



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1765

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Seguimiento espectrofenológico de bosques en la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV): evaluación de NDVI y EVI con datos HLS

SÁNCHEZ ALBEROLA, J. (1), SCHWENDTNER GARCÍA, O. (1), BARNARD BELENGUER, B. (1) y ATUTXA LAPATZA, J. L. (2)

(1) Bioma Forestal.

(2) Departamento de Industria, Transición Energética y Sostenibilidad. Gobierno Vasco.

Resumen

El análisis fenológico de la vegetación forestal es crucial para la conservación, pero los estudios de campo enfrentan limitaciones debido a la carga de trabajo, lo que ha impulsado el uso de técnicas de teledetección. La espectrofenología evalúa la respuesta espectral del follaje, y se han desarrollado metodologías para crear series temporales de índices como NDVI y EVI. Sin embargo, la obtención de series densas y de calidad sigue siendo un desafío. La NASA ha creado el producto HLS, que combina imágenes de los satélites Landsat-8/9 y Sentinel-2A/B, ofreciendo un continuo de datos con una resolución espacial de 30 metros por píxel. En este trabajo se evaluó la capacidad del HLS para generar curvas espectrofenológicas promedio de los Hábitats de Interés Comunitario: HIC9120 (Hayedos acidófilos atlánticos), HIC9230 (Robledales galaico-portugueses reducidos a bosques de *Quercus pyrenaica*) y HIC9340 (Bosques de *Quercus ilex* en entornos mediterráneos) en la Comunidad Autónoma del País Vasco, utilizando series temporales de NDVI y EVI ajustadas mediante modelos aditivos generalizados (GAM). Los ajustes obtenidos mostraron una alta calidad para frondosas, pero menor para especies perennes, especialmente con el índice NDVI. A pesar de la reducción en la resolución espacial, el HLS permite configurar curvas espectrofenológicas efectivas gracias a la abundancia de imágenes y píxeles de calidad. Este enfoque es útil para definir curvas fenológicas tipo y establecer sistemas regionales de seguimiento de hábitats.

Palabras clave

Teledetección, fenología, monitoreo, conservación.

1. Introducción

La fenología es la ciencia que investiga los fenómenos periódicos asociados al ciclo vital de los organismos en relación con los factores ambientales. En la vegetación forestal arbórea, los cambios fenológicos describen eventos como la brotación o la caída de las hojas reflejando la respuesta de las plantas a las condiciones ambientales en las que crecen. En un contexto de cambio climático, comprender cómo las especies manifiestan estos cambios es crucial para definir estrategias de conservación, ya que estas respuestas tienen implicaciones en el funcionamiento de los ecosistemas (BADECK *et al.*, 2004).

Tradicionalmente, el estudio de la fenología de especies forestales ha estado basada en observaciones directas en campo, un enfoque que requiere un gran esfuerzo vinculado a la necesidad de tomar datos recurrentes en entornos de difícil acceso. En España, un ejemplo de estudio fenológico forestal es el desarrollado por el OANP (Organismo Autónomo de Parques Nacionales) que desde 2007 monitorea el estado y desarrollo de las fases anuales de la vegetación en puntos seleccionados. Según el último informe publicado por LEO y ROLLÁN (2023), los datos de este estudio muestran una marcada variabilidad interanual en la región mediterránea, influida principalmente por la temperatura y el régimen de lluvias,



mientras que en la región eurosiberiana el factor predominante es la orografía, salvo episodios climáticos notables. Estas observaciones resaltan la necesidad de implementar herramientas más eficientes y menos costosas para capturar estas dinámicas geográficas permitiendo mejorar el conocimiento fenológico y el seguimiento de las especies y los hábitats que conforman.

En este contexto, la teledetección espacial emerge como una herramienta clave de monitoreo de los ecosistemas ya que los sensores remotos ofrecen un conjunto de técnicas para detectar y caracterizar a distancia objetos sobre la superficie terrestre (PÉREZ *et al.*, 2022). Entre sus múltiples ventajas destaca su capacidad para proporcionar datos continuos en el espacio y en el tiempo, lo cual amplía enormemente las posibilidades de análisis en estudios donde la componente espacial es clave (CHUVIECO, 1995). Apoyándose en las capacidades espaciales de los sensores remotos, fue desarrollado el análisis espectrofenológico de los ecosistemas. Este sistema evalúa la respuesta espectral del follaje en un periodo y lugar determinado, enfoque que, de acuerdo con algunos autores, permite identificar variaciones espaciales en los fenómenos fenológicos de las especies (BUCHA & KOREN, 2017), facilitando incluso la detección de anomalías y tendencias provocadas por perturbaciones (GÓMEZ *et al.*, 2022).

La dinámica fenológica de la respuesta espectral de una masa vegetal puede evaluarse utilizando series temporales de índices de vegetación (BANSKOTA *et al.*, 2014; KOWASLKI *et al.*, 2022). Estos índices son combinaciones matemáticas de distintas bandas del espectro óptico. Entre ellos, el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ha sido el más utilizado (SOUZA *et al.*, 2013; KOWALSKI *et al.*, 2022) debido a su capacidad para reflejar las variaciones en la absorción y reflexión clorofílica utilizando las bandas del infrarrojo cercano y el rojo. Sin embargo, algunos autores han demostrado que el NDVI tiene limitaciones en áreas con una elevada fracción de cabida cubierta (ZANG *et al.*, 2010), lo que destaca la necesidad de considerar índices alternativos como el EVI (Enhanced Vegetation Index) para evaluar la respuesta espectral en estas condiciones (PETTORELLI *et al.*, 2005). De cualquier modo, obtener series temporales de índices de vegetación resulta valioso para analizar formaciones vegetales en contextos geográficos específicos y monitorear su estado de conservación (LÓPEZ *et al.*, 2022).

Las misiones de observación de la tierra representan una fuente inagotable de datos espaciales y temporales. Desde 2017, Sentinel-2 ha capturado imágenes con un intervalo temporal aproximado de cinco días, generando una gran cantidad de datos disponibles a una resolución espacial de hasta 10x10 metros de tamaño de píxel. Por su parte, la misión Landsat lleva mucho más tiempo en funcionamiento, sin embargo, desde el lanzamiento de Landsat 8 (2013) ha incorporado mejoras significativas en los sensores ópticos y térmicos, como el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), ofreciendo imágenes más precisas y detalladas y proporcionando datos de alta calidad para el monitoreo. En definitiva, estas imágenes han sido la base de muchos estudios geoespaciales en general y específicamente para el desarrollo de series temporales de índices de vegetación (KOWALSKI *et al.*, 2022, LÓPEZ *et al.*, 2022; GRABSKA-SZWAGRZYK & TYMINSKA-CZABANSKA, 2023). A pesar de la alta potencialidad de ambos sensores para la ejecución de estudios espectrofenológicos, las condiciones atmosféricas pueden afectar la calidad de las imágenes, limitando la conformación de series temporales completas, razón por la cual, algunos autores han planteado la necesidad de conformar series combinadas de Sentinel 2 y Landsat, lo cual incrementa el potencial para capturar la fenología anual a gran escala. (LI & ROY, 2017;



KOWALSKI *et al.*, 2022).

Recientemente, la NASA ha desarrollado el producto HLS (Harmonized Landsat and Sentinel-2), que combina datos de los satélites Landsat-8/9 y Sentinel-2A/B mediante algoritmos avanzados. El producto HLS genera un registro continuo de reflectancia de superficie mediante corrección atmosférica, enmascaramiento de nubes y sombras, georreferenciación, normalización BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) y ajuste de banda de paso. La versión 2.0 de HLS ofrece cobertura global con observaciones cada tres días en el ecuador, aumentando su frecuencia hacia latitudes más altas. Aunque reduce la resolución espacial de Sentinel 2 hasta 30×30 metros, mantiene la resolución espectral de los datos originales ofreciendo la oportunidad de incrementar la cantidad de datos para estudios espectrofenológicos. Asimismo, HLS facilita la descarga y uso de los datos, incluso para usuarios con poca experiencia, y pretende incluir en un futuro cercano productos procesados como NDVI, EVI, SAVI entre otros índices espectrales, optimizando su aplicación en programas de monitoreo de bosques y ecosistemas por las administraciones competentes.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es generar curvas espectrofenológicas anuales promedio para algunas de las formaciones arboladas más representativas de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), utilizando como entrada los datos del sistema HLS para obtener series temporales de los índices NDVI y EVI.

