

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

Verger, A.^{*1,2}, Filella, I.^{1,2}, Baret, F.³, Peñuelas, J.^{1,2}

¹ CREAF, Cerdanyola del Vallès 08193, Catalunya, España.

² CSIC, Global Ecology Unit, Cerdanyola del Vallès 08193, Catalunya, España.

³ INRA, UMR114 EMMAH, Domaine Saint-Paul 84914, Avignon, Francia.

Resumen: La teledetección debe contribuir a mejorar la representación de la fenología en los modelos climáticos. En este estudio se ha caracterizado la fenología típica de la vegetación a escala global mediante GEOCLIM-LAI, una climatología del índice de área foliar (LAI) calculada a partir de series temporales en el periodo 1999-2010 de datos SPOT VEGETATION a 1-km de resolución espacial. A partir de la calibración con observaciones *in situ*, el inicio y fin de la estación de crecimiento se han definido como la fecha para la cual el LAI alcanza, respectivamente, el 30% y 40% de la amplitud de su ciclo anual. Los patrones espaciales de la fenología de satélite muestran una gran consistencia con la distribución espacial de cubiertas vegetales y factores climáticos. La comparación con medidas *in situ* para las fenofases correspondientes al inicio, fin y duración de la estación de crecimiento de abedul común en Europa, cerezo en Asia y lilo en Norte América muestra errores medios menores de 19 días, y un gran acuerdo en el gradiente latitudinal de la fenología observada *in situ* y estimada a partir de series temporales LAI VEGETATION.

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

Land surface phenology from SPOT VEGETATION time series

Abstract: Land surface phenology from time series of satellite data are expected to contribute to improve the representation of vegetation phenology in earth system models. We characterized the baseline phenology of the vegetation at the global scale from GEOCLIM-LAI, a global climatology of leaf area index (LAI) derived from 1-km SPOT VEGETATION time series for 1999-2010. The calibration with ground measurements showed that the start and end of season were best identified using respectively 30% and 40% threshold of LAI amplitude values. The satellite-derived phenology was spatially consistent with the global distributions of climatic drivers and biome land cover. The accuracy of the derived phenological metrics, evaluated using available ground observations for birch forests in Europe, cherry in Asia and lilac shrubs in North America showed an overall root mean square error lower than 19 days for the start, end and length of season, and good agreement between the latitudinal gradients of VEGETATION LAI phenology and ground data.

Key words: 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 SPOT VEGETATION proporcionan series

* Autor para la correspondencia: verger@creaf.uab.cat

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). Estas se basan en el uso de umbrales (Jönsson and Eklundh, 2002), medias móviles (Reed *et al.*, 1994), primeras y segundas derivadas (White *et al.*, 2009), puntos de inflexión de funciones logísticas (Zhang *et al.*, 2003), o modelos empíricos basados en variables climáticas (Cesaraccio *et al.*, 2004), entre otros. White *et al.* (2009) encontraron diferencias de hasta dos meses en la estimación de la fecha de inicio de la estación de crecimiento en Norte América según el método empleado.

Las estimaciones de fenología dependen, además de la técnica empleada, de los datos utilizados, incluyendo la resolución espacial, temporal y calidad de los mismos (Atzberger *et al.*, 2013; Pouliot *et al.*, 2011). 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 (Kandasamy *et al.*, 2013). Las técnicas de composición temporal y los filtros temporales de suavizado permiten mejorar la consistencia y continuidad de las series temporales de datos de satélite como paso previo a la extracción de métricas de fenología (Atkinson *et al.*, 2012). Sin embargo, el método de composición o filtrado temporal puede afectar significativamente la estimación de la fenología, en particular para series temporales con periodos largos con discontinuidad en los datos o ruido en los mismos (Kandasamy *et al.*, 2013; Verger *et al.*, 2013).

A diferencia de la mayoría de estudios previos basados en el uso de índices espectrales de vegetación, en este estudio se ha caracterizado la fenología de la vegetación a partir de estimaciones del índice de área foliar (LAI, *leaf area index*). El LAI presenta numerosas ventajas frente a los índices espectrales para la estimación de la fenología, incluyendo menores problemas de saturación para niveles altos, mayor robustez frente al cambio de sensores y menor sensibilidad frente a las diferencias en las características espectrales de los mismos

(Baret and Guyon, 1991; Myneni and Williams, 1994). Además, el LAI es un parámetro biofísico directamente relacionado con las medidas que se realizan en el campo para la caracterización de la fenología en base a la cantidad de las hojas. En este trabajo, utilizamos 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, definida como la media interanual de los valores de LAI para cada fecha a lo largo de un año natural, permite caracterizar las pautas típicas en los patrones de fenología y mejora las estimaciones en series temporales con alta frecuencia de discontinuidades o con largos periodos sin datos (Kandasamy *et al.*, 2013; Verger *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, lilo en Estados Unidos y cerezo en Japón. El presente trabajo es una ampliación de una contribución al congreso de la asociación española de teledetección y constituye, así mismo, una prolongación de un trabajo previo de los mismos autores (Verger *et al.*, 2016). En particular, se ha realizado un esfuerzo en mejorar la validación directa de los productos de fenología de satélite utilizando un mayor número de medidas *in situ* y una mayor representatividad espacial de las mismas. Además, se ha realizado una comparación más detallada de la variación de la fenología con los patrones climáticos dominantes.

