Jiménez Alfaro, B., Barquín, J., Ondiviela, B., Recio, M., Silió-Calzada, A., Juanes, J.A. 2018a. Modelling the area of occupancy of habitat types with remote sensing. *Methods in Ecology and Evolution* 9:580-593.
- Álvarez-Martínez, J.M., Silió-Calzada, A., Barquín, J. 2018b. Can training data counteract topographic effects in supervised image classification? A sensitivity analysis in the Cantabrian Mountains (Spain). *International Journal of Remote Sensing* 1: 1-24
- Andres, L., Salas, W.A., Skole, D. 1994. Fourier analysis of multi-temporal AVHRR data applied to a land cover classification. *International Journal of Remote Sensing* 15:1115-1121.
- 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.
- Badeck, F.W., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J., Sitch, S. 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New phytologist* 162:295-309.
- Caparros-Santiago J., Rodríguez-Galiano V. 2020. Vegetation phenology from satellite imagery: the case of the Iberian Peninsula and Balearic Islands (2001-2017). *Revista de Teledetección*:25-36.
- Bajocco, S., Ferrara, C., Alivernini, A., Bascietto, M., Ricotta, C. 2019. Remotely-sensed phenology of Italian forests: Going beyond the species. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 74: 314-321.
- Cervellini, M., Zannini, P., Di Musciano, M., Fattorini, S., Jiménez-Alfaro, B., Rocchini, D., Field, R., et al. 2020. A grid-based map for the Biogeographical Regions of Europe. *Biodiversity Data Journal* 8: e53720. <https://doi.org/10.3897/BDJ.8.e53720>
- Chaves, M.E.D., Picoli, M.C.A., Sanches I.D. 2020. Recent Applications of Landsat 8/OLI and Sentinel-2/MSI for Land Use and Land Cover Mapping: A Systematic Review. *Remote Sensing* 12:3062.
- Corbane, C., Lang, S., Pipkins, K., Alleaume, S., Deshayes, M., Millán, V.P.E.J., Strasser, T., et al. 2015. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status—New opportunities and challenges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 37:7-16.
- Creed, I.F., Van Noordwijk, M. 2018. *Forest and water on a changing planet: Vulnerability, adaptation and governance opportunities*. IUFRO World Series Volume 38. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), Viena, Austria. 192 p.
- 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* 11:779-790.
- De Keersmaecker, W., Lhermitte, S., Hill, M.J., Tits, L., Coppin, P., Somers, B. 2017. Assessment of Regional Vegetation Response to Climate Anomalies: A Case Study for Australia Using GIMMS NDVI Time Series between 1982 and 2006. *Remote Sensing* 9:34.
- De Oliveira, J.C., Neves Epiphanyo, J.C., Daleles Rennó, C. 2014. Window Regression: A Spatial-Temporal Analysis to Estimate Pixels Classified as Low-Quality in MODIS NDVI Time Series. *Remote Sensing* 6, no. 4: 3123-3142. <https://doi.org/10.3390/rs6043123>
- Ding, J., Nilsson, O. 2016. Molecular regulation of phenology in trees—because the seasons they are a-changin'. *Current Opinion in Plant Biology* 29:73-79.

