

Caracterización de la fenología de la vegetación a escala global mediante series temporales SPOT VEGETATION

Aleixandre Verger^(1,2,3), Iolanda Filella^(1,2), Frédéric Baret⁽³⁾, Josep Peñuelas^(1,2)

⁽¹⁾ CREAM, Cerdanyola del Vallès 08193, Catalunya, España. e-mail: verger@creaf.uab.cat, i.filella@creaf.uab.cat

⁽²⁾ CSIC, Global Ecology Unit, Cerdanyola del Vallès 08193, Catalunya, España. e-mail: josep.penuelas@uab.cat

⁽³⁾ INRA UMR114 EMMAH, Domaine Saint-Paul, 84914 Avignon, Francia. e-mail: baret@avignon.inra.fr

Resumen: La fenología de la vegetación a escala global se caracterizó a partir de series temporales del índice de área foliar (LAI) SPOT VEGETATION a 1-km de resolución espacial en el periodo 1999-2010. Los patrones espaciales de la fenología estimada a partir de datos de satélite muestran una gran consistencia con la distribución de biomas y factores climáticos. La comparación de la fenología SPOT VEGETATION con medidas *in-situ* para las fenofases del abedul común (*Betula pendula*) en Europa muestra un gran acuerdo en el gradiente latitudinal de temperatura con un descenso en la duración de la estación de crecimiento de 5 días por grado de latitud.

Palabras clave: Fenología a escala global, VEGETATION, índice de área foliar, factores climáticos, medidas *in-situ*

Global phenology from SPOT VEGETATION time series

Abstract: We characterized the phenology of the vegetation at the global scale from the mean seasonal leaf area index (LAI) estimated from 1-km SPOT VEGETATION time series for 1999-2010. The satellite-derived phenology was spatially consistent with the global distributions of climatic drivers and biome land cover. The rate of change of phenological leaf development from VEGETATION data and *in-situ* observations for the date of phenophases of European birch forests agreed very well with latitudinal temperature with a decrease in the length of season of approximately five days per degree of latitude.

Keywords: Global phenology, VEGETATION, leaf area index, climatic drivers, ground data

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de la dinámica temporal de la vegetación a partir de series temporales de observaciones de satélite puede contribuir de manera importante a mejorar la representación de la fenología en los modelos de los procesos de superficie, incluyendo los modelos climáticos. Los satélites de resolución espacial moderada como MODIS y VEGETATION proporcionan series temporales con una alta frecuencia de adquisición (datos diarios) adecuada para la caracterización de la fenología de la vegetación a escala global.

En la literatura existe una gran variedad de técnicas para extraer métricas de fenología a partir de series temporales de datos de satélite (De Beurs and Henebry 2010). Las estimaciones de fenología dependen además de la técnica empleada de los datos utilizados, incluyendo la resolución espacial, temporal y calidad de los mismos. El ruido y las discontinuidades en las series temporales de datos de satélite debidas principalmente a la presencia de nubes y problemas en la corrección atmosférica afectan seriamente la estimación de la fenología a partir de satélite.

A diferencia de la mayoría de estudios previos basados en el uso de índices de vegetación, en este estudio se pretende caracterizar la fenología de la vegetación a partir de estimaciones del índice de área foliar (LAI). Se utiliza el ciclo fenológico anual de LAI derivado a partir de doce años de observaciones del sensor VEGETATION/SPOT a 1-km de resolución espacial. El uso de la climatología de LAI permite caracterizar las

pautas típicas en los patrones de fenología y mejora las estimaciones en series temporales con alta frecuencia en las discontinuidades o con largos periodos sin datos (Kandasamy et al. 2013).

En primer lugar se describe la metodología utilizada para la estimación de la fenología a escala global. Seguidamente se analizan los patrones espacio-temporales y se comparan con la distribución de factores climáticos. Finalmente se compara la fenología de satélite con datos *in-situ* de las fechas de las fenofases del abedul común en Europa.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Climatología de LAI

Se utiliza la climatología GEOCLIM-LAI (Verger et al. 2015) derivada a partir de series temporales de LAI del producto GEOV1/VGT (Baret et al. 2013). Se calculó para cada píxel a 1-km de resolución como la media interanual sobre todos los años de la serie 1999-2010. Seguidamente se aplicó el filtro temporal TSGF (Verger et al. 2011) para corregir artefactos, especialmente cuando los productos GEOV1 no estaban disponibles para un periodo determinado a lo largo de los distintos años de la serie. TSGF se basa en el uso de técnicas de interpolación lineal para cubrir huecos y de la aplicación de un filtro de suavizado tipo Savitzky-Golay basado en un polinomio de grado 2 y ventanas asimétricas que incluyen 3 valores válidos entorno a la fecha de procesado. Además se aplicaron correcciones específicas en bosques tropicales y en altas latitudes en el hemisferio norte donde la presencia de nubes y nieve,

respectivamente, compromete la calidad de las estimaciones (Verger et al. 2015).