2. Material y métodos

2.1. Climatología de LAI

Para caracterizar el ciclo anual de la vegetación utilizamos la climatología GEOCLIM-LAI (Verger *et al.*, 2015) derivada a partir de series temporales de LAI del producto GEOV1/VGT (Baret *et al.*, 2013). Estudios recientes de evaluación (Camacho *et al.*, 2013) ponen de manifiesto que el producto GEOV1/VGT mejora otros productos existentes de LAI (MODIS c5, CYCLOPES v3.1, GLOBCARBON v2) en términos de exactitud con

el LAI observado en el terreno: mayor correlación ($R^2=0,81$) y menor error (0,7 LAI). Las mayores incertidumbres en los productos LAI se observan en zonas de bosques debido, principalmente, al mayor ruido (nubes, nieve, condiciones iluminación extremas, etc.) y saturación de la señal para los valores de LAI más altos. Además de las ventajas en términos de exactitud y precisión, el producto GEOV1/VGT ofrece mejoras en términos de consistencia temporal y suavidad de las series temporales, lo cual resulta de gran importancia para el estudio de la fenología (Atkinson *et al.*, 2012).

GEOCLIM-LAI (Verger *et al.*, 2015) se calculó para cada píxel a 1-km de resolución espacial y con una frecuencia temporal de 10 días como la media interanual sobre todos los años de la serie 1999-2010 para cada fecha (36 valores por año). 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 latitudes altas 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):

- Fecha de máximo 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 determinado umbral entre el percentil 10% y 50% de la amplitud de su ciclo anual. La fiabilidad de las estimaciones en base a las diferentes definiciones se evaluó a partir de la comparación con medidas *in situ* y se seleccionó el percentil 30% para el cálculo de la fecha de inicio de la estación de crecimiento. Los resultados se presentan en la sección 3.2.

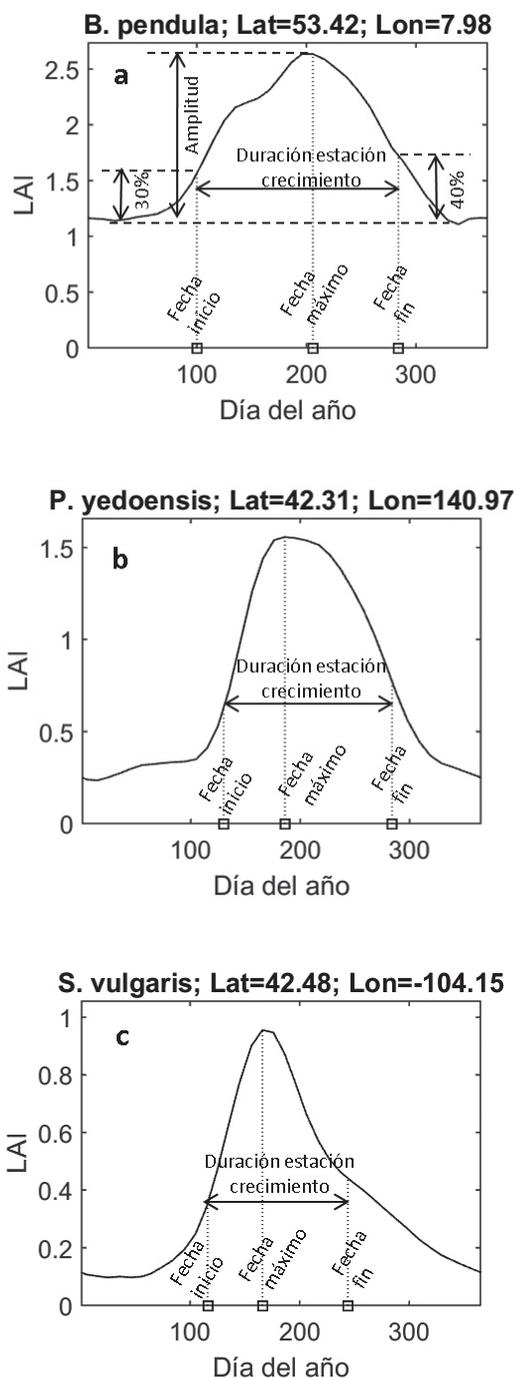


Figura 1. Ilustración de la extracción de las fenofases correspondientes a la fecha de inicio, máximo, fin y duración de la estación de crecimiento a partir del perfil temporal del ciclo anual de LAI en tres de las estaciones de medida analizadas: (a) abedul común en Europa, (b) cerezo en Asia y (c) lilo en América. Se indica la latitud y longitud (en grados) de las medidas.

- Fecha de fin de la estación de crecimiento. Se define como la fecha para la cual el valor de LAI desciende hasta el percentil 40% de la amplitud (véase sección 3.2).
- 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.

La fenología no se calculó para los píxeles con una variación máxima anual de LAI menor a 0,1 y al 30% del valor medio anual de LAI. Se considera que dichos píxeles no presentan ninguna estación de crecimiento. Estos píxeles corresponden, en la mayoría de los casos, a bosques tropicales o zonas desérticas (zonas en gris en la Figura 3).

2.3. Metodología de validación

Para el análisis y validación de las estimaciones de fenología derivadas a partir de GEOCLIM se utilizan datos climáticos y medidas *in situ*.

