

## Análisis comparativo de métodos pragmáticos y modelos físicos para la estimación del LAI a escala global

Verger, Alexandre<sup>1 a</sup>; Camacho-de Coca, Fernando<sup>b</sup>; Meliá, Joaquín<sup>a</sup>

<sup>(a)</sup>Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València.

Dr Moliner n°50, 46100, València, España.

<sup>(b)</sup>EOLAB, Parc Científic Universitat de València,

P.O. Box 22085, E-46071 València, España

### RESUMEN

En este trabajo, se analizan los modelos que constituyen la base de los algoritmos operacionales para la estimación de LAI a escala global en los proyectos LSA SAF, CYCLOPES, POLDER, GLOBCARBON y MODIS. Se estudia la consistencia espacial y temporal entre los productos LAI de Europa obtenidos con datos VEGETATION y MODIS del año 2003 y su validación directa con medidas verdad terreno. Los resultados muestran la validez del método LSA SAF y de los métodos pragmáticos, en general, para estimar LAI con una incertidumbre similar a la de los productos derivados mediante la inversión de modelos físicos.

Palabras claves: LAI, métodos operacionales, intercomparación

### ABSTRACT

Due to the multiplicity of methodologies and available biophysical products from different sensors, an inter-comparison analysis of vegetation retrieval algorithms is needed. In this study, LSA SAF, CYCLOPES, POLDER and GLOBCARBON basis algorithms are discussed and compared using VEGETATION BRDF data over Europe. LAI MODIS-BU C4.1 product is also included in the analysis. The study of the spatial and temporal consistency of retrievals and a direct comparison with ground-truth shows the adequacy of LSA SAF and pragmatic methodologies, in general, to retrieve LAI similarly as physical based models.

Keywords: LAI, operational methods, intercomparison

### Introducción

En los últimos años, se han propuesto un gran número de métodos operacionales para estimar el LAI a partir de las observaciones adquiridas por los sensores de teledetección. Tradicionalmente estos métodos se han agrupado en dos categorías: modelos estadísticos o pragmáticos, basados en relaciones calibradas entre bandas o índices de vegetación, y modelos físicos de transferencia radiativa. Los métodos pragmáticos son simples pero la mayoría de ellos carecen de una base física sólida y presentan como principal limitación el reducido número de bandas que utilizan. Por el contrario, una descripción detallada de la cubierta mediante modelos físicos requiere conocer numerosos parámetros

algunos de los cuales son difíciles de determinar en la práctica.

En el contexto del proyecto de EUMETSAT LSA SAF (<http://landsaf.meteo.pt>), la Universitat de València es responsable de desarrollar los algoritmos para la estimación de FVC, LAI y FAPAR a partir de datos SEVIRI (Trigo et al., 2007). Además de los productos LSA SAF, en los próximos años estarán disponibles al alcance de la comunidad internacional multiplicidad de productos LAI entre los que se incluyen los productos LAI NASA/MODIS (Knyazikhin et al., 1998) (disponibles en los sitios web <http://edcdaac.usgs.gov> y <http://cliveg.bu.edu>); pro-

---

<sup>1</sup> Contacto autor: Te: +34 963 543256 Fax: +34 963 543385  
Correo electrónico: [alexandre.verger@uv.es](mailto:alexandre.verger@uv.es)

ducto LAI ESA/GLOBCARBON con datos de múltiples sensores (Plummer et al., 2006) (<http://geofront.vgt.vito.be/geosuccess>); productos LAI POLDER (Roujean and Lacaze, 2002) (<http://polder.cnes.fr>); y, el LAI producido en el programa FP5/CYCLOPES con datos del sensor VEGETATION (Baret et al., 2007) (<http://postel.mediasfrance.org>).

