

Fernández-Menéndez, Á.; Concostrina-Zubiri, L.; Barquín, J. Caracterización espectrofenológica de formaciones vegetales de ribera en Cantabria

Caracterización espectrofenológica de formaciones vegetales de ribera en Cantabria

Fernández-Menéndez, Álvaro ¹ Concostrina-Zubiri, Laura ¹ Barquín, José ¹

¹ IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, España

ORCID: Fernández-Menéndez 0000-0001-8067-3528 Concostrina-Zubiri 0000-0001-7781-6030 Barquín 0000-0003-1897-2636

Correspondencia: fmendez@unican.es laura.concostrina@unican.es jose.barquin@unican.es

RESUMEN

La disponibilidad de imágenes multispectrales permite extraer información ecológica valiosa sobre los patrones estacionales de la vegetación, especialmente en ambientes dinámicos como los riparios. En este estudio, mediante modelos lineales, presentamos las relaciones entre la fenología vegetal y variables taxonómicas, ambientales y estructurales en ecosistemas de ribera. A partir de una serie de imágenes Sentinel-2 mensuales, extrajimos cuatro métricas fenológicas anuales (inicio y fin de temporada, pico de producción y rango) para el período 2022-2025, y consideramos 12 formaciones vegetales riparias, incorporando fases maduras y pioneras, así como especies autóctonas y exóticas. La composición explicó la mayor proporción de varianza para el pico y el rango, mientras que el peso de los factores ambientales fue mayor para el inicio de temporada. La Reynoutria sp. fue la formación con valores fenológicos más destacados, lo que facilita la alerta temprana de especies invasoras. Las formaciones más estrictamente riparias (alisedas, fresnedas, saucedas) mostraron una temporada de crecimiento más prolongada con respecto a las especies más típicas de ladera. Las implicaciones de este trabajo suponen una base importante para la caracterización y modelización de la vegetación riparia en ambientes dinámicos.


Palabras clave: *Espectrofenología, Sentinel-2, Vegetación riparia, Series temporales*


Fecha de recepción: 5 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 5 febrero 2026


Caracterización espectrofenológica de formaciones vegetales de ribera en Cantabria

Fernández-Menéndez, Álvaro ⁽¹⁾, Concostrina-Zubiri, Laura ⁽¹⁾, Barquín, José ⁽¹⁾

⁽¹⁾ IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, España.

 0000-0001-8067-3528, fmenendeza@unican.es.

 0000-0001-7781-6030, laura.concostrina@unican.es.

 0000-0003-1897-2636, jose.barquin@unican.es.

Resumen: La disponibilidad de imágenes multiespectrales permite extraer información ecológica valiosa sobre los patrones estacionales de la vegetación, especialmente en ambientes dinámicos como los riparios. En este estudio, mediante modelos lineales, presentamos las relaciones entre la fenología vegetal y variables taxonómicas, ambientales y estructurales en ecosistemas de ribera. A partir de una serie de imágenes Sentinel-2 mensuales, extrajimos cuatro métricas fenológicas anuales (inicio y fin de temporada, pico de producción y rango) para el período 2022-2025, y consideramos 12 formaciones vegetales riparias, incorporando fases maduras y pioneras, así como especies autóctonas y exóticas. La composición explicó la mayor proporción de varianza para el pico y el rango, mientras que el peso de los factores ambientales fue mayor para el inicio de temporada. La *Reynoutria* sp. fue la formación con valores fenológicos más destacados, lo que facilita la alerta temprana de especies invasoras. Las formaciones más estrictamente riparias (alisedas, fresnedas, saucedas) mostraron una temporada de crecimiento más prolongada con respecto a las especies más típicas de ladera. Las implicaciones de este trabajo suponen una base importante para la caracterización y modelización de la vegetación riparia en ambientes dinámicos.