2.3.1. Datos climáticos

Se utilizaron datos climáticos de re-análisis WFDEI (Weedon *et al.*, 2014) de temperatura del aire y de precipitación anual acumulada. Estos datos tienen una resolución espacial de 0,5°. Para analizar la fenología típica estimada a partir de la climatología LAI, calculamos una climatología de temperatura y precipitación como la media interanual en el periodo 1999-2010.

2.3.2. Medidas *in situ*

Utilizamos medidas *in situ* de las fechas de las fenofases de (i) lilo (*Syringa vulgaris*) en Estados Unidos (*USA National Phenology Network*, <http://www.usanpn.org>), (ii) cerezo (*Prunus yedoensis*) en Japón (Agencia meteorológica de Japón, <http://www.jma.go.jp>), y (iii) abedul común (*Betula pendula*) en Europa (base de datos PEP725, <http://www.pep725.eu>) (Figura 2). Estas medidas corresponden a observaciones

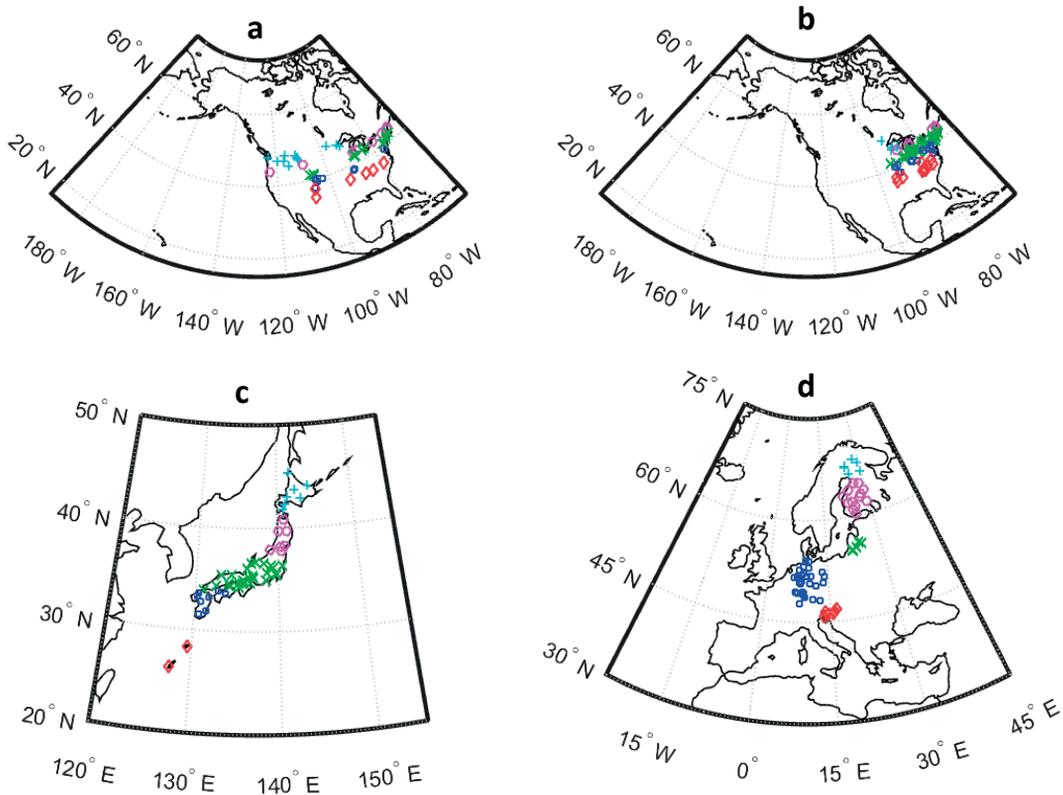


Figura 2. Localización de las medidas *in situ* de las fenofases correspondientes al (a) inicio y (b) final de la estación de crecimiento de *S. vulgaris* en Norte América, (c) inicio de la estación de *P. yedoensis* en Japon, y (d) inicio, final y duración de la estación de *B. pendula* en Europa. En cada caso, las medidas se agrupan por colores en cinco intervalos de latitud.

realizadas por voluntarios sobre un conjunto de plantas que no necesariamente reproducen la variabilidad espacial en un píxel de 1 km del sensor VEGETATION (Liang *et al.*, 2011).

Las fenofases para los datos de lilo corresponden a la salida de todas las hojas (inicio estación) y 50% de hojas con tonos rojizos (fin estación). Para el cerezo se tienen datos de floración que se aproxima a la fecha de inicio de la estación puesto que la floración precede unos pocos días la salida de las primeras hojas (Nagai *et al.*, 2015). En el caso del abedul europeo, las medidas corresponden a las fechas de brotación (inicio estación) y 50% de hojas con tonos rojizos (fin estación). Dichas medidas de inicio y fin de la estación de crecimiento de abedul se tomaron sobre los mismos puntos de muestreo y se calculó la duración de la estación de crecimiento como la diferencia entre las fechas de ambas fenofases. Las medidas *in situ* de abedul en Europa permiten además hacer un análisis del patrón latitudinal y con la temperatura (véase apartado 3.2) dado que se disponen datos de Finlandia, Lituania, Alemania y Croacia (Figura 2d) con un gradiente latitudinal norte-sur de 68,5° a 44,5° y una variación anual de la temperatura de -1 a 10°C.