- EUNIS 2021-2022. *EUNIS habitat type hierarchical view (marine version 2022 & terrestrial version 2021)*. European Nature Information System. European Environment Agency, European Biodiversity data centre (BDC). <http://eunis.eea.europa.eu>
- Faucqueur, L., Morin, N., Masse, A., Remy, P.-Y., Hugé, J., Kenner, C., Dazin, F., et al. 2019. *A new Copernicus high resolution layer at pan-European scale: small woody features*. En: *Proceedings Volume 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI; 111490X*. <https://doi.org/10.1117/12.2532853>
- Fauvel, M., Lopes, M., Dubo, T., Rivers-Moore, J., Frison, P.-L., Gross, N., Ouin, A. 2020. Prediction of plant diversity in grasslands using Sentinel-1 and -2 satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 237:111536.
- Fenu, G., Bacchetta, G., Giacanelli, V., Gargano, D., Montagnani, C., Orsenigo, S., Cogoni, D., et al. 2017. Conserving plant diversity in Europe: outcomes, criticisms and perspectives of the Habitats Directive application in Italy. *Biodiversity and Conservation* 26:309-328.
- Fisher, J.I., Mustard, J.F., Vadeboncoeur, M.A. 2006. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment* 100:265-279.
- Franklin, J. 2013. Mapping vegetation from landscape to regional scales. *Vegetation Ecology, Second Edition*: 486-508.
- Gautam, A., Mehta, N. 2015. A review on remote sensing technique: concept and principles. *International Journal for Research in Emerging Science and Technology* 2(5), 1-6.
- 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*:71-80.
- Goward, S.N., Turner, S., Dye, D.G., Liang, S. 1994. The University of Maryland improved Global Vegetation Index product. *International Journal of Remote Sensing* 15:3365-3395.
- Gu, Y., Wylie, B.K., Howard, D.M., Phuyal, K.P., Ji, L. 2013. NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. *Ecological Indicators* 30:1-6.
- Hanski, I. 2011. Habitat Loss, the Dynamics of Biodiversity, and a Perspective on Conservation. *AMBIO* 40:248-255.
- Helman, D. 2018. Land surface phenology: What do we really 'see' from space? *Science of The Total Environment* 618:665-673.
- Hmimina, G., Dufrêne, E., Pontailier, J.Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., de Grandcourt, A., et al. 2013. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment* 132:145-158.
- Hird, J.N., McDermid, G.J. 2009. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment* 113:248-258.
- Huete, A.R., HuiQing, L., Leeuwen, W.J.D.v. 1997. The use of vegetation indices in forested regions: issues of linearity and saturation. En: *IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development*, pp 1966-1968 (vol.4). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.606359>
- Jakubauskas, M.E., Legates, D.R., Kastens, J.H. 2001. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 67:461-470.
- Jiménez-Alfaro, B., Suárez-Seoane, S., Chytrý, M., Hennekens, S.M., Willner, W., Hájek, M., Agrillo, E., et al. 2018. Modelling the distribution and compositional variation of plant communities at the continental scale. *Diversity and Distributions* 24:978-990.
- Kaufman, Y.J., Tarré, D., Gordon, H.R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouin, R., Grassl, H., et al. 1997. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102:16815-16830.
- Kovalskyy, V., Roy, D.P., Zhang, X.Y., Ju, J. 2012. The suitability of multi-temporal web-enabled Landsat data NDVI for phenological monitoring – a comparison with flux tower and MODIS NDVI. *Remote Sensing Letters* 3:325-334.
- Levin, S.A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* 73:1943-1967.
- Menzel, A. 2002. Phenology: its importance to the global change community. *Climatic change* 54:379.
- Misra, G., Cawkwell, F., Wingler, A. 2020. Status of phenological research using Sentinel-2 data: A review. *Remote Sensing* 12: 2760.
- Moss, D. 2008. EUNIS habitat classification—a guide for users. *European Topic Centre on Biological Diversity*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eunis-habitat-classification-1/documentation/eunis-habitat-classification-users-guide-v2.pdf>
- Nagendra, H. 2001. Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing* 22:2377-2400.
- Pérez-Silos, I., Álvarez-Martínez, J.M., Barquin, J. 2019. Modelling riparian forest distribution and composition to entire river networks. *Applied Vegetation Science* 22:508-521.
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20:503-510.
- Roelofsens, H.D., Kooistra, L., van Bodegom, P.M., Verrelst, J., Krol, J., Witte, J.-P.M. 2014. Mapping a priori defined plant associations using remotely sensed vegetation characteristics. *Remote Sensing of Environment* 140:639-651.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En: *3rd ERTS Symposium*, Vol. 1, Sect. A, pp. 309-317. NASA Goddard Space Flight Center. Washington DC, Estados Unidos. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>
- Rubio-Cuadrado, Á., Gómez, C., Rodríguez-Calcerrada, J., Perea, R., Goraliza, G.G., Camarero, J.J., Montes, F., et al. 2021. Differential response of oak and beech to late frost damage: an integrated analysis from organ to forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 297:108243.
- Sevillano Marco, E., Herrmann, D., Schwab, K., Schweitzer, K., Almengor, R., Berndt, F., Sommer, C., et al. 2019. Improvement of existing and development of future Copernicus land monitoring products—the ECO-LASS project. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W16*, 201–208, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-201-2019>
- Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., Macomber, S.A. 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment* 75:230-244.
- Sullivan, S. 1996. Towards a non-equilibrium ecology : perspectives from an arid land. *Journal of biogeography* 23:1-5.
- Szostak, M., Hawryło, P., Piela, D. 2018. Using of Sentinel-2 images for automation of the forest succession detection. *European Journal of Remote Sensing* 51:142-149.
- Teillet, P., Guindon, B., Goodenough, D. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 8:84-106.
- Velleman, P.F. 1980. Definition and Comparison of Robust Nonlinear Data Smoothing Algorithms. *Journal of the American Statistical Association* 75:609-615.
- Wiens, J., Sutter, R., Anderson, M., Blanchard, J., Barnett, A., Aguilar-Amuchastegui, N., Avery, C., et al. 2009. Selecting and conserving lands for biodiversity: The role of remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 113:1370-1381.
- Worrall, J.J., Rehfeldt, G.E., Hamann, A., Hogg, E.H., Marchetti, S.B., Michaelian, M., Gray, L.K. 2013. Recent declines of *Populus tremuloides* in North America linked to climate. *Forest Ecology and Management* 299: 35–51.
- Zeng, L., Wardlow, B.D., Xiang, D., Hu, S., Li, D. 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment* 237:111511.
- Zhu, Z. 2017. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130:370-384.

## Apéndice / Appendix



**Figura S1.** Funciones de correlación cruzada normalizada para la combinación de todas las formaciones. Las formaciones analizadas se indican en la parte superior izquierda de cada uno de los gráficos. Tipología de hábitat forestal (Códigos EUNIS4): Hayedos oligotrofos G162; Rebollares acidófilos, G17B, Bosques oligotrofos de carballo, G186; Acebedas G26; Helechales E531; Tojales de *Ulex europaeus*, F315

**Figure S1.** Normalized cross-correlation functions for the combination of all forest types. The habitats analyzed are indicated in the upper left of each of the graphs. Forest habitat typology (EUNIS4 codes): Oligotrophic beech forests G162; Acidophilic oak groves, G17B, Oligotrophic carob forests, G186; Olive groves G26; Helechales E531; *Ulex europaeus* groves, F315.