Específicamente el estudio pretende evaluar la viabilidad de establecer indicadores regionales de referencia que permitan identificar fenómenos fenológicos anómalos en Hábitats de Interés Comunitario (Bosques). El proyecto busca proporcionar una base técnica para ser utilizada en el futuro en el desarrollo de un sistema de monitoreo espectral de los ecosistemas forestales de este territorio, promoviendo así un enfoque objetivo, preciso y sostenible para su seguimiento y gestión.

3. Metodología

El estudio ha sido desarrollado en la comunidad autónoma del País Vasco (CAPV) tomando como muestras piloto para el estudio los siguientes Hábitats de Interés Comunitario (bosques): HIC9120 (Hayedos acidófilos atlánticos), HIC9230 (Robledales galaicoportugueses reducidos a bosques de *Quercus pyrenaica*) y, HIC9340 (Bosques de *Quercus ilex* de entornos mediterráneos).

El área de influencia del análisis quedó delimitada a partir de la superficie ocupada cada uno de los HIC de acuerdo con la cartografía oficial de la región de la CAPV. Sobre cada hábitat fue establecida una red de puntos de muestreo para la extracción de los datos espectrales. La ubicación de una parte de los puntos se hizo coincidir con parcelas de la Red de Parcelas de Seguimiento de Hábitats de Interés Comunitario preestablecida en el territorio como forma de asegurar que el hábitat muestreado fuera efectivamente el elegido. Posteriormente se densificó la muestra repartiendo puntos aleatorios sobre teselas de espacios Red Natura 2000 que no estaban representados y donde el hábitat en cuestión se considera elemento clave de conservación de estos espacios de acuerdo con los planes de gestión de estos. Como resultado fue obtenida información de 99 puntos en el HIC9120, 72 puntos en el H9230 y 79 puntos en el HIC9340.



El producto utilizado para obtener información espectral fue el ya mencionado HLS de la NASA, utilizando todas las imágenes existentes que abarcaban el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2018 y el 31 de diciembre de 2023. La información HLS se subdivide en dos tipos de productos, L30 y S30, dependiendo de si provienen respectivamente de la misión Landsat o de la misión Sentinel. El producto L30 consta de imágenes de reflectancia en superficie y temperatura de brillo derivadas de todas las entradas de Landsat L1TP. Este producto está tileado según el mosaico de Sentinel-2 y tiene una resolución espacial de 30 metros. Por otro lado, S30 es el producto derivado del nivel de procesamiento L1C de Sentinel-2, remuestreado a una resolución de 30 metros. La reflectancia de superficie de Sentinel-2 en las bandas comunes de Landsat/Sentinel se ajusta para corregir las diferencias espectrales entre ambos sensores. Los dos productos ofrecen una cobertura denominada QA que permite diferenciar la calidad del píxel <https://hls.gsfc.nasa.gov/>.

La descarga de datos fue llevada a cabo utilizando la aplicación AppEARS (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples) de la NASA, que ofrece una forma sencilla de obtener información de distintas fuentes satelitales a partir de muestras de puntos con coordenadas geográficas concretas, obteniendo resultados en formato CSV. Las solicitudes enviadas ofrecen la posibilidad de descargar exclusivamente las bandas espectrales deseadas de cada subproducto HLS, sin la necesidad de obtener todas las bandas disponibles. Por este motivo, se solicitaron únicamente aquellas necesarias para llevar a cabo el cálculo de los índices de vegetación NDVI y EVI y las bandas QA referentes a la calidad de la información. A partir de la información de partida, fueron calculados los índices de vegetación NDVI y EVI para cada punto y fecha utilizando únicamente los valores de calidad máxima (valor 64 de la banda QA) y utilizando las siguientes ecuaciones: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$; $EVI = 2,5 * (NIR - RED) / ((NIR + 6 * RED - 7,5 * BLUE) + 1)$.

Una vez calculados los índices espectrales fueron preparadas series temporales de tipo irregular (con datos faltantes) para todo el periodo definido y tipo de hábitat, utilizando para evitar ambigüedades el denominado DOY (día del año del 1-365) precedido del año correspondiente. A partir de las anteriores fueron construidas series anuales promedio utilizando la media de las observaciones de cada día en los distintos años, con objeto de poder ajustar una curva espectrofenológica anual promedio de cada HIC. Este trabajo fue realizado con apoyo del software R core team (2023) y específicamente de las librerías tidyverse (WICKHAM *et al.*, 2019) y lubridate (GROLEMUND & WICKHAM, 2011).

Configuradas las series temporales de cada índice, fueron ajustados modelos aditivos generalizados (GAM) independientes para cada año y tipo de hábitat (en adelante curvas independientes), así como para el año promedio (en adelante curvas promedio), siendo este el objetivo principal del estudio. A pesar de que en la literatura científica existen diferentes metodologías para el ajuste de curvas espectrofenológicas a partir de series temporales de índices de vegetación, pocas de ellas permiten el uso de series de tiempo irregulares sin la necesidad de rellenar los huecos incompletos en la cadena de datos, y, además, estos modelos han sido utilizados en estudios similares con resultados satisfactorios (KOWALSKI *et al.*, 2022; GRABSKA - SZWAGRZYK & TYMINSKA-CZABANSKA, 2023). El ajuste de la función GAM fue llevado a cabo con el paquete mgcv en R (WOOD, 2017) mediante el método de suavizado *thin plate regression splines* establecido por defecto.



Por último, una vez ajustadas las curvas espectrofenológicas fueron calculadas sobre las mismas diferentes métricas fenológicas con el objetivo de establecer indicadores de referencia comparables en distintos años y periodos lo que facilita la implementación en un programa de monitoreo de las especies elegidas. Específicamente fueron calculadas: MAXN, valor máximo anual; MAXT, DOY en el que se produce MAXN; SOSN, diferencial máximo positivo tras la fase de parada vegetativa invernal; SOST, DOY en el que se produce SOSN; EOSN, diferencial máximo negativo tras el periodo fotosintético; EOST, DOY en el que se produce EOSN.

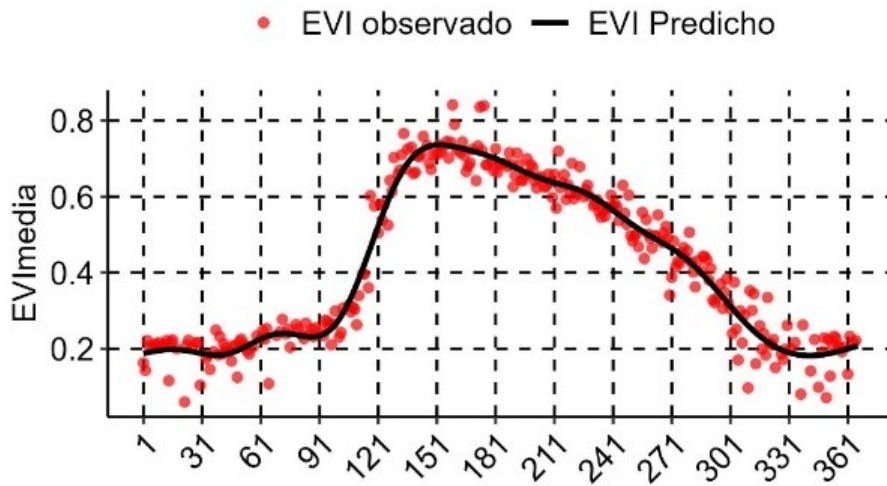
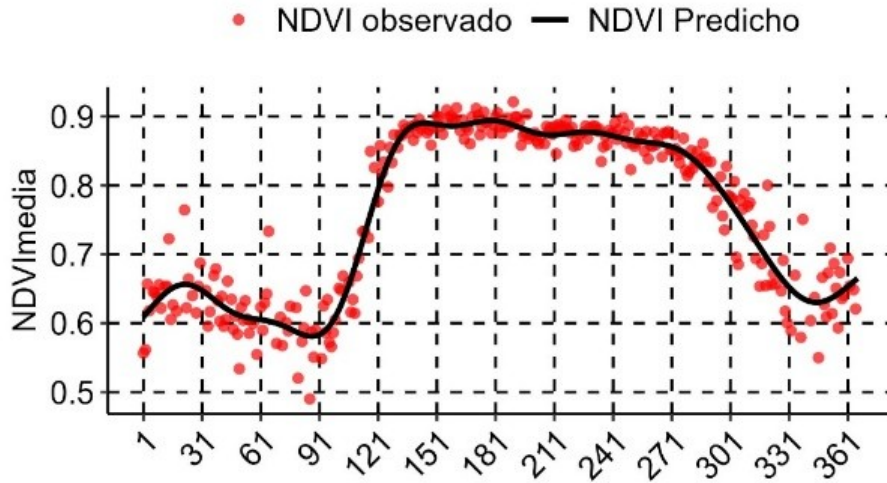
4. Resultados

Las curvas espectrofenológicas promedio ajustadas para los Hábitat de Interés Comunitario HIC9120, HIC9230 y HIC9340 fueron obtenidas a partir de un total respectivo de 298, 308 y 289 datos repartidos en el conjunto anual de un año de referencia de 1 – 365 días. El número de datos disponible para las curvas ejecutadas sobre años independientes varió entre 79 – 116 para el HIC9120, entre 84 -110 para el HIC9230 y entre 73 – 107 para el HIC9340. En lo que respecta al resultado del coeficiente de determinación los valores en las curvas promedio alcanzaron 0,93 en NDVI y 0,95 en EVI para el HIC9120, 0,91 en NDVI y 0,93 en EVI para el HIC9230 y 0,095 en NDVI y 0,5230 en EVI para el HIC9340. Los resultados de este estadístico en los modelos anuales independientes se encontraron en un rango de valor similar a los obtenidos para las curvas promedio al menos para el HIC9120 y el HIC9230 y algo más bajos para HIC9340 (Tabla 1).