Para comparar las medidas *in situ* con la fenología típica derivada a partir de GEOCLIM-LAI, primero, extraemos los valores de fenología de satélite de los píxeles más próximos a las coordenadas de las observaciones *in situ* y, segundo, calculamos los valores medios de los datos *in situ* disponibles en el periodo 1999-2010. En el caso del cerezo los valores disponibles se refieren a la media del periodo 1981-2010 (Nagai *et al.*, 2015).

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 (Figura 4a). Los patrones observados son complejos y dependen de las interacciones entre clima, funcionamiento de la vegetación y distribución de especies (Rodríguez-Galiano *et al.*, 2015).

Para latitudes <35°, la duración de la estación de crecimiento está positivamente correlacionada (coeficiente de correlación lineal, $R=0,54$; coeficiente de determinación, $R^2=0,29$; $p<0,05$) con la precipitación anual acumulada (Figura 4b). 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 (Figura 4a). 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 35°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 septentrionales >35° es fuertemente dependiente ($R=0,61$; $R^2=0,37$; $p<0,05$) de la disminución latitudinal de la temperatura (<15°C) (Figura 4c) que, a su vez, está intrínsecamente correlacionada con la disminución de la radiación solar y la precipitación (Figura 4a). 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 para latitudes altas (Figuras 3 y 4).

3.2. Comparación con medidas *in situ*

La comparación de la fenología derivada a partir de GEOCLIM-LAI con las medidas *in situ* muestra, para las diferentes especies, que la definición de las métricas de satélite que mejor se ajusta a las observaciones de terreno para la fecha de inicio de la estación de crecimiento corresponde al percentil 30% de la amplitud LAI (Tabla 1). En cambio, las estimaciones realizadas en base al percentil 40% de la amplitud se ajustan mejor a las medidas *in situ* para la fecha de fin de estación de crecimiento. La combinación del percentil 30% y 40% proporciona las mejores estimaciones de la duración de la estación de crecimiento.

La fiabilidad en la estimación de las fenofases de lilo en Estados Unidos (Tabla 1) es de aproximadamente 18 días en términos de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) tanto para el inicio