Debido a la gran multiplicidad de productos LAI existentes, la intercomparación y validación de los mismos adquiere una importancia cada vez mayor para los usuarios para determinar el producto o combinación de productos más apropiada para cada aplicación. La intercomparación entre los distintos algoritmos y productos disponibles es esencial para garantizar la consistencia espacial y temporal de los productos (Baret et al., 2006). La validación es también necesaria para proporcionar los intervalos de confianza de cada producto y evaluar si los requisitos de precisión exigidos por los usuarios se cumplen, así como para mejorar los algoritmos y la calidad de los productos.

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de algunos de los principales algoritmos operacionales actuales para la estimación del LAI a escala global. En una primera etapa, los modelos pragmáticos de LSA SAF, POLDER y GLOBCARBON se aplican a datos BRDF del sensor VEGETATION. En una segunda etapa, el LAI estimado mediante estos métodos se compara con los productos VEGETATION/CYCLOPES (disponibles en el sitio web <http://postel.mediasfrance.org>) y MODIS (<http://cliveg.bu.edu>) obtenidos mediante la inversión de modelos físicos de transferencia radiativa. Los principales objetivos son: (i) evaluar las ventajas y limitaciones de los distintos modelos, y comparar los modelos pragmáticos frente a los modelos físicos; (ii) determinar la precisión de los distintos algoritmos y la incertidumbre de los productos; (iii) analizar la fiabilidad y consistencia de la metodología LSA SAF frente a otros métodos operacionales.

Modelos de estimación del LAI

Roujean y Lacaze (2002) propusieron un método semiempírico (método RL) para estimar el LAI con datos POLDER a partir de una relación (ecuación 1) con la FVC:

$$LAI = \frac{-\ln(1-FVC)}{b \cdot G(\theta_s) \cdot \Omega} \quad (1)$$

donde  $b$ , igual a 0.945, es la función de albedo de las hojas;  $G(\theta_s)$  se fija a 0.5, considerando una distribución esférica de las hojas;  $\Omega$  es el índice de agrupamiento que tomamos 1, considerando una distribución aleatoria de la vegetación. La FVC, a su vez, se obtiene a partir de dos relaciones lineales con el índice de vegetación normalizado  $DVI_0$ , definido como la diferencia entre NIR y rojo de la reflectividad normalizada en configuración de observación nadir e iluminación cenital ( $k_0$ ).

En LSA SAF, para estimar la FVC se utiliza un modelo estandarizado de composición espectral (SMA) en el que vegetación y suelo se representan mediante una función de densidad de probabilidad multi-modal (Trigo et al., 2007). El LAI se obtiene a partir de la FVC mediante la relación propuesta por Roujean y Lacaze (2002) (ecuación 1) (método SMA+RL).

En GLOBCARBON (Plummer et al., 2006), el algoritmo de LAI utiliza método basado en las relaciones con los índices de vegetación SR y RSR propuestas por Chen et al. (2002) para estimar LAI a partir de datos AVHRR y VEGETATION en Canada. Estas relaciones (método Chen) resultan de la calibración con medidas de campo y son específicas para los distintos tipos de vegetación: bosques de caducifolias, bosques de coníferas, bosques mixtos y resto de cubiertas vegetales.

El algoritmo CYCLOPES (Baret et al., 2007) para estimar LAI se basa en la inversión mediante una red neuronal del modelo de transferencia PROSPECT+SAIL (método RT).

En MODIS, el algoritmo principal de LAI se basa en un modelo 3D de transferencia radiativa (Knyazikhin et al., 1998) que se invierte mediante una LUT específica para cada uno de los seis biomas en que se clasifica la vegetación a escala global. Si este algoritmo falla, se utiliza un método *back-up* basado en relaciones específicas por bioma con el NDVI (Myneni et al., 1997).

En el texto, para referirnos a los métodos antes citados utilizamos la notación RL, SMA+RL, Chen, RT y MODIS.