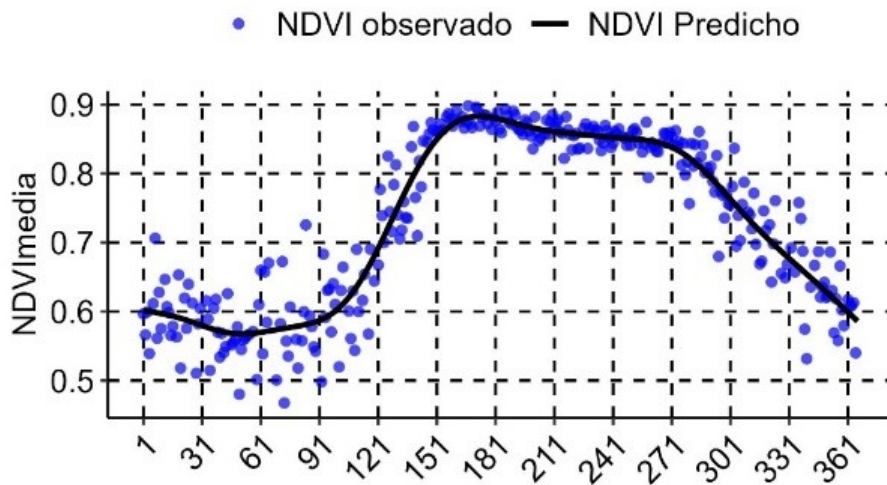
Tabla 1. Número de datos y R^2 ajustado obtenido en las diferentes curvas espectrofenológicas

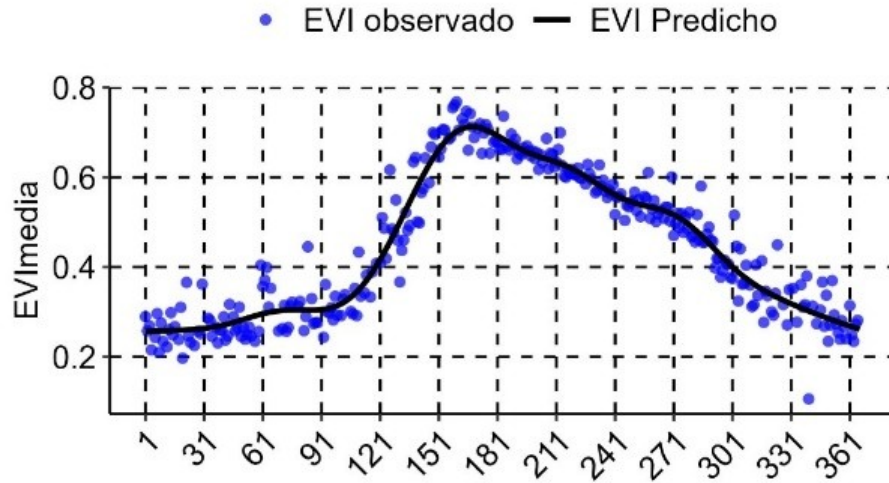
HIC	Estadístico	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Promedio
	n	79	92	90	85	116	102	298
9210	R ² NDVI	0,93	0,96	0,91	0,94	0,92	0,93	0,93
	R ² EVI	0,93	0,93	0,96	0,96	0,94	0,94	0,95
	n	84	91	87	92	110	98	308
9230	R ² NDVI	0,91	0,91	0,91	0,84	0,90	0,94	0,91
	R ² EVI	0,92	0,91	0,92	0,86	0,96	0,94	0,93
	n	73	83	81	87	107	99	289
9340	R ² NDVI	0,014	0,055	0,003	-0,001	0,022	0,048	0,095
	R ² EVI	0,44	0,34	0,54	0,22	0,39	0,21	0,52

(A)



(B)





(C)

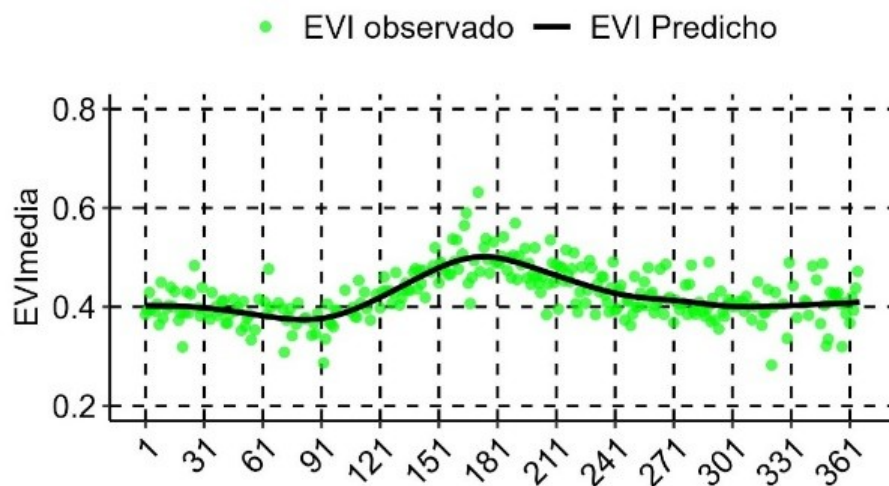
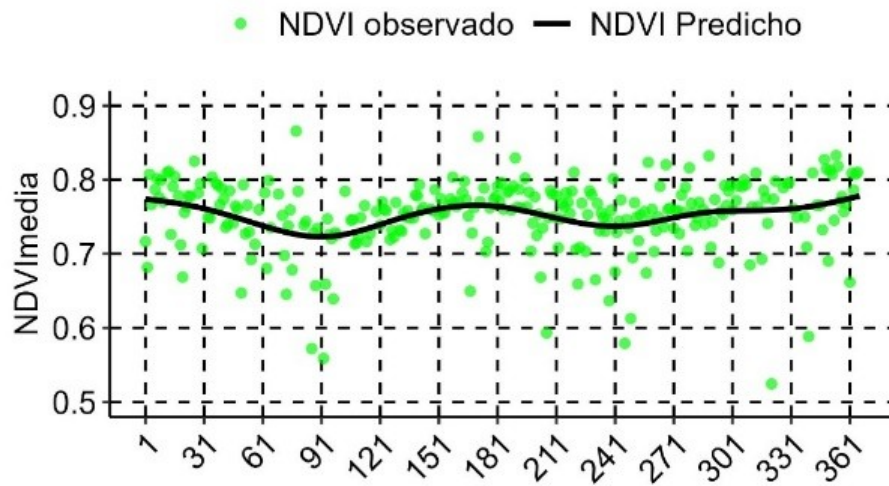


Figura 1. Curvas espectrofenológicas promedio ajustadas para los índices NDVI y EVI en relación con los valores observados en (A) HIC9120, (B) HIC9230 y (C) HIC9340.