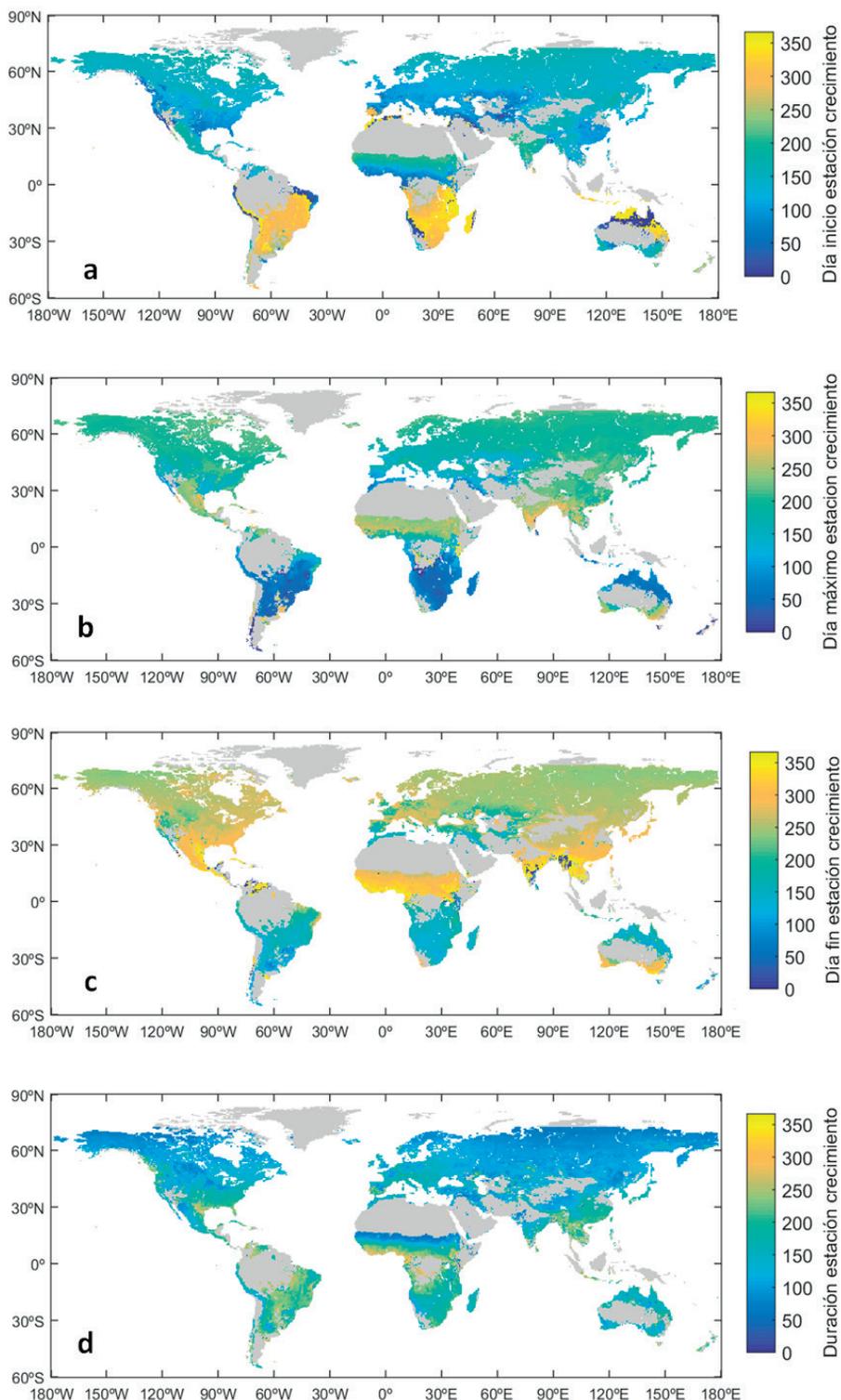


Figura 3. Mapa de las métricas de fenología para las fechas de (a) inicio, (b) máximo, (c) fin, y (d) duración de la estación de crecimiento estimadas a partir de GEOCLIM-LAI. Las zonas en gris corresponden a píxeles sin ninguna estación de crecimiento o sin datos LAI.

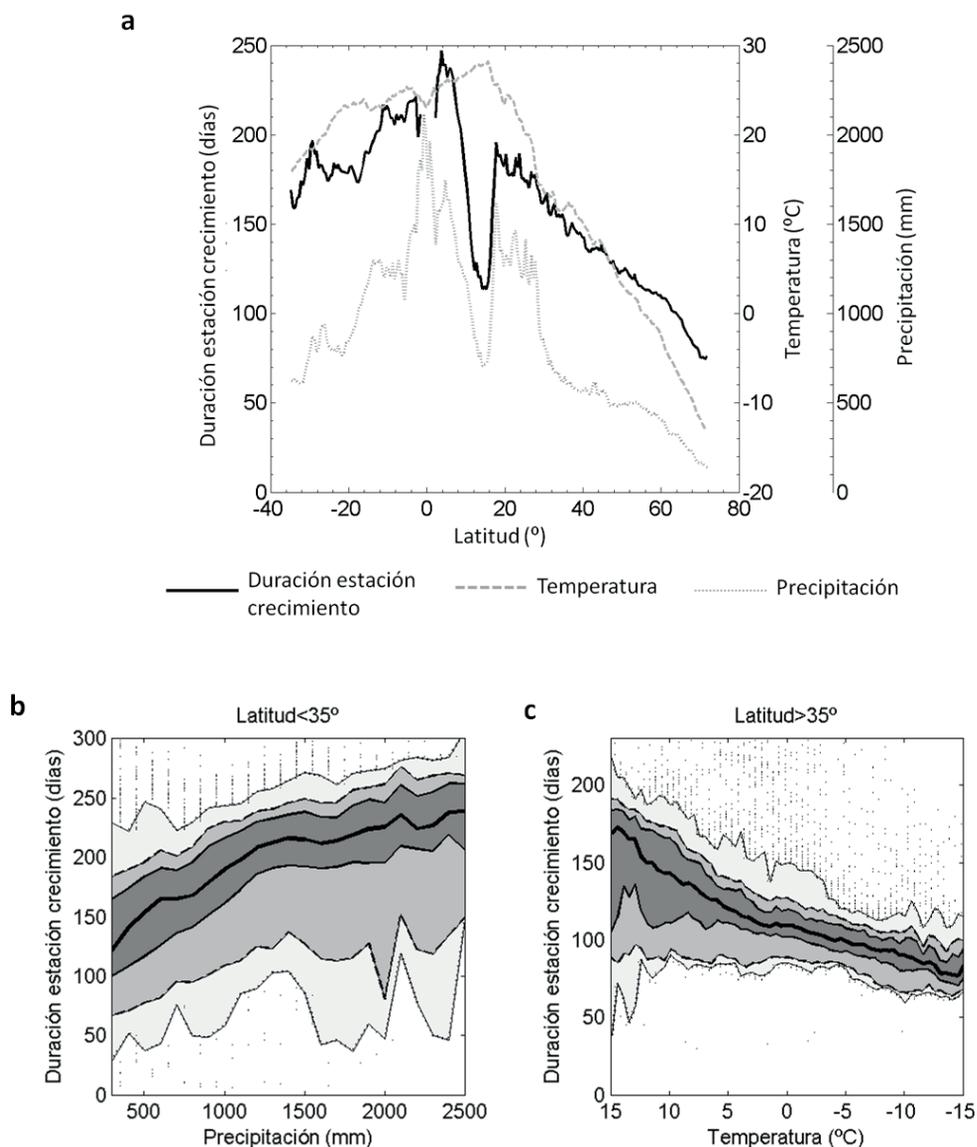


Figura 4. (a) Transectos latitudinales de la duración media de la estación de crecimiento derivada a partir de GEOCLIM-LAI, media anual de la temperatura del aire y precipitación anual acumulada. (b) Relación entre la duración de la estación de crecimiento y la precipitación acumulada para latitudes menores a 35°. (c) Relación entre la duración de la estación de crecimiento y la temperatura para latitudes mayores a 35°. La línea en negra corresponde a la duración mediana. Las áreas en gris corresponden a los percentiles 75% (gris oscuro), 85% (gris medio) y 95% (gris claro) de la distribución de valores.