### Consideraciones metodológicas

En este estudio se consideran datos VEGETATION/SPOT de CYCLOPES (<http://postel.mediasfrance.org>). En concreto se utilizan los parámetros  $k_0$ ,  $k_1$  y  $k_2$  del modelo de BRDF propuesto por Roujean et al. (1992) en

las bandas B2 (rojo), B3 (NIR) y B4 (SWIR). Estos parámetros permiten calcular la reflectividad en las geometría de adquisición requerida por los distintos algoritmos pragmáticos de estimación de LAI considerados. La banda B0 (azul) no se utilizó por estar excesivamente afectada por los efectos atmosféricos.

Así mismo, se utilizan los productos LAI CYCLOPES obtenidos a partir de datos VEGETATION de reflectividad normalizada nadir y ángulo de iluminación medio en el periodo de composición. Y, los productos LAI MODIS-BU colección 4.1 (<http://cliveg.bu.edu>). Se consideran solo los productos obtenidos mediante el algoritmo principal MODIS en condiciones de no saturación. Los productos *back-up* no fueron incluidos, excepto en los perfiles temporales, debido a su poca fiabilidad ya que, generalmente, se obtienen a partir de reflectividades con nubes o con una corrección atmosférica incompleta (Yang et al, 2006).

Los productos VEGETATION tienen una resolución temporal de 10 días con un periodo de composición de 30 días mientras que los productos MODIS tienen una frecuencia y periodo de composición mensual. La resolución espacial de ambos productos es, aproximadamente, 1 km. Para la comparación, los productos MODIS en proyección sinusoidal se re proyectaron al sistema de proyección plate-carrée de VEGETATION mediante el método del vecino más próximo que permite preservar las características de los datos originales.

Se tomaron series continuas de datos del año 2003 del área de Europa comprendida entre el margen superior izquierdo de coordenadas latitud-longitud: 60° N, 11° W, y el margen inferior derecho: 34° N, 30° E.

Los diferentes algoritmos se evaluaron en función de sus estimaciones de LAI dado que éstas se obtuvieron utilizando un mismo conjunto de valores de reflectividad VEGETATION. Los productos LAI MODIS, a pesar de proceder de datos de otro sensor, fueron considerados por haber sido validados en un numerosas experiencias internacionales, como se recoge en Yang et al. (2006).

Para analizar las estimaciones LAI se consideró la metodología de validación propuesta por Baret et al. (2006) que incluye tanto una validación directa como indirecta. La comparación con datos de campo es necesaria para establecer la incertidumbre de las estimaciones. Sin embargo, puesto que la información *in-situ* disponible para la evaluación de los productos globales es todavía muy limitada, la validación direc-

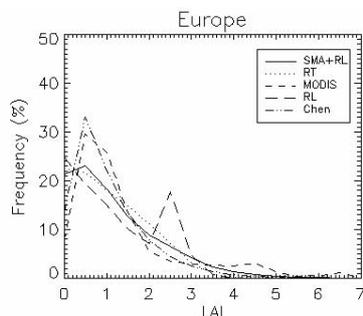
ta debe ser complementada mediante el análisis de consistencia espacial y temporal entre distintos productos equivalentes. La intercomparación se realiza tanto a escala continental como a nivel de píxel. Se analizan mapas, histogramas, estadísticos, perfiles temporales, gráficos de dispersión, etc. Y se utilizan, como información auxiliar, los mapas de usos de suelo GLC-2000 (<http://www.gvm.jrc.it/glc2000>) y ECOCLIMAP (<http://www.cnrm.meteo.fr>).

Validación indirecta: intercomparación de productos LAI

Para evaluar los distintos productos sobre un área común en distintas fechas, se consideraron las 12 imágenes VEGETATION más próximas en el tiempo a los productos de periodo mensual MODIS y se seleccionaron los píxeles con valores de LAI válidos en todas las imágenes. Para maximizar el tamaño del área de estudio se excluyeron los meses de Enero, Febrero, Noviembre y Diciembre debido a la mayor presencia de nieve y nubosidad persistente en la estación de invierno. Con esto se seleccionó para el estudio el 44% de la superficie continental de Europa.