Palabras clave: Espectrofenología, Sentinel-2, Vegetación riparia, Series temporales

Land Surface Phenology of riparian vegetation formations in Cantabria

Abstract: *The availability of multispectral images allows for the extraction of valuable ecological information about the seasonal patterns of vegetation, especially in dynamic environments, such as riparian zones. In this study, through the use of linear models, we present the relations between plant phenology and taxonomic, environmental, and structural variables in riparian ecosystems. Starting from a series of monthly Sentinel-2 images, we extracted four yearly phenological metrics (start and end of the season, production peak, and range) for the 2022-2025 period, and we considered 12 riparian vegetation formations, incorporating mature and pioneer phases, as well as native and exotic species. Composition explained the greatest proportion of variance for peak and range, while the weight of environmental factors was higher for the season start. Reynoutria sp. had the most distinct phenological values, which facilitates the early alert of invasive species. The more strictly-riparian formations (alder, ash, and willow) showed a prolonged growth season in comparison to more hillside-typical species. The implications of this work are an important basis for the characterization and modelling of riparian vegetation modelling in dynamic environments.*

Keywords: *Land Surface Phenology, Sentinel-2, Riparian vegetation, Time series*

1. INTRODUCCIÓN

Los patrones fenológicos de la vegetación suponen una importante fuente de información sobre el comportamiento de los ecosistemas y su respuesta ante factores externos. Concretamente, en la vegetación de ribera la dimensión temporal juega un papel clave en un contexto de regímenes de caudal irregulares, procesos de cuenca acumulativos y gradientes ambientales (Naiman & Décamps, 1997). Por este motivo, la multitemporalidad es fundamental para estudiar la

vegetación riparia (Huylenbroeck *et al.*, 2020) y la disponibilidad de imágenes multiespectrales permite examinar periódicamente estos patrones mediante el análisis de series temporales. Esta aproximación (espectrofenología) ha sido ampliamente utilizada para describir interacciones ecológicas a grandes escalas espaciales y temporales (Dronova & Taddeo, 2022). En este aspecto, a pesar de los notables avances sobre la relación entre clima y fenología vegetal, es necesario explorar con mayor profundidad la influencia de factores no climáticos (Ma *et al.*, 2022). Considerando que la

respuesta fenológica de la vegetación tiene causas ambientales y genéticas, la plasticidad fenológica de las formaciones puede variar en función de la especie o el grado de madurez (Vitasse *et al.*, 2013). Por tanto, el objetivo del trabajo consiste en analizar las relaciones entre variables fenológicas, taxonómicas, ambientales y estructurales en formaciones vegetales de ribera, siendo el principal interés encontrar diferencias entre distintos tipos de formaciones.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se centró en las cuencas hidrográficas de la Comunidad Autónoma de Cantabria (Fig. 1), tratándose de una región montañosa con una gran variación altitudinal y una distinción biogeográfica entre las vertientes norte (clima oceánico húmedo templado) y sur (influencia mediterránea de interior). La delimitación de la zona riparia se realizó bajo criterios geomorfológicos (inundación a 5 alturas de *bankfull*), incluyendo desde el cauce activo hasta las terrazas aluviales.

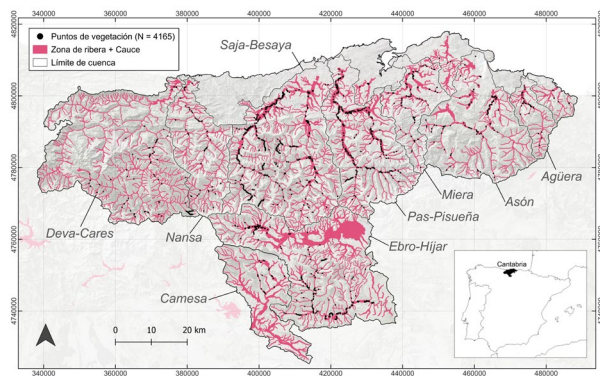


Figura 1. Zona de estudio.