(Figura 5a) como final de la estación (Figura 5b). La estimación de la fecha de inicio de la estación de crecimiento del cerezo en Japón presenta un error RMSE similar pero en este caso se observan además desviaciones sistemáticas con las medidas *in situ* con una diferencia media de 10 días

(Tabla 1, Figura 5c). Las estimaciones de satélite para la fecha de inicio son más tardías que las observaciones *in situ*. Esto se debe a las diferencias en la definición de las fenofases. Las estimaciones en base al LAI están relacionadas con la salida de las hojas mientras que las observaciones *in situ*

Tabla 1. Estadísticos de la comparación entre la fenología derivada a partir de GEOCLIM-LAI y las observaciones *in situ* para el inicio, fin y duración de la estación de crecimiento para las diferentes especies. Para las métricas de fenología de satélite se consideran diferentes definiciones en base al percentil 20%, 30%, 40% y 50% de la amplitud del LAI. En negrita se destaca el método seleccionado. *n*: número de observaciones. *RMSE*: raíz cuadrada del error cuadrático medio. *DIF*: diferencias medias entre la fenología de satélite menos las observaciones *in situ*. *R*²: coeficiente de determinación. Valores *F* y *p* del test de significancia de la regresión lineal. *b*: pendiente, y *a*: ordenada en el origen del ajuste lineal.

Especie	Fenofase	Definición	<i>RMSE</i> (días)	<i>DIF</i> (días)	<i>R</i> ²	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>b</i>	<i>a</i> (días)
<i>S. vulgaris</i>	Inicio estación (<i>n</i> =53)	20%	27,56	-14,26	0,13	7,32	0,009	0,46	47,16
		30%	18,92	-2,69	0,25	16,25	0,0002	0,54	50,02
		40%	19,11	3,68	0,26	17,65	0,0001	0,57	52,74
	Fin estación (<i>n</i> =72)	20%	27,86	19,63	0,06	4,76	0,03	0,22	246,29
		30%	19,00	6,68	0,09	6,81	0,011	0,21	236,90
		40%	17,32	-3,31	0,11	8,47	0,005	0,21	227,46
		50%	21,01	10,32	0,27	18,85	7×10 ⁻⁵	0,57	59,02
		50%	21,79	-13,32	0,11	8,28	0,005	0,22	214,52
		50%	19,94	-1,62	0,35	26,05	6×10 ⁻⁶	0,65	30,78
<i>P. yedoensis</i>	Inicio estación (<i>n</i> =50)	20%	19,94	-1,62	0,35	26,05	6×10 ⁻⁶	0,65	30,78
		30%	18,76	9,54	0,49	45,65	<1×10⁻⁶	0,69	38,41
		40%	60,70	30,24	0,04	1,98	0,17	0,50	76,45
	50%	31,25	24,74	0,39	31,17	<1×10 ⁻⁶	0,69	53,31	
	50%	14,61	-8,54	0,74	163,58	<1×10 ⁻⁶	1,07	-17,36	
	30%	7,22	0,66	0,90	529,04	<1×10⁻⁶	1,12	-13,66	
<i>B. pendula</i>	Inicio estación (<i>n</i> =59)	20%	14,61	-8,54	0,74	163,58	<1×10 ⁻⁶	1,07	-17,36
		30%	7,22	0,66	0,90	529,04	<1×10⁻⁶	1,12	-13,66
		40%	27,27	10,44	0,34	28,86	2×10 ⁻⁶	0,97	14,43
	50%	14,78	13,08	0,91	555,22	<1×10 ⁻⁶	1,11	0,42	
	20%	33,49	31,27	0,65	106,63	<1×10 ⁻⁶	0,85	72,82	
	30%	23,08	19,76	0,63	96,61	<1×10 ⁻⁶	0,77	81,92	
	Fin estación (<i>n</i> =59)	40%	15,00	6,59	0,52	62,13	<1×10⁻⁶	0,66	99,00
		50%	23,74	-10,46	0,15	10,30	0,002	0,41	147,63
		20%	44,13	39,81	0,79	219,44	<1×10 ⁻⁶	1,06	31,29
	Duración estación (<i>n</i> =59)	30%	23,89	19,10	0,87	373,78	<1×10 ⁻⁶	1,04	13,12
		40%	27,12	-3,85	0,58	78,99	<1×10 ⁻⁶	0,89	12,94
		50%	31,48	-23,54	0,67	114,40	<1×10 ⁻⁶	0,78	9,14
		30-40%	15,71	5,93	0,85	312,91	<1×10⁻⁶	0,97	11,12

corresponden a la fecha de floración del cerezo que precede la aparición de las primeras hojas. A pesar de estas diferencias, tanto las estimaciones de satélite como las observaciones muestran un mismo patrón espacial en Japón con un retraso en la fecha de inicio de la estación de crecimiento con la latitud (comparar Figura 5c con Figura 2c para la localización de los puntos).