Aunque no se presentan por falta de espacio, el análisis de los mapas de LAI de Europa muestra que, en general, los distintos algoritmos reproducen correctamente la distribución espacial y el gradiente de vegetación con la latitud. Además, los productos presentan la evolución temporal esperada, con mayores frecuencias en valores altos de LAI en los meses de verano que en los de invierno. Y, con una dinámica temporal mayor en las clases de cultivos y bosques caducifolios que en las clases de vegetación arbustiva, de bosques de coníferas o de vegetación herbácea.

En la figura 1 se muestran los histogramas de frecuencias acumuladas para el área de Europa seleccionada durante el periodo temporal comprendido entre Marzo y Octubre. En general, en términos de estas distribuciones de frecuencias, se observa un buen acuerdo entre el LAI estimado mediante los distintos algoritmos. La localización de los máximos y la magnitud de los mismos es similar, especialmente, entre los histogramas SMA+RL y RT, y entre Chen y MODIS. El histograma RL presenta un máximo de frecuencias no realista para valores de LAI de 2.5. Esta anomalía es consecuencia de la discontinuidad en el algoritmo RL que utiliza dos relaciones distintas para estimar la FVC según el valor del  $DVI_0$ .



**Fig. 1.** Histogramas de valores acumulados de LAI obtenidos con los distintos algoritmos en el periodo marzo-octubre del año 2003 en Europa.

Sin embargo, a pesar de las similitudes en las distribuciones globales de frecuencia, existen notables diferencias entre los distintos productos. En la tabla 1 se muestran los valores medios de los estadísticos que cuantifican estas diferencias: bias (diferencia absoluta) medio, el error RMS medio y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ). Como uno de los objetivos del presente trabajo era la evaluación de la metodología LSA SAF, los distintos productos se comparan respecto al LAI SMA+RL.

La incertidumbre respecto a SMA+RL son inferiores a 0.6 para RL (RMS relativo del 30%), RT (30%) y Chen (45%) mientras que MODIS presenta un RMS de 1.1 (80%). Los errores sistemáticos medios son pequeños, alrededor de 0.1 de subestimación para RT y Chen, MODIS sobreestima 0.2 y no se encontró un bias global entre RL y SMA.

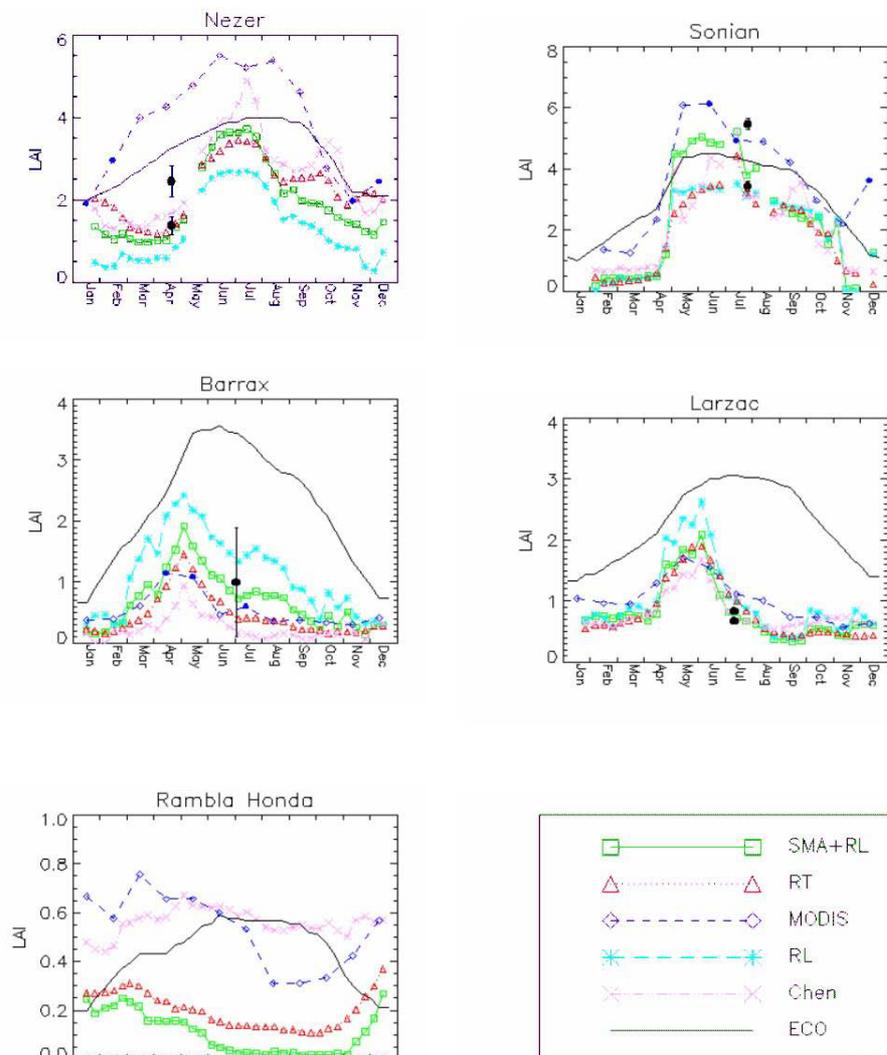
Las mayores diferencias de MODIS con respecto al producto LAI VEGETATION obtenido con el método SMA+RL pueden explicarse en parte a las diferencias entre las reflectividades MODIS y VEGETATION. Estas diferencias son en RMS de 0.03 en el rojo y 0.08 en el infrarrojo cercano, 30% en términos relativos en ambos casos, para la geometría  $k_0$  y para el área y periodo de estudio considerados.