2.2. Puntos de vegetación (composición)

Consideramos un total de 12 formaciones caducifolias (10 maduras y 2 pioneras) y generamos una serie de puntos georreferenciados distribuidos a lo largo de los principales gradientes ambientales (altitudinal, latitudinal y fluvial; Fig. 1) del territorio. Estos se obtuvieron a partir de cuatro campañas de campo (2016, 2017, 2019 y 2025) e interpretación de mapas y ortofotos (PNOA y Gobierno de Cantabria). Los puntos se etiquetaron en base a la especie dominante en el dosel en cada píxel: aliseda (*Alnus glutinosa*; n = 1383), chopera (*Populus* spp.; n = 983), fresneda (*Fraxinus excelsior*; n = 486), hayedo (*Fagus sylvatica*; n = 172), melojar (*Quercus pyrenaica*; n = 197), robleal (*Quercus robur*; n = 426), saucedas arbóreas (*Salix alba* y *S. atrocinerea*; n = 873) y saucedas arbustivas (*Salix cantabrica* y *S. eleagnos*; n = 530). Dada su extensión manifiesta en las riberas cantábricas, se añadieron dos especies exóticas: plátano de sombra (*Platanus x hispanica*; n = 281) y bambú japonés (*Reynoutria japonica*; n = 93). Asimismo, teniendo en cuenta la acusada dinámica temporal de algunos cauces (eventos periódicos de erosión y sucesión vegetal), se incorporaron formaciones en regeneración (pioneras) de *Reynoutria* (n = 144) y de saucedas arbustivas (n = 253).

2.3. Métricas fenológicas, estructurales y ambientales

Generamos una serie de Sentinel-2 (L2A) en *Google Earth Engine* para el periodo 2022-2025, aplicando filtros de nieve (*SCL* y 0.4 NDSI), nubes y sombras (*Cloud Score+*), calculando medias mensuales y rellenando huecos mediante interpolación lineal temporal. Tomamos el *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*; Eq. 1) como indicador de actividad vegetal, principalmente por su desempeño en zonas de biomasa densa. Para el cálculo del inicio y final de la temporada de crecimiento nos basamos en el método del umbral (de Beurs & Henebry, 2009; Eq. 2).

$$EVI = 2.5 \cdot \left(\frac{NIR - RED}{NIR + 6 \cdot RED - 7.5 \cdot BLUE + 1} \right) \quad (1)$$

$$\mu = 0.5 \cdot (EVI_{95} - EVI_5) + EVI_5 \quad (2)$$

Para cada año, el inicio de temporada (*SoS*) se calculó como la proporción entre el valor de *EVI* en abril y el umbral de cada píxel. Asimismo, el final (*EoS*) es la proporción entre el *EVI* de octubre y el umbral. Estos meses corresponden a momentos clave en la foliación y senescencia típicas en Cantabria, de modo que las métricas identificarían puntos con activación temprana (*SoS* alto) o senescencia aplazada (*EoS* alto). La variable *Peak* es el promedio de *EVI* entre junio y agosto, período de máxima producción en la región. Finalmente, el rango anual (*Range*) es la diferencia entre *Peak* y el promedio de *EVI* en el periodo de dormancia (enero-febrero).

Adicionalmente, generamos una variable estructural (altura de vegetación; *H*; LiDAR, PNOA) y cuatro ambientales: altitud (*Alt*), condición de iluminación media (*IC*; a partir del ángulo zenital y azimutal de imágenes Sentinel-2); máxima temperatura del mes más cálido (*T*; WorldClim); y cuenca vertiente (*V*; Norte vs. Sur). Se añadió año (2022 a 2025) como predictora para considerar la posible variación fenológica interanual.

2.4. Análisis estadístico

Tomando como respuesta las métricas fenológicas (*SoS*, *EoS*, *Peak*, *Range*), generamos cuatro modelos lineales con las variables taxonómicas (formación), estructurales (*H*) y ambientales (*T*, *Alt*, *IC*, *V*), además del año. Las variables fueron normalizadas para facilitar la interpretación. Finalmente, estimamos la fracción de varianza explicada por cada tipo de predictora mediante un análisis de partición de varianza (regresiones parciales; función *varpart*, paquete *vegan*, R Core Team), usando los coeficientes de determinación ajustados (R^2).

3. RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

Todas las variables ejercieron influencia significativa sobre la fenología de las formaciones riparias (Fig. 2), explicando más de un 30 % (R^2) de la varianza de *SoS*, *Peak* y *Range*, así como un 7 % de *EoS*. Dado que los factores influyentes en el inicio y fin de temporada son distintos (Mei *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2023), la baja predictibilidad de *EoS* (Fig. 2-B) puede deberse a factores no considerados (p. ej., precipitación otoñal). Por el contrario, la variación de *SoS* muestra una relación ambiental más clara (Fig. 2-A).