En el caso del abedul común en Europa, la estimación de la fecha de inicio de la estación de crecimiento muestra un gran acuerdo con las medidas *in situ*: error RMSE de aproximadamente

7 días sin prácticamente desviaciones sistemáticas (diferencias medias próximas a cero) (Tabla 1, Figura 5d). Para la fecha de fin de la estación, los errores evaluados sobre los mismos puntos de muestreo son aproximadamente el doble (Tabla 1, Figura 5e) debido tanto a las mayores incertidumbres en los productos de satélite para estas latitudes en otoño como a la dificultad intrínseca de las estimaciones *in situ* para detectar la fecha para la cual el 50% de las hojas alcanzan colores rojizos. Estas mayores incertidumbres en la detección de la fecha de fin de la estación se trasladan a la estimación de la duración de la estación de

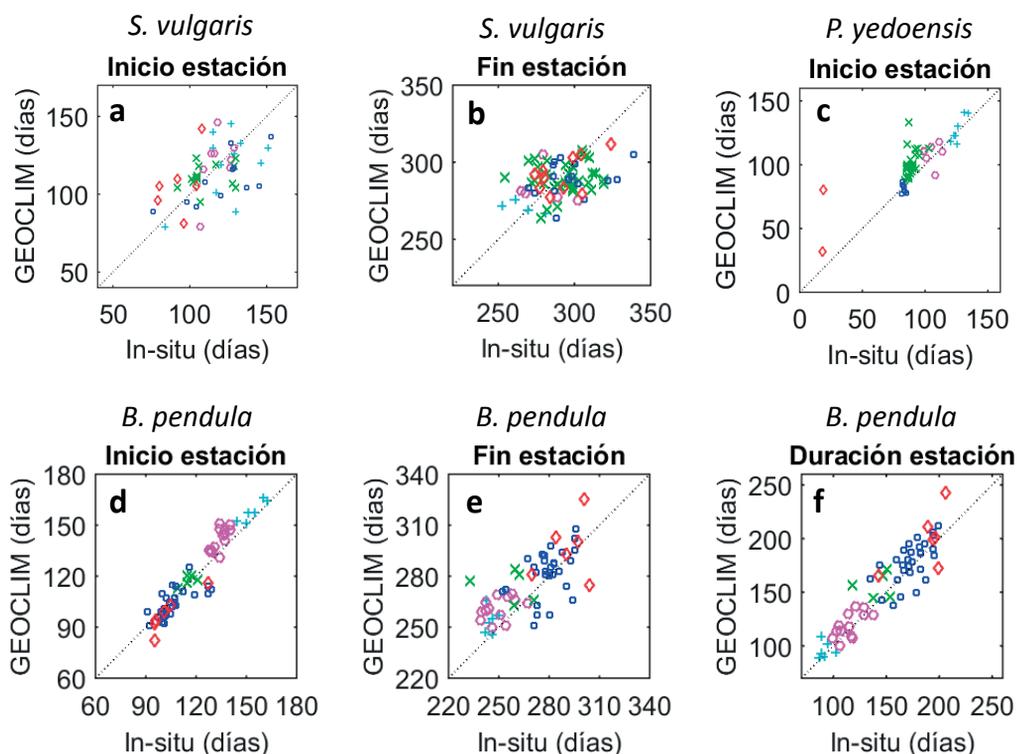


Figura 5. Validación directa de la fenología estimada a partir de GEOCLIM-LAI para las fechas de inicio, fin y duración de la estación de crecimiento en comparación con las medidas *in situ* de lilo (*S. vulgaris*) en Estados Unidos (a, b), cerezo (*P. yedonensis*) en Japón (c), y abedul (*B. pendula*) en Europa (d, e, f). La localización de las medidas y la leyenda puede verse en la Figura 2. Los estadísticos de la comparación se proporcionan en la Tabla 1.

crecimiento (Tabla 1, Figura 5f). Las diferencias observadas entre la fenología de satélite y medidas *in situ* se deben además a las diferencias en la resolución espacial de las mismas. Así por ejemplo, las medidas *in situ* se toman, en algunos casos, cerca de zonas urbanas y no representan necesariamente la fenología de satélite a 1 km de resolución.

La fenología derivada a partir de satélite con datos GEOCLIM-LAI reproduce fielmente el patrón latitudinal observado en las medidas *in situ* de las fenofases del abedul en Europa, 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 6). 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 10 días/ $^{\circ}\text{C}$.

4. Conclusiones

En este trabajo se caracterizan las pautas típicas del ciclo fenológico anual de la vegetación a escala global a partir de la climatología GEOCLIM-LAI derivada a partir de la media interanual de doce años de observaciones VEGETATION. Las métricas de fenología de satélite para el inicio y fin de la estación de crecimiento se definen como las fechas en que el LAI alcanza, respectivamente, el 30% y 40% de su amplitud anual. Estas definiciones resultan de la calibración con observaciones *in situ* de las fenofases del ciclo de crecimiento del abedul en Europa, cerezo en Japón y lilo en Estados Unidos.

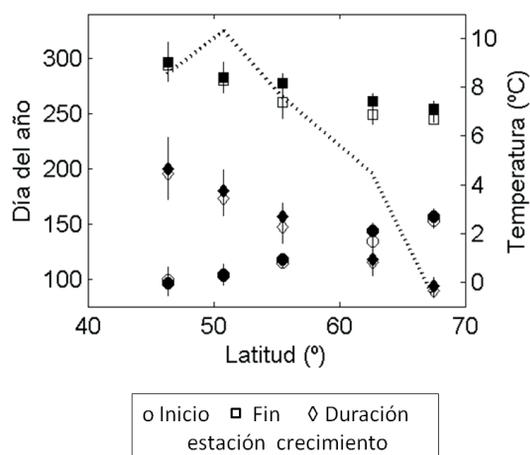


Figura 6. Transectos latitudinales de las fenofases de abedul común en Europa para las fechas de inicio (○), fin (□), y duración de la estación de crecimiento (◇), a partir de datos *in situ* (símbolos vacíos) y a partir de datos de satélite GEOCLIM-LAI (símbolos llenos). Las barras verticales corresponden a la desviación estándar de los datos. La línea discontinua indica el gradiente de la temperatura media anual del aire.