**Tabla 1.** Estadísticos de la intercomparación, en Europa y durante el año 2003, de las estimaciones LAI de los distintos algoritmos en relación al LAI SMA+RL: bias medio, error RMS absoluto y relativo, y coeficiente de correlación  $R^2$ .

	BIAS	RMS		$R^2$
			(%)	
SMA+RL – RL	0.015	0.4	31	0.89
SMA+RL – Chen	0.10	0.6	44	0.77
SMA+RL – RT	0.11	0.4	28	0.92
SMA+RL – MODIS	-0.22	1.1	80	0.58

Además de este ejercicio de intercomparación a escala global, los diferentes algoritmos se evaluaron en diferentes zonas de validación de  $3 \times 3 \text{ km}^2$  donde se disponía de información verdad terreno. En la figura 2 se muestra la evolución temporal de las estimaciones LAI en una selección de zonas representativas de los distintos tipos de vegetación mayoritaria en Europa: bosques de caducifolias, bosques de coníferas, cultivos, herbáceas y matorral (véase tabla 2). En estos perfiles temporales se han incluido los valores climatológicos mensuales proporcionados por ECOCLIMAP como una referencia auxiliar. Así mismo, se indican los valores LAI verdad-terreno resultado de las campañas de validación VALERI (<http://www.avignon.inra.fr/valeri>).

En general, los perfiles temporales son suaves reproduciendo la dinámica de la vegetación esperada. Sin embargo, puede observarse algunos artefactos (máximos relativos no esperados), especialmente en el LAI estimado con el método Chen, como consecuencia de anomalías en la reflectividad VEGETATION. Y también en el caso de los productos de poca fiabilidad MODIS *backup*.



**Figura 2.** Perfiles temporales de LAI en áreas de validación 3x3 km<sup>2</sup> (véase tabla 2) y para el año 2003. Como referencia auxiliar se muestran los perfiles ECOCLIMAP y los valores medidos en campañas de campo (medias y desviaciones estándar).