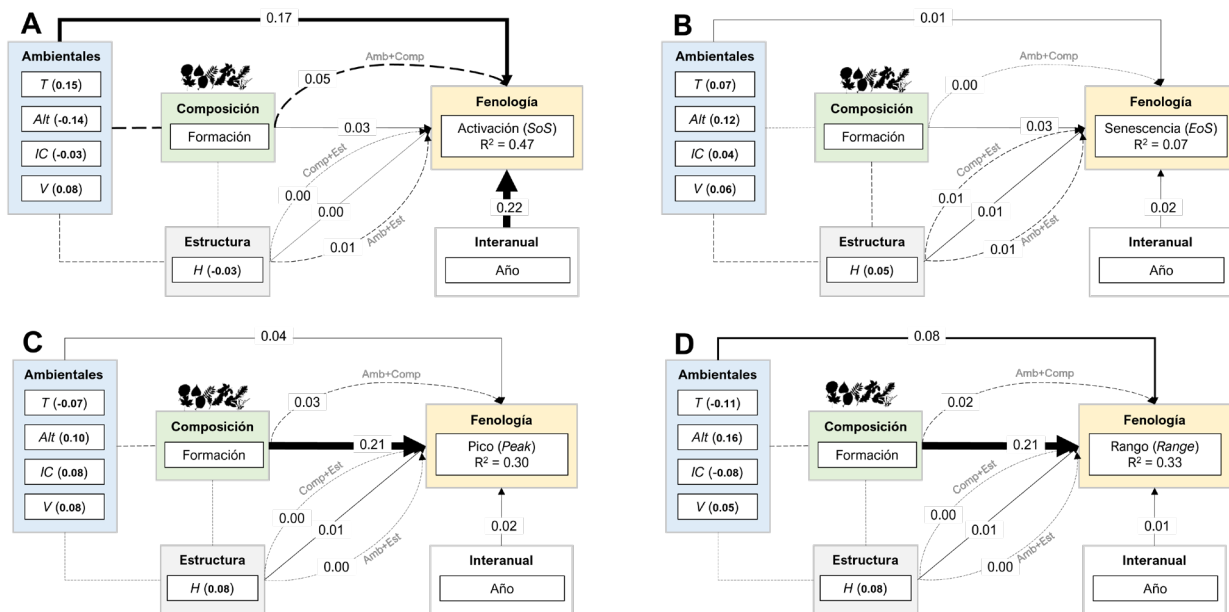


Figura 2. Relación entre variables ambientales, taxonómicas, estructurales y fenológicas (incluyendo variación interanual). R^2 : proporción de varianza explicada para cada variable fenológica. Números sobre líneas: Partición de varianza para cada grupo de variables (proporcional al grosor de la flecha). Línea continua: Efecto único. Línea discontinua: Efecto mediado. Números entre paréntesis: Estima de cada variable continua en el modelo lineal (negrita = significativo, p -valor < 0.05).

El destacado efecto del año sobre SoS podría indicar una oscilación interanual fruto de variables no consideradas (p. ej., desviación meteorológica). En cuanto a la composición, por sí sola explicó un 3 % de la varianza de SoS, aunque compartiendo un 5 % con las variables ambientales. De este modo, los factores ambientales condicionan la composición de especies, lo que mediaría el efecto sobre la fenología. La influencia de la composición sobre EoS fue también reducida (3 %), siendo, no obstante, mayor que la del resto de las variables (Fig. 2-B). Por el contrario, el tipo de formación fue influyente sobre *Peak* y *Range*, con un efecto puro del 21 % en ambos casos (Fig. 2-C, D), por encima del ambiente (< 10 %). En relación con el efecto específico de cada variable ambiental, SoS mostró una correlación positiva con *T* y *V*, y negativa con *Alt* e *IC* (Fig. 2-A). Esto se ajusta a la hipótesis de que zonas bajas y cálidas, tienden a asociarse con una actividad fotosintética más temprana (Jiang *et al.*, 2023; Stendardi *et al.*, 2019). El papel de la estructura fue reducido, con una variación fenológica mínima en función de *H*.