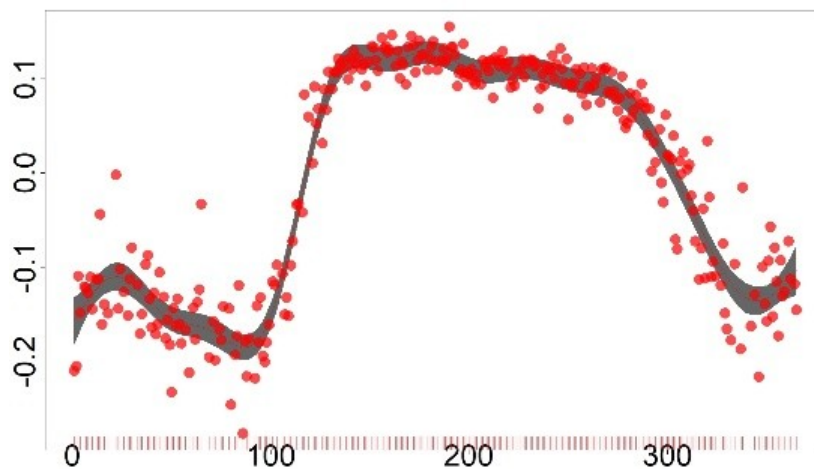
Las curvas promedio ajustadas para las especies caducifolias mostraron ambas

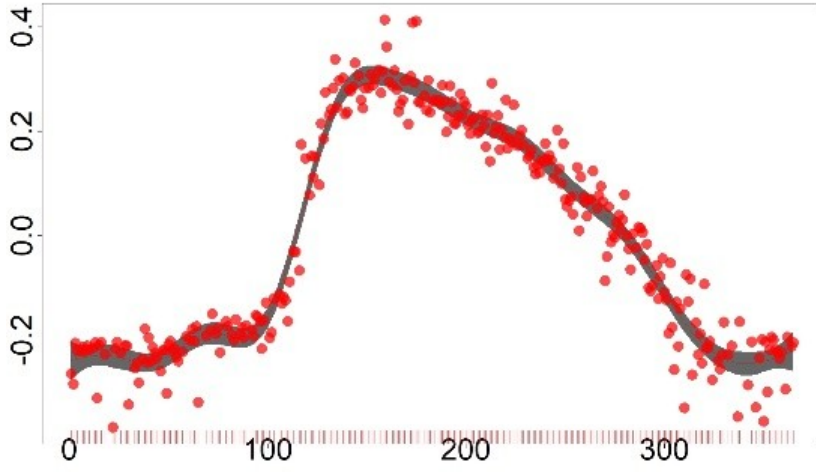


un patrón estacional, pero con pautas diferentes en función del índice que analicemos. El NDVI sufre un fuerte incremento primaveral tras el reposo vegetativo invernal. Este se mantiene en valores elevados durante la estación de crecimiento para descender de nuevo coincidiendo con el inicio de un nuevo periodo de parada fotosintética. Ello da lugar a un patrón en forma de meseta muy característico. El índice EVI también sufre un potente incremento tras el reposo invernal, no en tanto una vez alcanzado el máximo fotosintético desciende inmediatamente de forma progresiva hasta el final del ciclo vegetativo sin mantenerse en valores elevados durante el resto del periodo vegetativo como el NDVI. En la única especie perennifolia evaluada (*Quercus ilex*), los resultados son completamente diferentes. El NDVI apenas presenta oscilaciones anuales, manteniendo valores constantes en un rango acotado entre 0,7 y 0,8. El índice EVI, por el contrario, muestra un ligero incremento en el periodo vegetativo anual, que sin ser muy prominente permite al menos observar esta distinción estacional.

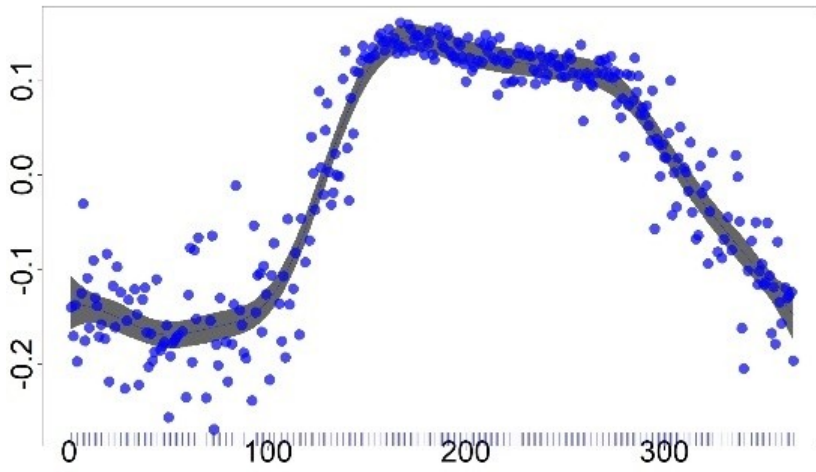
El resultado del análisis de suavizado de los modelos GAM en curvas promedio muestra cómo la variable DOY influye en el resultado de los índices de vegetación. Los intervalos de confianza (representados por el área gris) confirman mejores ajustes en periodos vegetativos, especialmente en los modelos ajustados para el HIC9120 y HIC9230.

(A)

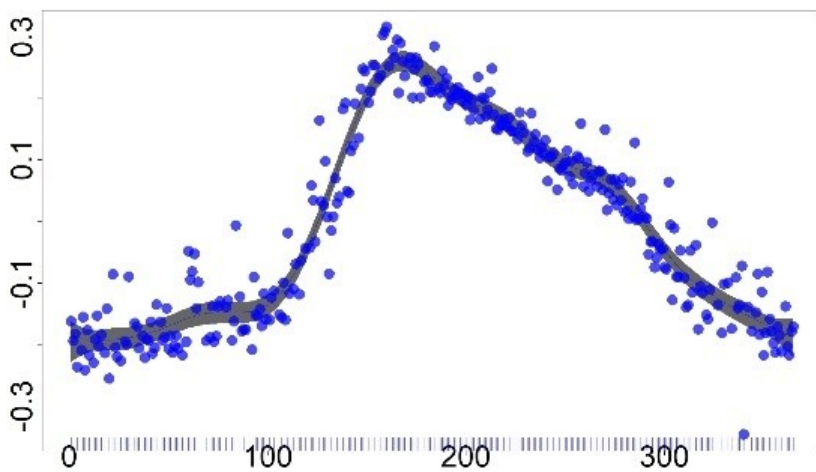




(B)



(C)



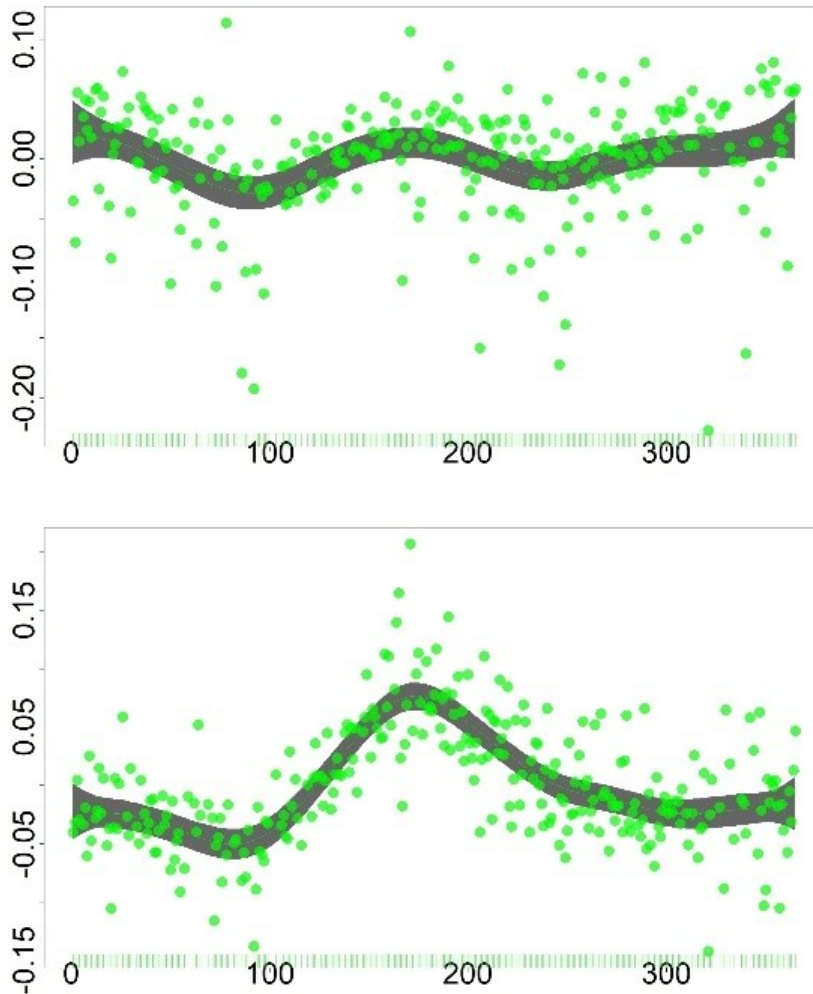


Figura 2. Gráficos de los componentes suavizados para los ajustes GAM en curvas promedio de los índices NDVI (arriba) y EVI (debajo) en (A) HIC9120, (B) HIC9230 y (C) HIC9340.