Así mismo, los distintos algoritmos reproducen de manera similar la respuesta fenológica de la vegetación caracterizada por ECOCLIMAP. Sin embargo, se observan algunas inconsistencias para el caso de las cubiertas de bosque. En concreto, en la zona de Nezer se observa la

estacionalidad en los valores de LAI estimado impropia de los bosques de coníferas. Esta variación temporal del LAI puede atribuirse, en parte, a presencia de sotobosque. Pese a ello, las diferencias de LAI entre el máximo y el mínimo de desarrollo de la vegetación, mayores a 3 en todos los casos, y los valores de

LAI excesivamente bajos en invierno reproducidos por el método RL parecen no realistas para el caso de un bosque perenne. Por otra parte, los productos MODIS sobrestiman los valores reales de LAI en el caso de las superficies de bosque caducifolio durante el periodo de invierno (véase el perfil de Sonian). Esta anomalía ya fue puesta de manifiesto y analizada por Shabanov et al. (2005).

Las mayores diferencias se observan en cuanto a la magnitud de los perfiles de LAI. En este sentido, los valores de ECOCLIMAP son excesivamente altos en Barrax, Larzac y Rambla Honda. Las sobrestimaciones de MODIS y Chen respecto al resto de los métodos en la zona Nezer, pueden explicarse, en parte, a que estos métodos estiman un LAI real frente al valor efectivo de los otros métodos y a la mayor influencia del agrupamiento de la vegetación en este tipo de cubiertas de bosque. Sin embargo, para Rambla Honda, una zona semiárida, tanto el método Chen como MODIS sobrestiman de manera clara.

### Validación directa

La validación directa de las estimaciones LAI obtenidas a partir de datos VEGETATION y MODIS se ha realizado utilizando los mapas verdad terreno proporcionados por la red VALERI. Dichos mapas son el resultado de distintas campañas de campo realizadas en Europa entre los años 2002 y 2004. Y resultan de extender espacialmente las medidas de campo de LAI a un área mayor utilizando imágenes SPOT de alta resolución. En la tabla 2 puede verse una breve descripción de las distintas zonas de validación consideradas, indicando las coordenadas latitud-longitud, el tipo de vegetación y la fecha de adquisición de las imágenes SPOT.

Los mapas VALERI fueron reproyectados al sistema de proyección *plate-carrée* y degradados a 1 km de resolución espacial. Los valores medios en un área de 3x3 km<sup>2</sup> se consideran como valores de referencia para la validación de los productos VEGETATION y MODIS. En el caso de los métodos MODIS y Chen, las estimaciones se comparan con los valores de LAI real cuando éstos están disponibles: Sonian, Nezer, Larzac, Plan de Dieu y Rambla Honda. En el resto de los casos, se consideran los valores de LAI efectivo.

En la figura 3, se muestra la comparación con los mapas verdad terreno de los valores de LAI estimados por los distintos métodos de teledetección aquí considerados. Así mismo, se indi-

ca la ecuación de ajuste lineal y los valores de los estadísticos bias, RMS y R<sup>2</sup>.

Entre los distintos métodos analizados, el que ofrece un mejor ajuste en relación a las medidas de campo es el modelo SMA+RL de LSA SAF. Con una pendiente próxima a uno, una ordenada en el origen próxima a cero y un coeficiente de correlación de 0.96. Su incertidumbre (RMS) es de 0.2 (14% en términos relativos).