Analizando las diferencias entre formaciones (Fig. 3), la *Reynoutria* destacó por su gran productividad estival (*Peak* alto) y su senescencia aplazada (EoS alto), en contraste con su activación tardía (SoS bajo). La productividad elevada en ecosistemas invadidos está descrita en la literatura (Rout & Callaway, 2009) y, precisamente, la segunda formación con mayor *Peak* fue la otra especie exótica (plátano). La *Reynoutria* también manifestó un *Range* excepcionalmente alto, ya que tiende a formar matas monoespecíficas densas cuya parte aérea se seca completamente en invierno (manteniendo el rizoma). Los valores elevados de SoS y EoS para el plátano sugieren una temporada de crecimiento prolongada, otro rasgo comúnmente observado en especies exóticas (Fridley, 2012).

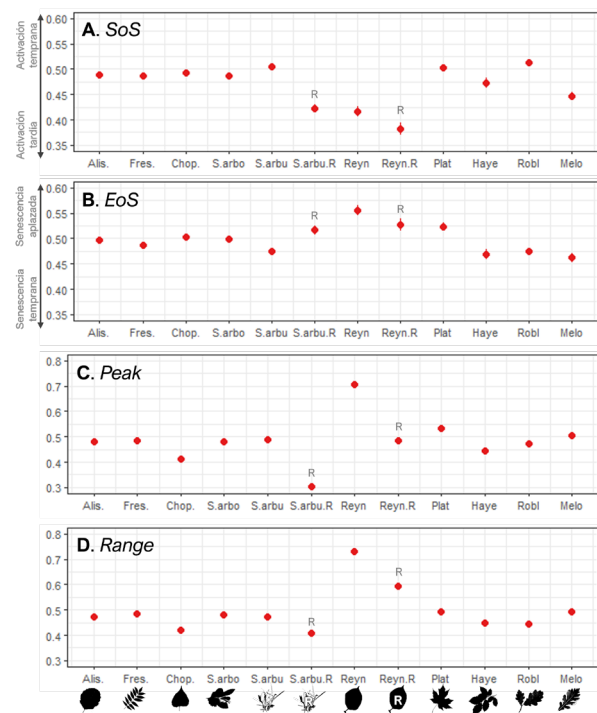


Figura 3. Media estimada con intervalo de confianza 95 % (eje y) de métricas fenológicas para cada formación vegetal. Letra "R": formación en regeneración.

Al comparar las formaciones maduras frente a sus equivalentes pioneras, los patrones fueron generalmente análogos para la regeneración natural (saucedas arbustivas) e invasora (*Reynoutria*). La vegetación pionera mostró una activación más tardía (SoS bajo) y un *Peak* y *Range* menor que la madura, sin embargo, en el caso de las saucedas, también tuvo una senescencia

más aplazada (EoS alto). Las formaciones típicamente riparias (alisedas, choperas, fresnedas y saucedas arbóreas) presentaron una época de crecimiento ligeramente más prolongada que formaciones más típicas de ladera (hayedos, melojares y robledales), estas últimas con un menor SoS (a excepción del robledal) y EoS (Fig. 3-A, B). Por otra parte, las diferencias de *Peak* y *Range* entre estas formaciones no fueron destacables (Fig. 3-C, D), con la salvedad de los valores relativamente bajos de las choperas.

4. CONCLUSIONES

En términos de aplicabilidad a la gestión, el comportamiento fenológico distintivo de una especie invasora como la *Reynoutria*, junto con la disponibilidad de imágenes Sentinel-2, supone una ventaja para estudiar su expansión en cauces, generando protocolos de alerta temprana. Asimismo, el uso de métricas fenológicas con datos anuales puede ser aplicado a la modelización de hábitats en ambientes dinámicos, como son los riparios, considerando tanto las formaciones maduras como las incipientes. Las herramientas disponibles y el elevado tamaño muestral (N = 4165) permitirían desarrollar modelos sofisticados con distintos tipos de variables en trabajos futuros. Un grupo de variables con gran potencial serían los rasgos (*traits*) funcionales de cada formación. Además, los datos LiDAR permiten generar variables estructurales más allá de la altura de la vegetación (con efecto mínimo en este trabajo), como la densidad o la diversidad de alturas. Finalmente, asumiendo que la plasticidad fenológica varía según la especie (Vitasse *et al.*, 2013), es procedente incorporar interacciones en los modelos, cuantificando el efecto de la composición en función del año o de valores ambientales propios de cada año.