2.2. Cálculo de la métrica de fenología

A partir del ciclo anual del LAI se definen las siguientes fenofases (Figura 1):

- La fecha de máximo de crecimiento se define como la fecha para la cual el LAI alcanza el valor máximo de su ciclo anual.
- Fecha de inicio de la estación de crecimiento se calcula como la fecha a partir de la cual el LAI alcanza un umbral, definido como el percentil 30 de su amplitud.
- La fecha de fin de la estación de crecimiento se define como la primera fecha con un valor de LAI menor que el valor alcanzado para la fecha de inicio de la estación de crecimiento.
- La duración de la estación de crecimiento se calcula como la longitud del periodo entre la fecha de inicio y fin de la estación de crecimiento.

Estas fenofases se calculan únicamente para las zonas con una única estación de crecimiento a lo largo del ciclo fenológico anual. Los píxeles con dos o más estaciones por año natural (e.g. algunos cultivos de arroz) o con una variación estacional insuficiente no se consideran para el cálculo de las fenofases (e.g. bosques tropicales o zonas desérticas).

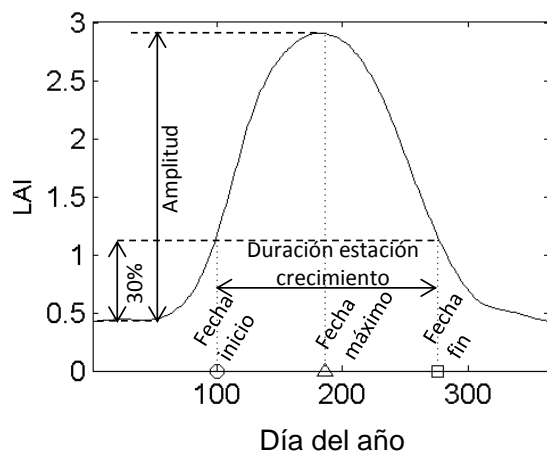


Figura 1. Ilustración de la extracción de las fenofases correspondientes a la fecha de inicio, máximo, fin y duración de la estación de crecimiento a partir del perfil temporal medio anual de LAI de una zona de cultivos (45°N, 19°E).

2.3. Validación

Para el análisis y validación de las estimaciones de fenología derivadas a partir de GEOCLIM se utilizan:

- Datos climáticos de re-análisis WFDEI (Weedon et al. 2014) de temperatura del aire y de precipitación anual acumulada.
- Medidas *in-situ* de las fechas de las fenofases del abedul común (*Betula pendula*) a partir de

la base de datos PEP725 (<http://www.pep725.eu>). Se consideran datos de Finlandia, Lituania, Alemania y Croacia (Figura 2) con un gradiente latitudinal nortesur de 68.4° a 44.5° y una variación anual de la temperatura de -1.3 a 11.9°C.

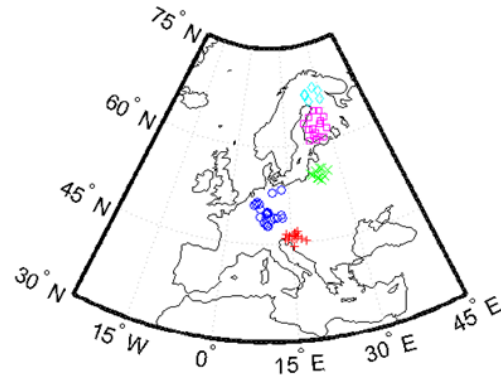


Figura 2. Localización de las medidas in-situ en Finlandia (para latitudes >65° (◇) y <65° (□)), Lituania (x), Alemania (o), y Croacia (+).

3. RESULTADOS

3.1. Patrones espacio-temporales de la fenología de la vegetación a escala global y factores climáticos

La distribución espacial de la fenología global (Figura 3) refleja la distribución de biomas y factores climáticos. Los patrones observados son complejos y dependen de las interacciones entre clima, funcionamiento de la vegetación y distribución de especies.