De manera similar a lo observado en las curvas promedio, las curvas independientes ajustadas para las especies caducifolias muestran un comportamiento estacional bien definido (Figura 3 y Figura 4). En todas ellas, el NDVI presenta un incremento pronunciado tras el invierno, un periodo de valores elevados en forma de meseta durante la estación de crecimiento y un descenso gradual al final del ciclo anual. Para el HIC9120, las curvas NDVI muestran una evolución muy sincronizada entre años, especialmente en los años 2018, 2019, 2021 y 2022 salvo al final del periodo. En este hábitat, el año 2020 destaca por presentar diferencias notables, como un claro adelanto en el inicio de la actividad fotosintética en comparación con los demás años y con el promedio, así como un adelanto en el descenso otoñal. En 2023 aun cuando se se observa un inicio en el periodo fotosintético similar al año promedio, los valores máximos alcanzados durante el periodo vegetativo son más bajos en relación con los demás años y con el promedio. Por otro lado, las curvas de NDVI ajustadas para el HIC9230 presentan una mayor divergencia que en el HIC9120, especialmente en el inicio de la estación. Durante periodo fotosintético de meseta se acompañan muy bien las curvas de 2018, 2019, 2021 y 2023. Como anomalías, destaca un adelanto en el inicio del periodo vegetativo en los años 2019, 2020, 2023. El año 2020 muestra

nuevamente un adelanto en el descenso otoñal y en el año 2022 se produce un descenso temprano que podría deberse a fallos de ajuste en esa franja de la curva y/o a la influencia de *outliers*. No procede realizar este análisis para el HIC9340 al mostrar simplemente tendencias lineales sin patrones estacionales tal y como sucedía con la curva promedio.

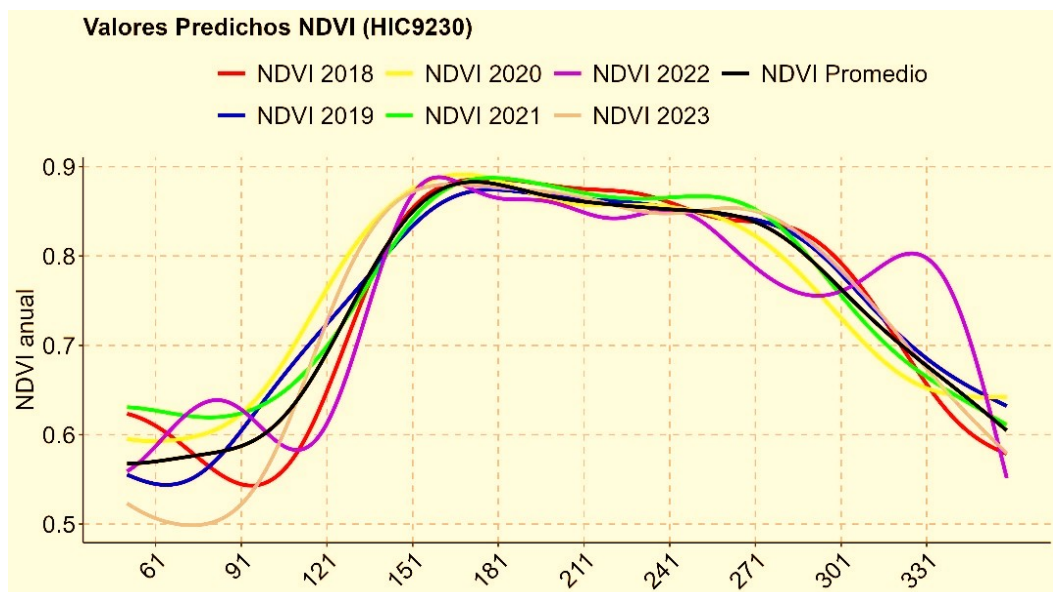
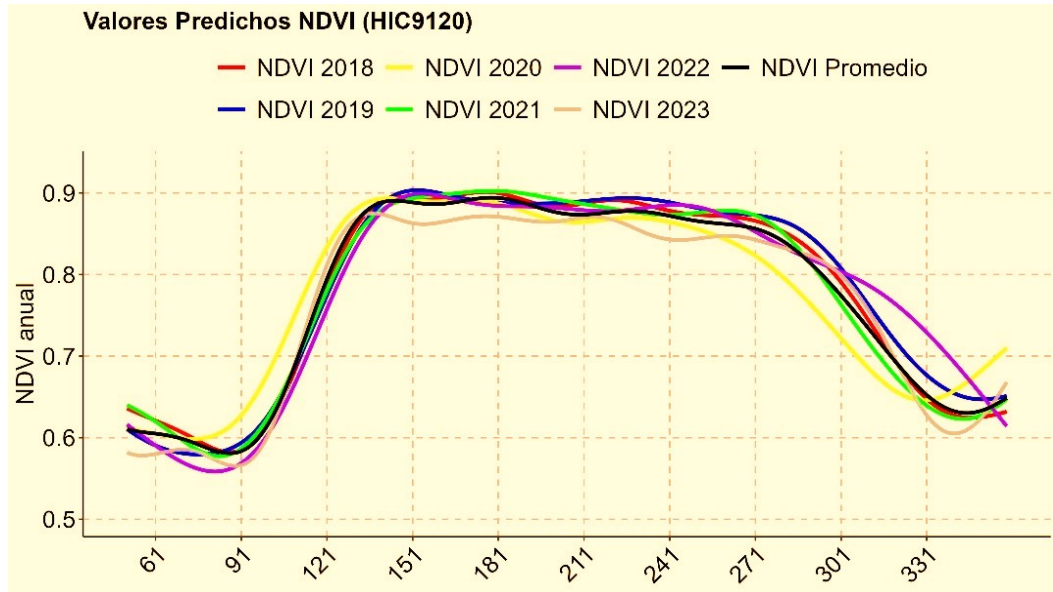
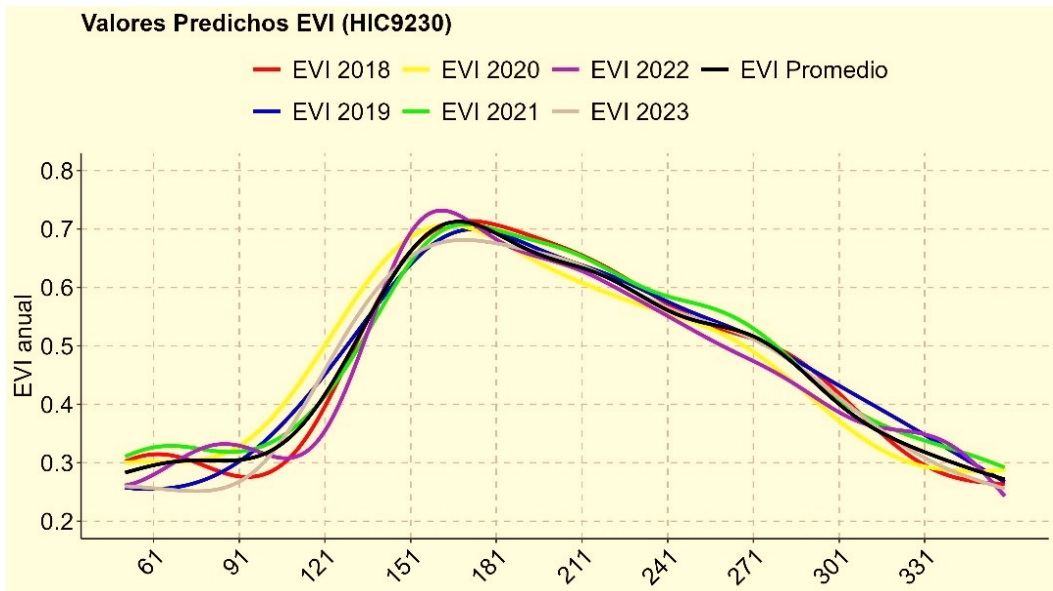
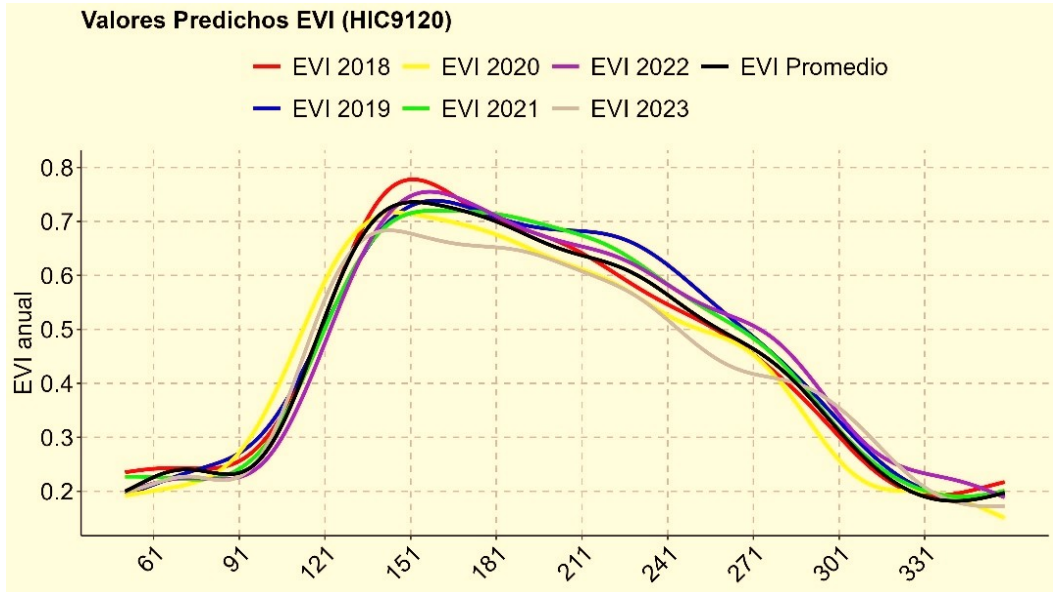