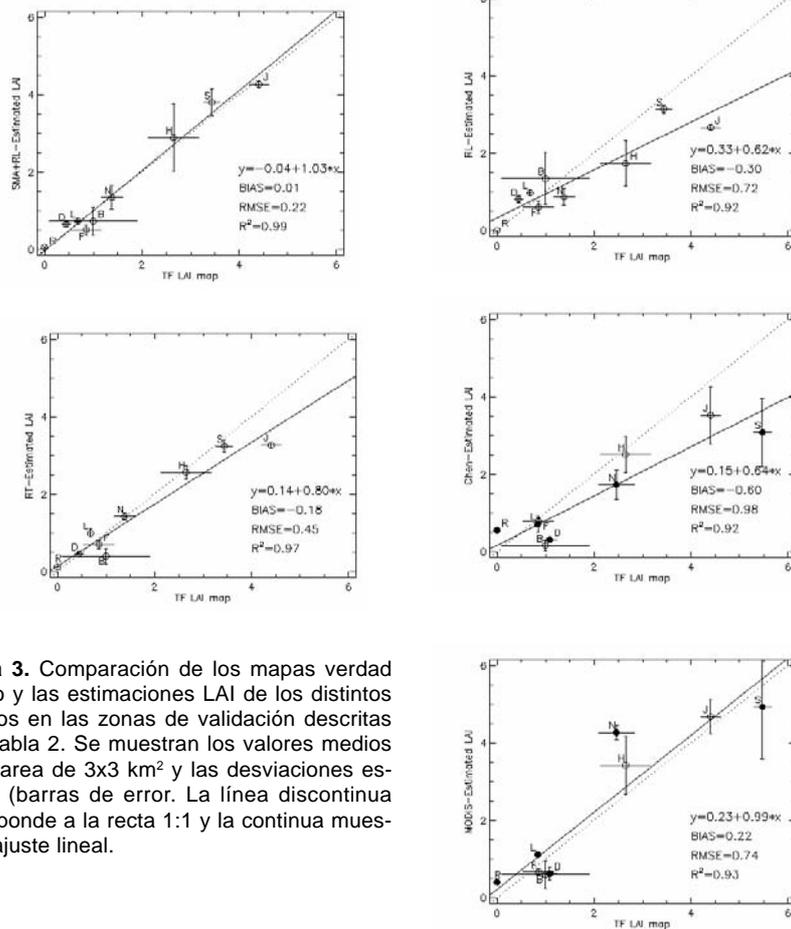
Así mismo, el método RT de CYCLOPES muestra un buen acuerdo con los valores verdad terreno pero con un error RMS mayor (30%).

Por su parte, el método RL subestima de manera sistemática el LAI con una pendiente de 0.6.

**Tabla 2.** Descripción de las zonas de validación seleccionadas

Zona	Latitud, Longitud	Cubierta vegetal	Fecha
Sonian	50.77°N, 4.41°E	Bosque caducifolias	28/07/2004
Nezer	44.57°N, -1.04°E	Bosque coníferas	21/04/2002
Järvselja	58.30°N, 27.26°E	Bosque boreal	26/06/2003
Hiriskangas	62.64°N, 27.01°E	Bosque boreal	03/08/2003
Le Larzac	43.94°N, 3.12°E	Herbáceas	12/07/2002
Fundulea	44.40°N, 26.59°E	Cultivos	31/05/2003
Barrax	39.06°N, -2.10°E	Cultivos	03/07/2003
Plan de Dieu	44.20°N, 4.95°E	Viñedo	07/07/2004
Rambla Honda	37.13°N, -2.37°E	Matorral disperso	15/07/2003

En cuanto al método Chen, aunque fue calibrado en base a valores de LAI real, en este análisis muestra un mejor acuerdo cuando se compara con los valores verdad terreno de LAI efectivo con un error RMS de 30% frente al 45%, una correlación de 0.95 frente a 0.92 y una pendiente de 0.8 frente a 0.6. Esto puede atribuirse a un error sistemático en la aplicación del método. Las relaciones propuestas por Chen et al. (2002) para estimar el LAI con datos VEGETATION son el resultado de la calibración de reflectividades TM con datos in-situ en Canadá y la posterior corrección TM



**Figura 3.** Comparación de los mapas verdad terreno y las estimaciones LAI de los distintos métodos en las zonas de validación descritas en la tabla 2. Se muestran los valores medios en un área de 3x3 km<sup>2</sup> y las desviaciones estándar (barras de error). La línea discontinua corresponde a la recta 1:1 y la continua muestra el ajuste lineal.

VEGETATION. Es este estudio, las relaciones se han aplicado a Europa y a datos VEGETATION/CYCLOPES que en el preprocesado fueron recalibrados a POLDER (Baret et al., 2007).