Para latitudes <40°, la duración de la estación de crecimiento está altamente correlacionada con la precipitación anual acumulada (Figura 4). La duración de la estación de crecimiento en el hemisferio sur de 35°S a 0° aumenta de 150 a 230 días con el aumento medio anual de la precipitación de 500 a 2000 mm. La duración de la estación de crecimiento disminuye bruscamente de 0° a 15° N con el gradiente latitudinal negativo sur-norte en el régimen de precipitación en la región del Sahel donde el agua es el mayor factor limitante del desarrollo de la vegetación. Los patrones espaciales son más complejos de 15°N a 40°N debido a la combinación de diferentes regímenes fenológicos y regiones climáticas que varían de zonas tropicales a climas mediterráneos.

La fenología del LAI en latitudes nortes >40° es fuertemente dependiente de la disminución latitudinal de la temperatura (<10°C) que, a su vez, está intrínsecamente correlacionada con la disminución de la radiación solar y la precipitación (Figura 4). La fecha de inicio (fin) de la estación de crecimiento (Figura 3) muestra un patrón espacial claro con un gradiente

latitudinal negativo (positivo) correspondiente a un retraso (avance) en la fecha de inicio (fin) que se traduce en estaciones más cortas (Figuras 3 y 4).

3.2. Comparación con medidas *in-situ*

La fenología derivada a partir de satélite con datos GEOCLIM-LAI reproduce fielmente el patrón latitudinal observado en las medidas *in-situ*, con un retraso de 50 días en la fecha de inicio de la estación de crecimiento y un avance similar en la fecha de fin de la estación desde 45° N a 70° N. Esto se traduce en estaciones aproximadamente 100 días más cortas en respuesta al descenso de -10°C en la temperatura anual media (Figura 5). El gradiente de cambio en la duración de crecimiento observado tanto a partir de medidas *in-situ* como de datos de satélite es de aproximadamente cinco días por grado de latitud.

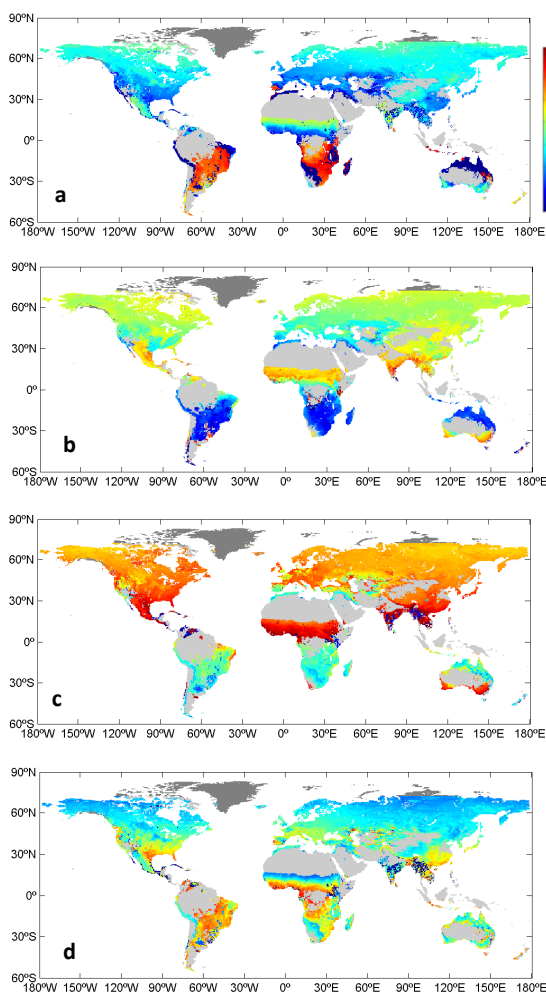


Figura 3. Mapa de las métricas de fenología para las fechas de (a) inicio, (b) máximo, (c) fin, y (d) duración de la estación de crecimiento. En las zonas en gris claro la fenología no ha sido calculada porque la señal LAI no presenta suficiente estacionalidad, o presenta dos o más estaciones de crecimiento por año. Las zonas en gris oscuro corresponden a las zonas sin datos LAI.