Figura 3. Curvas espectrofenológicas independientes ajustadas para el índice NDVI en relación con la curva promedio para el HIC9120 y el HIC9230.



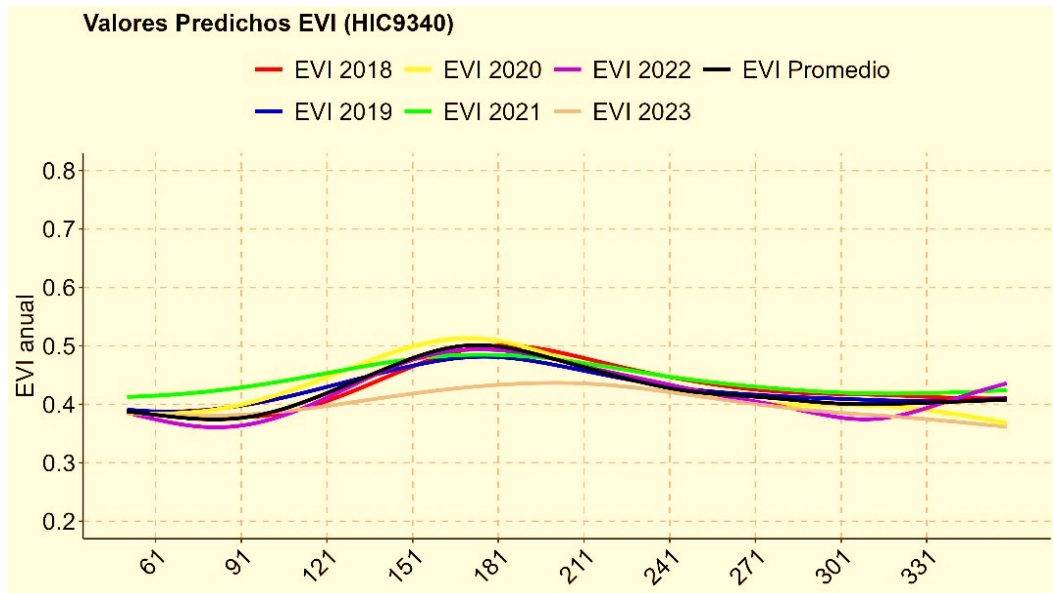


Figura 4. Curvas espectrofenológicas independientes ajustadas para el índice EVI en relación con la curva promedio para el HIC9120 y el HIC9230.

En relación con el índice EVI, nuevamente las curvas espectrofenológicas independientes presentan patrones similares a los observados con su promedio. En el HIC9120, las curvas muestran elevada sincronización entre años. Las curvas mejor acompasadas son en esta ocasión las de los años 2019, 2021 y 2022. 2018 destaca por presentar un máximo muy elevado que no se había reflejado en el NDVI. Nuevamente 2020 presenta adelantos en el inicio de la actividad fotosintética, junto con máximos más bajos y descensos algo precoces. Asimismo, en 2023 se observan de nuevo valores bajos durante el periodo vegetativo, similar a lo detectado con el NDVI.

De otro lado, para el HIC9230, aunque se registran también fluctuaciones entre años, estas son de menor magnitud que las observadas en el NDVI. Se evidencia, un adelanto en el inicio de la estación en el año 2020 y en 2023. Sin embargo, el adelanto observado en 2019 con el NDVI no aparece. También se refleja la disminución de valores máximos de 2023. Por último, para el HIC9340, las curvas muestran un cierto grado de sincronización en general. Las diferencias más destacadas se encuentran en el adelanto del inicio fotosintético en el año 2021 y en la disminución de los valores registrados durante el periodo vegetativo en 2023 cuestión que al estar reflejada en los demás hábitats resulta relevante a pesar de que el coeficiente de determinación tenga un valor moderado.

Los resultados de las métricas fenológicas (Tablas 2 – 6) vienen a remarcar lo expuesto en los párrafos anteriores pero un modo más objetivo. Las fechas y valores de inicio de la estación de acuerdo con la curva promedio son: el día 114 con 0,73 de NDVI y el día 117 con 0,47 de EVI en el HIC9120; el día 126 con 0,72 de NDVI y el día 134 con 0,53 de EVI para el HIC9230; y el día 131 con 0,44 de EVI en el HIC9340 (el NDVI no se pudo calcular). En relación con los máximos: el día 179 con 0,89 de NDVI y el día 152 con 0,74 de EVI para el HIC9120; el día 173 con 0,88 de NDVI y el día 168 con 0,71 de EVI para el HIC9230; y el día 174 con 0,50 de EVI en el HIC9340. Finalmente, las métricas para el fin de la estación indican que en el HIC9120 se registró el día 309 con 0,74 de NDVI y el día 295 con 0,35 de EVI; en el HIC9230, el final ocurrió el día 298 con 0,77 de NDVI y el día 289 con 0,45 de EVI; mientras que en el HIC9340 se registró el día 203 con 0,47 de EVI.



Realizando algunas valoraciones generales, se puede indicar que el inicio de la estación ocurre más temprano en el HIC9120 que en el HIC9230 y el HIC9340. El momento del máximo suele ocurrir antes en el EVI que en el NDVI en los hábitats donde podemos hacer la comparación. En el HIC9120 y HIC9230, el fin de la estación ocurre más tarde para el NDVI que para el EVI. En los tres hábitats (HIC9120, HIC9230, HIC9340), las fechas de inicio varían ligeramente entre los años analizados, con diferencias aproximadas de 5 ó 10 días con respecto de la media según casos. En general, los años 2020 y 2023 tienden a presentar inicios más tempranos. Los valores máximos (NDVI) y EVI) son relativamente estables entre los años, con pequeñas variaciones en los índices, aunque hay años donde se resaltan valores a la baja o al alza. Las fechas del máximo muestran variaciones interanuales más notables. El fin de la estación muestra valores similares en los años donde existe buen acompañamiento de la curva, existiendo algunas anomalías.