En el caso de los de los productos MODIS, parece que sobrestiman de manera clara el LAI en Rambla Honda y Nezer. Pese a ello, se observa una buena correlación ( $R^2$  de 0.93) con los datos de campo con una pendiente próxima a uno (0.99).

### Conclusiones

El análisis espacial y temporal de las estimaciones de LAI sobre el área de Europa y durante el año 2003 pone de manifiesto que la metodología LSA SAF es consistente con el método

semi-empírico RL (POLDER) y con el método físico RT (CYCLOPES) con un RMS de aproximadamente el 30%. Sin embargo las estimaciones del método RL presentan una discontinuidad para valores de 2.5 como consecuencia de las distintas relaciones utilizadas para estimar la FVC a partir del índice  $DVI_0$ . Esta anomalía se resuelve aplicando la relación FVC-LAI propuesta por Roujean and Lacaze (2002) a la FVC estimada mediante el modelo SMA de LSA SAF (método SMA+RL).

Por otra parte, el LAI SMA+RL presenta mayores diferencias en relación a las estimaciones del método Chen (RMS de 45%) y MODIS (RMS de 80%).

Con respecto a la validación directa, el método SMA+RL de LSA SAF mostró el mejor acuerdo con las medidas verdad terreno, sin desviaciones sistemáticas (bias de 0.01), con un RMS de aproximadamente 15%, una alta correlación, una pendiente próxima a uno y ordenada en el origen próxima a cero.

Estos resultados ponen de manifiesto, por una parte, la validez y prestaciones de la metodología LSA SAF para estimar LAI de manera consistente con otras metodologías operacionales y con una pequeña incertidumbre en relación a las medidas de campo. Y, por otra, la capacidad de los métodos pragmáticos para estimar el LAI a escala global con prestaciones similares a los métodos basados en la inversión de modelos físicos de transferencia radiativa.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por los proyectos LSA SAF (EUMETSAT), DeSurvey (EC-003950) y DULCINEA (CICYT, CGL2005-04202). Además, A. Verger ha sido beneficiario de una ayuda FPI en el marco del proyecto IDEAS (CICYT, REN2002-01495) en el periodo 2003-2007.

### Referencias

- Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., Bicheron, P., Miras, B., Huc, et al. 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sens. Environm.* In press.
- Baret, F., Morisette, J., Fernandes, R., Champagneaux, J., Myneni, R., Chen, et al. 2006. Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: Proposition of the CEOS-BELMANIP. *IEEE Trans. Geosc. & Remote Sens.* 44(7),1794-1803.
- Chen, J. M., Pavlic, G., Brown, L., Chilar, J., Leblanc, S. G., White, H. P. et al. 2002. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sens. Environm.*, 80, 165-184.
- Knyazikhin, Y., Martonchik, J. V., Myneni, R. B., Diner, D. J., & Running, S. W. 1998. Synergetic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *J. Geophys. Research*, 103, 32257-32275.
- Plummer, S., Arino, O., Simon, M., & Steffen, W. 2006. Establishing an Earth observation product service for the terrestrial carbon community: the GLOBCARBON initiative. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 97-111.
- Roujean, J. L., Leroy, M., & Deschamps, P. Y. (1992). A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophys. Research*, 97(D18):20455-20468.
- Roujean, J. L., & Lacaze, R. 2002. Global mapping of vegetation parameters from POLDER multiangular measurements for studies of surface-atmosphere interactions: A pragmatic method and its validation. *J. Geophys. Research*, 107D, 10129-10145.
- Shabanov, N. V., Huang, D., Yang, W., Tan, B., Knyazikhin, Y., Myneni, R. B., et al. (2005). Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. *IEEE Trans. Geosc. & Remote Sens.*, 43(8):1855-1865.
- Trigo, I. F., DaCamara, C., Viterbo, P., Roujean, J. L., Olessen, F., Siljamo, N., et al. 2007. The satellite application facility on land surface analysis. *Bulletin American Meteor. Society*. Submitted for publication.