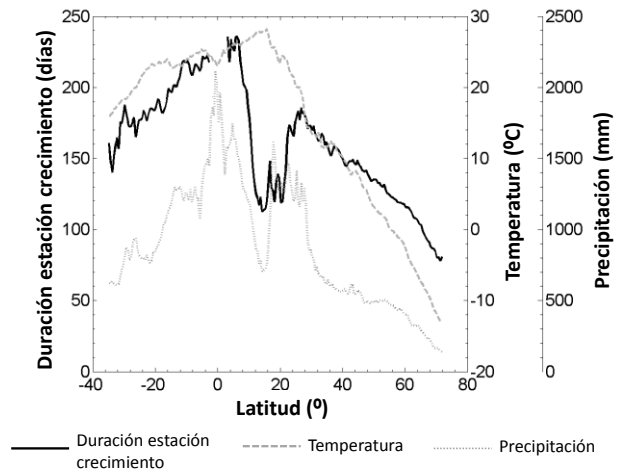


Figura 4. Transectos latitudinales de la duración media de la estación de crecimiento derivada a partir de GEOCLIM-LAI, media anual de la temperatura del aire y precipitación anual acumulada.

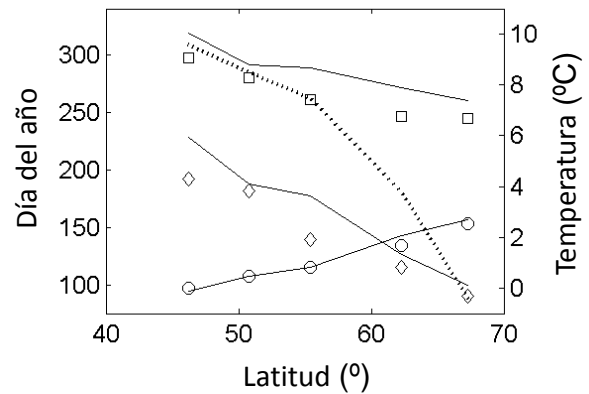


Figura 5. Transectos latitudinales de las fenofases de abedul común en Europa para las fechas de inicio (o), fin (□), y duración de la estación de crecimiento (◇), a partir de datos *in-situ* y a partir de datos de satélite GEOCLIM-LAI (líneas continuas). La línea discontinua indica el gradiente de la temperatura del aire media anual.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se caracteriza la fenología de la vegetación a escala global a partir de la climatología GEOCLIM-LAI derivada a partir de doce años de observaciones VEGETATION. La fenología de satélite refleja el régimen esperado de la variación estacional en el ciclo anual de la vegetación según la distribución espacial en la ocupación del suelo y los factores climáticos dominantes. El descenso latitudinal en la temperatura, radiación y precipitación controla las fechas de desarrollo de la vegetación en latitudes >40°. Los patrones espaciales son más complejos para latitudes <40° pero se observa una alta correlación espacial entre el régimen de precipitaciones y la duración de la estación de crecimiento. La comparación con datos *in-situ* de abedul común en Europa confirma que el gradiente latitudinal de la fenología GEOCLIM-

LAI responde a las pautas observadas con un descenso de cinco días por grado de latitud.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por los programas Copernicus, *le Pôle Thématique Surfaces Continentales THEIA*, y los proyectos FP7 geoland2 (218795), GIOBIO (32-566), LONGLOVE (32-594), CGL2013-48074-P, SGR 2014-274 y IMBALANCE-P (ERC-2013-SyG-610028). A. Verger es beneficiario de un contrato Juan de la Cierva del Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., & Smets, B. (2013). GEOV1: LAI, FAPAR Essential Climate Variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 137, 299-309
- De Beurs, K.M., & Henebry, G.M. (2010). Spatio-Temporal Statistical Methods for Modelling Land Surface Phenology. In I.L. Hudson, & M.R. Keatley (Eds.), *Phenological Research: Methods for Environmental and Climate Change Analysis* (pp. 177-208). London: Springer
- Kandasamy, S., Baret, F., Verger, A., Neveux, P., & Weiss, M. (2013). A comparison of methods for smoothing and gap filling time series of remote sensing observations: application to MODIS LAI products. *Biogeosciences*, 10, 4055-4071
- Verger, A., Baret, F., & Weiss, M. (2011). A multisensor fusion approach to improve LAI time series. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2460-2470
- Verger, A., Baret, F., Weiss, M., Filella, I., & Peñuelas, J. (2015). GEOCLIM: a global climatology of LAI, FAPAR, and FCOVER from VEGETATION observations for 1999-2010. *Remote Sensing of Environment*, *In press*
- Weedon, G.P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M.J., & Viterbo, P. (2014). The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50, 7505-7514