Tabla 2. Métricas fenológicas NDVI para el hábitat HIC9120

Métrica	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Media
MAXN	0,90	0,90	0,89	0,90	0,90	0,88	0,89
MAXT.	177	153	143	179	153	137	179
SOSN	0,73	0,74	0,74	0,72	0,72	0,72	0,73
SOST	115	117	109	114	117	112	114
EOSN	0,74	0,77	0,73	0,78	0,66	0,70	0,74
EOST	311	310	298	298	349	319	309

Tabla 3. Métricas fenológicas EVI para el hábitat HIC9120

Métrica	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Media
MAXN	0,78	0,74	0,72	0,72	0,76	0,68	0,74
MAXT.	152	160	146	160	156	144	152
SOSN	0,52	0,48	0,47	0,47	0,51	0,44	0,47
SOST	121	119	111	118	124	113	117
EOSN	0,33	0,35	0,35	0,38	0,39	0,30	0,35
EOST	296	297	288	291	294	312	295

Tabla 4. Métricas fenológicas NDVI para el hábitat HIC9230



Métrica	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Media
MAXN	0,89	0,87	0,89	0,89	0,89	0,88	0,88
MAXT.	177	179	169	179	160	164	173
SOSN	0,69	0,61	0,72	0,75	0,73	0,68	0,72
SOST	126	93	113	132	134	115	126
EOSN	0,72	0,76	0,76	0,78	0,66	0,73	0,77
EOST	318	307	294	295	350	317	298

Tabla 5. Métricas fenológicas EVI para el hábitat HIC9230

Métrica	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Media
MAXN	0,71	0,70	0,71	0,71	0,73	0,68	0,71
MAXT.	171	173	164	170	162	170	168
SOSN	0,49	0,52	0,51	0,53	0,51	0,43	0,53
SOST	130	131	122	137	135	118	134
EOSN	0,41	0,47	0,44	0,47	0,29	0,41	0,45
EOST	304	287	285	287	350	301	289

Tabla 6. Métricas fenológicas EVI para el hábitat HIC9340

Métrica	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Media
MAXN	0,50	0,48	0,51	0,49	0,49	0,44	0,50
MAXT.	183	176	170	175	174	201	174
SOSN	0,44	0,43	0,44	0,44	0,42	0,40	0,44
SOST	137	121	120	110	126	117	131
EOSN	0,48	0,47	0,48	0,47	0,47	0,42	0,47
EOST	209	203	203	213	205	238	203



5. Discusión

Las series irregulares promedio construidas para los Hábitats de Interés Comunitario (HIC) presentan un elevado número de datos bien distribuidos a lo largo del año. Esto resulta en una densidad adecuada para construir curvas espectrofenológicas representativas de las especies a nivel autonómico. Sin embargo, el número de datos de las series temporales para años independientes se reduce considerablemente, lo cual puede afectar el ajuste final de las curvas en mayor o menor medida dependiendo del tamaño del tramo sin datos. A pesar de estas limitaciones, cuando los datos están bien repartidos durante el periodo anual, los ajustes muestran una alta similitud con las curvas promedio, destacando el buen resultado de los modelos ajustados para el HIC9120 y el HIC9230.

Las curvas ajustadas para especies caducifolias han demostrado ser herramientas precisas para reflejar la dinámica fenológica de los árboles, un hallazgo respaldado por estudios recientes como los de KOWALSKI *et al.* (2022) y GRABSKA-SZWAGRZYK & TYMINSKA-CZABANSKA (2023). Los trabajos de estos autores han dado un paso adicional al proponer el ajuste de modelos fenológicos a nivel de píxel. Este enfoque permite una representación espacial explícita, útil para el cartografiado de anomalías fenológicas, aunque enfrenta una limitación clave: la necesidad de datos densos para ajustar modelos aditivos generalizados (GAM). Por otro lado, investigaciones como las de LÓPEZ *et al.* (2022), más alineadas con el objetivo de generar curvas regionales de referencia, resaltan el potencial de estas metodologías para apoyar la implementación de programas de monitoreo fenológico espectral a nivel regional. Sin embargo, también advierten sobre el impacto que puede tener la falta de una muestra estratificada. Este déficit puede suavizar las variaciones fenológicas, dificultando la identificación de patrones específicos y reduciendo la capacidad de capturar la complejidad espacial del ciclo fenológico de las especies. Ambos enfoques presentan ventajas y limitaciones significativas. Desde una perspectiva cartográfica, el ajuste de modelos a nivel de píxel aporta una granularidad espacial que permite detectar patrones locales de variación y anomalías. Sin embargo, la integración de todos los valores en un único modelo regional puede conducir a una pérdida de detalles críticos debido al efecto suavizador, lo que podría resultar en interpretaciones erróneas. Esto pone de relieve la importancia de equilibrar la precisión espacial con la robustez estadística al diseñar programas de monitoreo fenológico.

Discutiendo algunos resultados específicos, hemos observado diferencias notables en el comportamiento de los dos índices analizados, especialmente en relación con el patrón fenológico. Mientras que el NDVI mantiene una meseta relativamente estable de valores elevados durante todo el período fotosintético, el EVI desciende automáticamente tras alcanzar su valor máximo. De esta manera, la evolución de ambos índices parece sincronizarse al inicio de la actividad fotosintética, pero diverge a lo largo del resto del período vegetativo. Con idénticas metodologías de ajuste y especies, el patrón descrito es similar al observado por GRABSKA-SZWAGRZYK & TYMINSKA-CZABANSKA (2023), quienes señalan que, aunque ambos índices ofrecen estimaciones similares en cuanto a la fecha de inicio de la temporada de crecimiento (SOS), sus trayectorias difieren en el resto del ciclo fenológico. En este sentido, ambos índices podrían complementarse: mientras que el EVI permite identificar claramente un único máximo de capacidad fotosintética, el NDVI, al saturarse en plena foliación (PETTORELLI *et al.*, 2005;



BUCHA & KOREN, 2017), genera valores relativamente estables hasta que la marchitez y la pérdida de hojas se vuelven sustanciales. No obstante, esta propiedad del NDVI podría aprovecharse para evaluar el fin de la estación vegetativa, algo que resulta más difícil de detectar con el EVI. Por otro lado, GÓMEZ et al. (2020) encontraron patrones fenológicos en meseta para el NDVI mediante ajustes realizados con el filtrado de Savitzky-Golay y con la doble función logística implementada en TIMESAT (EKLUNDH & JÖNSSON, 2017). Sin embargo, en el mismo estudio no pudieron encontrar patrones fenológicos cíclicos estables para el EVI. En cualquier caso, la mayor sensibilidad del índice EVI en zonas con gran cantidad de biomasa (PETTORELLI et al., 2005) parece explicar el patrón encontrado tanto por nosotros como por GRABSKA-SZWAGRZYK & TYMINSKA-CZABANSKA (2023).

Los inicios, los máximos y los finales de estación desde la perspectiva espectrofenológica muestran variaciones a lo largo de los años analizados, lo que puede asociarse a las condiciones ambientales, particularmente a las precipitaciones y las temperaturas, tanto acumuladas hasta el momento como ocurridas posteriormente. Estas fluctuaciones han sido parcialmente corroboradas por las anomalías observadas en 2020, las cuales parecen repetirse en 2023 aunque de modo diferente al presentar descensos generalizados en los valores de los índices durante la época de crecimiento. De acuerdo con el informe meteorológico de 2020 de la Agencia Vasca de Meteorología (Euskalmet), el año comenzó con un marcado déficit pluviométrico, que fue normalizándose hacia la primavera. En particular, enero fue el mes más seco en lo que iba de siglo en varias estaciones meteorológicas del litoral, mientras que el déficit hídrico se agudizó en febrero, especialmente en la vertiente mediterránea. Por otro lado, las temperaturas medias calificaron 2020 como un año extremadamente cálido en la vertiente cantábrica y muy cálido en la mediterránea, destacándose especialmente la calurosa primavera. Estos factores climáticos parecen estar estrechamente vinculados con las anomalías espectrofenológicas observadas, subrayando la sensibilidad del crecimiento y desarrollo de la vegetación a las variaciones en las condiciones ambientales normales y la potencialidad de este sistema como indicador. Por otra parte, el informe correspondiente a 2023 indica que las precipitaciones estuvieron en un rango normal, aunque acumulaban un déficit del año anterior. Esto, unido a las temperaturas extremadamente cálidas de 2022 que continuaron en 2023, podría haber repercutido en la respuesta fenológica de las especies. Todas estas asunciones se realizan de modo general sin tener en cuenta las variaciones micro-climáticas derivadas de la orografía.

Si relacionamos nuestras observaciones con datos fenológicos obtenidos por el último informe de seguimiento llevado a cabo por el OAPN (LEO y ROLLÁN, 2023), se pueden extraer algunas conclusiones. Para el HIC9120, el inicio del periodo vegetativo, identificado como el momento de máxima tasa de cambio positivo, se produjo el día 114 para el NDVI y el día 117 para el EVI. Estas fechas ubican el inicio de la estación en la última semana de abril. Aunque estas cifras son promedios espectrales y pueden variar según el año y la orografía, se observa un adelanto claro en 2020. Este fenómeno concuerda con el citado informe, que también señala un adelanto en ese año con respecto al promedio, si bien ubica el inicio normal de la estación entre los días 125 y 130, algo más tarde que el nuestro. En el caso del HIC9230, la brotación y aparición foliar son más tardías que en el HIC9120, ocurriendo el día 126 para el NDVI y el día 134 para el EVI, lo que



corresponde a la primera o segunda semana de mayo. El resultado del EVI coincide con los datos promedio de *Quercus pyrenaica* en el informe de LEO y ROLLÁN (2023). Además, el adelanto de 2020 es una tendencia también señalada en dicho informe y posiblemente vinculada a patrones meteorológicos específicos de esos años. Por último, los resultados del HIC9340 son más heterogéneos. El NDVI muestra coeficientes de determinación extremadamente bajos (0.0138 a 0.095), lo que sugiere que el ajuste de las curvas no es fiable para este hábitat. Aunque el EVI presenta patrones más definidos, las oscilaciones estacionales son menores que en los hábitats caducifolios. Esto dificulta la identificación de métricas claras y limita el análisis en términos de robustez. A pesar de estas restricciones, se observa un ligero adelanto en el inicio de la actividad fotosintética en 2021 y una disminución de los valores vegetativos en 2023, consistente con los patrones detectados en los otros dos hábitats.