La comparación con las medidas *in situ* disponibles muestra errores medios menores de 19 días para las fechas de inicio, fin y duración de la estación de crecimiento. El mejor acuerdo se observa para el caso del abedul común en Europa para la fecha de inicio de la estación de crecimiento con diferencias de 7 días respecto las observaciones *in situ*. El abedul es una de las especies con foliación más temprana y cubre además grandes extensiones en Europa por lo que la fecha de inicio de la estación de crecimiento es más fácil de detectar desde teledetección. Se observan mayores diferencias para la fecha de fin de la estación de crecimiento o en el caso de lilo y cerezo. La comparación entre la fenología de satélite y las observaciones *in situ*, además de por las propias incertidumbres de las medidas, está afectada por numerosas dificultades debido, principalmente, al número limitado de estaciones con observaciones *in situ*, a las diferencias en la representación espacial de las medidas y a las discrepancias en la propia definición de las métricas de fenología.

La fenología de satélite derivada a partir de GEOCLIM-LAI 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 $>35^\circ$. Los patrones espaciales son más complejos para latitudes $<35^\circ$ 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* confirma que el gradiente latitudinal de la fenología GEOCLIM-LAI responde a las pautas observadas.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el programa Europeo de observación *Copernicus Global Land*, 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 fue beneficiario de un contrato Juan de la Cierva del Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España.

Referencias

- Atkinson, P.M., Jeganathan, C., Dash, J., Atzberger, C. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 123, 400-417. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.001>
- Atzberger, C., Klisch, A., Mattiuzzi, M., Vuolo, F. 2013. Phenological Metrics Derived over the European Continent from NDVI3g Data and MODIS Time Series. *Remote Sensing*, 6(2), 257-284. <https://doi.org/10.3390/rs6010257>
- Baret, F., Guyon, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3), 161-173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., Smets, B. 2013. GEOV1: LAI and 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.027>
- Camacho, F., Cernicharo, J., Lacaze, R., Baret, F., Weiss, M. 2013. GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 2: Validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment*, 137, 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.030>

- Cesaraccio, C., Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P. 2004. Chilling and forcing model to predict budburst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.03.002>
- De Beurs, K.M., Henebry, G.M. 2010. Spatio-Temporal Statistical Methods for Modelling Land Surface Phenology. I.L. Hudson, M.R. Keatley (Eds.), *Phenological Research: Methods for Environmental and Climate Change Analysis*. London: Springer. http://doi.org/10.1007/978-90-481-3335-2_9
- Jönsson, P., Eklundh, L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 1824-1832. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802519>
- 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. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4055-2013>
- Liang, L., Schwartz, M.D., Fei, S. 2011. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.013>
- Myneni, R.B., Williams, D.L. 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote sensing of the environment*, 49(3), 200-211. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90016-7)
- Nagai, S., Nasahara, K., Inoue, T., Saitoh, T., Suzuki, R. 2015. Review: advances in *in situ* and satellite phenological observations in Japan. *International Journal of Biometeorology*, 1-13.
- Pouliot, D., Latifovic, R., Fernandes, R., Olthof, I. 2011. Evaluation of compositing period and AVHRR and MERIS combination for improvement of spring phenology detection in deciduous forests. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.014>
- Reed, B.C., Brown, J.F., VanderZee, D., Loveland, T.R., Merchant, J.W., Ohlen, D.O., 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5(5), 703-714. <https://doi.org/10.2307/3235884>
- Rodriguez-Galiano, V.F., Dash, J., Atkinson, P.M. 2015. Intercomparison of satellite sensor land surface phenology and ground phenology in Europe. *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2015GL063586. <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL063586>
- Verger, A., Baret, F., Weiss, M. 2011. A multisensor fusion approach to improve LAI time series. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2460-2470. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.006>
- 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*, 166, 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.027>
- Verger, A., Baret, F., Weiss, M., Kandasamy, S., Vermote, E., 2013. The CACAO method for smoothing, gap filling and characterizing seasonal anomalies in satellite time series. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(4), 1963-1972. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2228653>
- Verger, A., Filella, I., Baret, F., Peñuelas, J. 2016. Vegetation baseline phenology from kilometeric global LAI satellite products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.057>
- 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. <https://doi.org/10.1002/2014WR015638>
- White, M.A., de Beurs, K.M., Didan, K., Inouye, D.W., Richardson, A.D., Jensen, O.P., O'Keefe, J., Zhang, G., Nemani, R.R., van Leeuwen, W.J.D., Brown, J.F., de Wit, A., Schaepman, M., Lin, X., Dettinger, M., Bailey, A.S., Kimbal, J., Schwartz, M.D., Baldocchi, D.D., Lee, J.T., Lauenroth, W.K. 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biology*, 15(10), 2335-2359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C., Huete, A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471-475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)