Aunque la aproximación para el cálculo de SoS y EoS es computacionalmente sencilla y se ajusta a la fenología propia de Cantabria (foliación típica en abril y senescencia en octubre), la transferencia a otras regiones podría facilitarse mediante su cálculo como día juliano, así como empleando el mes de máximo EVI para determinar *Peak*. Las variables ambientales se corresponden con datos climáticos medios, pero sería conveniente aprovechar datos meteorológicos anuales para obtener resultados más precisos de la influencia ambiental, siendo las temperaturas de la fase de crecimiento más efectivas que los agregados (Körner, 2007). La variación interanual de SoS señala la necesidad de trabajar con variables ambientales específicas de cada momento. Además, la demostrada influencia de la temperatura en la fenología riparia puede suponer un riesgo para el funcionamiento de estos ecosistemas ante el cambio climático. Por tanto, el estudio de la fenología permite identificar las vulnerabilidades o grado de adaptación de la vegetación riparia ante cambios de regímenes de temperaturas. Estas consideraciones serán incorporadas en los futuros desarrollos más inmediatos.

5. REFERENCIAS

De Beurs, K. M., & Henebry, G. M. (2009). Spatio-Temporal Statistical Methods for Modelling Land

Surface Phenology. En *Phenological Research* (pp. 177-208). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3335-2_9

- Dronova, I., & Taddeo, S. (2022). Remote sensing of phenology: Towards the comprehensive indicators of plant community dynamics from species to regional scales. *Journal Of Ecology*, *110*(7), 1460-1484. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13897>
- Fridley, J. D. (2012). Extended leaf phenology and the autumn niche in deciduous forest invasions. *Nature*, *485*(7398), 359-362. <https://doi.org/10.1038/nature11056>
- Huylenbroeck, L., Laslier, M., Dufour, S., Georges, B., Lejeune, P., & Michez, A. (2020). Using remote sensing to characterize riparian vegetation: A review of available tools and perspectives for managers. *Journal Of Environmental Management*, *267*, 110652. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110652>
- Jiang, J., Yu, Q., Mickler, R. A., Tang, Q., Liang, T., Zhang, H., Song, K., & Wang, S. (2023). Forest Phenology under Differing Topographic Conditions: A Case Study of Changbai Mountain in Northeast China. *Forests*, *14*(7), 1466. <https://doi.org/10.3390/f14071466>
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends In Ecology & Evolution*, *22*(11), 569-574. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.006>
- Ma, X., Zhu, X., Xie, Q., Jin, J., Zhou, Y., Luo, Y., Liu, Y., Tian, J., & Zhao, Y. (2022). Monitoring nature's calendar from space: Emerging topics in land surface phenology and associated opportunities for science applications. *Global Change Biology*, *28*(24), 7186-7204. <https://doi.org/10.1111/gcb.16436>
- Mei, L., Bao, G., Tong, S., Yin, S., Bao, Y., Jiang, K., Hong, Y., Tuya, A., & Huang, X. (2021). Elevation-dependent response of spring phenology to climate and its legacy effect on vegetation growth in the mountains of northwest Mongolia. *Ecological Indicators*, *126*, 107640. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107640>
- Naiman, R. J., & Décamps, H. (1997). The Ecology of Interfaces: Riparian Zones. *Annual Review Of Ecology And Systematics*, *28*(1), 621-658. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
- Rout, M. E., & Callaway, R. M. (2009). An invasive plant paradox. *Science*, *324*(5928), 734-735. <https://doi.org/10.1126/science.1173651>
- Stendardi, L., Karlsen, S. R., Niedrist, G., Gerdol, R., Zebisch, M., Rossi, M., & Notarnicola, C. (2019). Exploiting Time Series of Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery to Detect Meadow Phenology in Mountain Regions. *Remote Sensing*, *11*(5), 542. <https://doi.org/10.3390/rs11050542>
- Vitasse, Y., Hoch, G., Randin, C. F., Lenz, A., Kollas, C., Scheepens, J. F., & Körner, C. (2013). Elevational adaptation and plasticity in seedling phenology of temperate deciduous tree species. *Oecologia*, *171*(3), 663-678. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2580-9>