En términos generales, los resultados destacan diferencias importantes entre hábitats y entre años. En el HIC9120, el inicio de la estación ocurre más temprano que en el HIC9230 y en el HIC9340. El EVI tiende a identificar el momento del máximo fotosintético con mayor anticipación y parece más fiable al ser único y no mantenerse en el tiempo. En cuanto al fin de la estación, ocurre más tarde para el NDVI que para el EVI en los hábitats analizados, si bien el primero se puede considerar más preciso. Los años 2020 y 2023 presentan anomalías destacables, respectivamente con inicios más tempranos y valores más bajos. Estas tendencias refuerzan la utilidad de las curvas espectrofenológicas como herramienta para identificar anomalías y evaluar el impacto del cambio climático en los ecosistemas forestales.

6. Conclusiones

Este informe constituye un punto de partida adecuado para definir las curvas espectrofenológicas tipo de los diferentes hábitats estudiados. A pesar de la reducción en la resolución espacial del producto HLS, con un tamaño de píxel de 30 metros, este producto permite configurar de manera efectiva curvas espectrofenológicas promedio para las diferentes especies. Esto compensa el aumento en el tamaño del píxel con la abundancia de imágenes y, especialmente, de píxeles de alta calidad. El acceso a los datos es sencillo desde diversas plataformas y permite una depuración efectiva de píxeles afectados por nubes y sombras mediante el uso de las bandas de calidad.

El ajuste de modelos aditivos generalizados es una herramienta muy potente para componer curvas espectrofenológicas de índices de vegetación. Frente a otros modelos de ajuste de series temporales, ofrece la ventaja de evitar la necesidad de rellenar huecos sin datos. Sin embargo, resulta fundamental partir de series densas que abarquen todo el período de análisis y que no presenten grandes intervalos sin datos, ya que esto podría conducir a conclusiones erróneas. A partir de los datos iniciales, se obtienen ajustes matemáticos de alta calidad para el HIC9120 y HIC9230, tanto en el índice NDVI como en el índice EVI. En cambio, los resultados para el HIC9340 son aceptables con el índice EVI, pero inadecuados con el NDVI, lo que sugiere la conveniencia de evaluar otros índices para determinar su eficacia.

Ambos índices parecen complementarse. Mientras que el índice EVI distingue claramente el máximo de capacidad fotosintética de la masa forestal, este máximo puede generar confusión con el NDVI, ya que, al saturarse en plena foliación,



produce valores uniformes hasta que se da una degradación o pérdida significativa de las hojas. No obstante, esta misma propiedad del NDVI es útil para evaluar el final de la estación, una tarea difícil de realizar con el EVI. Asimismo, el inicio de la estación puede mostrar variaciones entre ambos índices. Estas diferencias subrayan que las métricas espectrofenológicas son específicas según el índice de vegetación empleado, lo que sugiere que deberían utilizarse de forma independiente como indicadores.

A nivel técnico, y con miras a establecer un sistema de seguimiento de hábitats, sería necesario realizar ciertos ajustes en la metodología empleada. Se han establecido puntos ubicados en distintas formaciones, algunos de ellos provenientes de una red de seguimiento de parcelas comprobadas in situ. Sin embargo, otros puntos han sido definidos mediante fotointerpretación, por lo que sería recomendable validar esta red mediante verificaciones en campo para eliminar posibles errores derivados de parcelas que no correspondan con la especie objetivo. Para implementar un sistema de monitoreo local capaz de detectar anomalías, sería conveniente estratificar las formaciones al menos a nivel fisiográfico, considerando en particular la altitud y la orientación, tal como sugieren los estudios bibliográficos relacionados con las variaciones fenológicas.

7. Agradecimientos

El presente trabajo ha sido posible gracias a la iniciativa, apoyo y financiación del Departamento de Industria, Transición Energética y Sostenibilidad del Gobierno Vasco. Agradecemos profundamente su dedicación a promover iniciativas que contribuyan al bienestar ambiental y social.

8. Bibliografía

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. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x>

BANSKOTA, A.; KAYASTHA, N.; FALKOWSKI, M. J.; WULDER, M. A.; FROESE, R. E.; WHITE, J. C.; 2014. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. *Can. J. Remote Sens.*, 40: 362-384. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.987376>

BUCHA, T.; KOREN, M.; 2017. Phenology of the beech forests in the Western Carpathians from MODIS for 2000-2015. *iForest*, 10: 537–546. <https://doi.org/10.3832/ifor2062-010>

CHUVIECO, E.; 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones RIALP S.A. 449 páginas. Madrid.

EKLUNDH, L.; JÖNSSON, P.; 2017. Timesat 3.3 Software Manual. Lund and Malmö University. 92 páginas. Sweden.

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. *Rev. Teledetec.*, 55, 71-80. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13561>

GÓMEZ, C.; CAIZA MORALES, L.; SANGÜESA-BARREDA, G.; OLANO, J. M.; DOMINGO, D.; 2022. Desarrollo de herramientas de detección temprana de



defoliación por procesionaria del pino mediante teledetección y aprendizaje computacional. *Soc. Esp. Cienc. For.* 8CFE – 1019.

GRABSKA-SZWAGRZYK, E.; TYMIŃSKA-CZABAŃSKA, L.; 2023. Sentinel-2 time series: a promising tool in monitoring temperate species spring phenology. *Forestry*, 97(2):267-281. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad039>

GROLEMUND, G.; WICKHAM, H.; 2011. Dates and Times Made Easy with lubridate. *J. Stat. Softw.*, 40(3): 1–25. URL: <https://www.jstatsoft.org/v40/i03/>

KOWALSKI, K.; SENF, C.; HOSTERT, P.; PFLUGMACHER, D.; 2020. Characterizing spring phenology of temperate broadleaf forests using Landsat and Sentinel-2 time series. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 92: 102172. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102172>

LEO, M.; ROLLÁN, D.; 2023. Seguimiento de la fenología de especies forestales en la Red de Parques Nacionales - Informe de resultados 2023. Área de Conservación, Seguimiento y Programas de la Red. Organismo Autónomo Parques Nacionales. 42 páginas. Madrid.

LI, J.; ROY, D. P.; 2017. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B, and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sens.*, 9,902. <https://doi.org/10.3390/rs9090902>

LÓPEZ, D.; ÁLVAREZ-MARTÍNEZ, J. M.; SÁNCHEZ, 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>

PÉREZ, B.; SERNA, A. R.; DELGADO, J.; CABALLERO, M. E.; VILLA, G.; 2022. El programa Copernicus para la monitorización del territorio y los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Centro Nacional de Información Geográfica. 229 páginas. Madrid.

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 Ecol. Evol.*, 20(9): 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>

R CORE TEAM; 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>

SOUZA, C.; SIQUEIRA, J.; SALES, M.; FONSECA, A.; RIBEIRO, J.; NUMATA, I.; COCHRANE, M.; BARBER, C.; ROBERTS, D.; BARLOW, J.; 2013. Ten-Year Landsat Classification of Deforestation and Forest Degradation in the Brazilian Amazon. *Remote Sens.*, 5: 5493-5513. <https://doi.org/10.3390/rs5115493>



WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W.; McGOWAN, L. D.; FRANÇOIS, R.; GROLEMUND, G.; HAYES, A.; HENRY, L.; HESTER, J.; KUHN, M.; PEDERSEN, T. L.; MILLER, E.; BACHE, S. M.; MÜLLER, K.; OOMS, J.; ROBINSON, D.; SEIDEL, D. P.; SPINU, V.; TAKAHASHI, K.; VAUGHAN, D.; WILKE, C.; WOO, K.; YUTANI, H.; 2019. Welcome to the tidyverse. *J. Open Source Softw.*, 4(43): 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>

WOOD, S. N.; 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. CRC Press. 496 páginas. New York.

ZHANG, T.; ZHANG, X.; LIU, H.; PEI, X.; 2010. Application of remote sensing technology in monitoring forest diseases and pests. *Plant Dis. Pests.*, 1(3): 57-62.