

Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica

B. Martínez, F. Camacho-de Coca y F. J. García-Haro
beatriz.martinez@uv.es

Dpto. de Termodinámica, Universitat de Valencia
Dr. Moliner, 50, 46100. Burjassot, Valencia

RESUMEN

Para la validación de productos de vegetación derivados mediante teledetección es necesario estimar de forma precisa el valor *in-situ* del parámetro biofísico de interés. Recientemente, la adquisición y el procesamiento de fotografías hemisféricas es un método no destructivo que ofrece buenas posibilidades frente a los métodos tradicionales, principalmente por la mayor información que proporciona.

En este trabajo abordamos el problema de la estimación *in-situ* de los principales parámetros biofísicos de la cubierta, LAI, FVC y fAPAR, a partir de la *gap fraction* obtenida mediante el procesamiento digital de las fotografías hemisféricas. Las medidas fueron realizadas sobre diferentes cultivos del área de estudio de Barrax (Albacete) durante la campaña SPARC (*Spectra bARax Campaign*) en Julio de 2003. Los resultados han sido validados con medidas coincidentes realizadas con el LI-COR LAI2000.

Se concluye que la cámara hemisférica es un instrumento apropiado para estimar dichos parámetros en cultivos, mostrando un margen de error menor del 25% respecto a las estimaciones proporcionadas por el LI-COR LAI2000. Por otra parte, la fotografía hemisférica permite evaluar la *gap fraction* en un rango del ángulo cenital de observación más continuo y mayor que el del LI-COR LAI2000, permitiendo además estimar el índice de agrupamiento (*clumping*) de los elementos de la cubierta y corregir de este efecto el LAI efectivo.

PALABRAS CLAVE: Estimación, LAI, FVC, fAPAR, fotografías hemisféricas.

ABSTRACT

In order to provide a successful validation of remote sensing products, it is necessary to accurately estimate the *in-situ* biophysical parameters of interest. Numerous advances in hemispherical photographs analysis have proven over the last decade to be a powerful indirect method.

This work describes *in-situ* acquisition and processing of LAI, FVC and fAPAR from the indirect measurement of the gap fraction with the hemispherical camera. The ground data set was collected during the SPARC (*Spectra bARax Campaign*) campaign, which took place at Barrax test site in July 2003. The results have been validated with another ground data set collected by the optical instrument LI-COR LAI2000 during the same campaign.

The hemispherical photographs have shown to provide accurate estimates of biophysical parameters in crop canopies with a margin of error with the LI-COR LAI2000 lower than 25%. On the other hand, the hemispherical camera shows significant advantages such as (i) the possibility to evaluate the gap fraction in all viewing direction and (ii) compared with the LI-COR LAI2000 it provides LAI estimates corrected from non-desired influences (foliage clumping, presence of dry material, etc.).

KEY WORDS: Estimation, LAI, FVC, fAPAR, hemispherical photographs

INTRODUCCIÓN

Algunos parámetros biofísicos de la cubierta vegetal, como el LAI, FVC o fAPAR, presentan un gran interés en aplicaciones relacionadas con la climatología, hidrología, agricultura de precisión y cambio global (Sellers et al, 1997), ya que estos

parámetros están directamente relacionados con el intercambio de flujos de masa y energía entre el sistema atmósfera-biosfera, así como en la productividad de la cubierta (Noilhan & Planton, 1989; Andrieu & Baret, 1993; Prince, 1991). El LAI (*Leaf Area Index*) hace referencia a la superficie foliar fotosintéticamente activa (contabilizada por una

sola cara) por unidad de suelo (Watson, 1947). La FVC (*Fractional Vegetation Cover*) representa la fracción de suelo cubierta por vegetación. La fAPAR (*fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) se define como la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (0.4-0.7 μm) absorbida por la cubierta para transformarla en energía química durante la fotosíntesis y por tanto expresa la capacidad de la cubierta para absorber energía (Fensholt et al., 2004).

Un aspecto fundamental es conocer el nivel de incertidumbre asociado a los productos derivados mediante teledetección, es decir, la validación de dichos productos por medios independientes (Justice et al., 2000). Por tanto, previamente a la distribución de variables biofísicas es necesario realizar la validación, tanto de los productos como de los algoritmos que los derivan (e.g., Land SAF; Camacho-de Coca et al., 2003). Una de las estrategias para dicha validación consiste en la comparación directa con medidas *in-situ* o verdad terreno.

Para la estimación *in-situ* de los parámetros biofísicos, los métodos indirectos basados en la medida de la *gap fraction* (fracción de huecos en la cubierta) se presentan como una buena alternativa a los métodos directos (entre ellos los destructivos) debido, principalmente, al menor tiempo empleado, el fácil manejo de los instrumentos de medida y a su menor impacto sobre la cubierta vegetal (Gower et al., 1999; Jonckheere et al., 2004). Los diferentes instrumentos basados en métodos indirectos se engloban en dos categorías: (i) los basados en la medida de la *gap fraction*, suponiendo una distribución espacial aleatoria de las hojas y, (ii) los que consideran un cierto agrupamiento en la cubierta a través de la distribución de los huecos (*gap size distribution*). En la primera categoría destacamos el DEMON¹ (Lang et al., 1985), el AccuPAR² (Decagon, 2001), el LI-COR LAI2000³ (LI-COR, 1992), mientras que en la segunda categoría destaca el TRAC⁴ (Chen et al., 1997). La cámara hemisférica (HP) pertenece a ambas categorías, dado que permite estimar tanto la *gap fraction* como la *gap size distribution* (Hill, 1924; Jonckheere et al., 2004).

En los últimos años el uso de las fotografías hemisféricas ha aumentado de forma considerable

en diversas aplicaciones relacionadas con la cubierta vegetal (Jonckheere et al., 2004). Diferentes autores concluyen que la cámara hemisférica presenta un alto potencial en la estimación de parámetros estructurales frente a otros instrumentos como el LI-COR LAI2000 o el TRAC (White et al., 2000; Leblanc et al., 2002; Jonckheere et al., 2004), debido principalmente a que permite discriminar espacialmente los diferentes elementos de la cubierta.

En este trabajo analizamos el método de la cámara hemisférica (Bonhomme & Chartier, 1972; Rich, 1990; Jonckheere et al., 2004) que hemos seleccionado frente a otros instrumentos por dos motivos principalmente: (i) En primer lugar, la fotografía hemisférica proporciona la *gap fraction* en todas las direcciones cenitales, lo que permite estimar diferentes parámetros estructurales de la cubierta, como son el LAI, FVC, índice de agrupamiento o *clumping* y ángulo medio de inclinación foliar (ALA), y también parámetros relacionados con el régimen de radiación solar como la fAPAR (Rich et al., 1993; White et al., 2000). (ii) En segundo lugar, presenta un mayor intervalo óptimo de aplicación que el LI-COR LAI2000, dado que permite estimar la *gap fraction* bajo un amplio rango de condiciones de iluminación, extendiendo las horas útiles de medidas.

El principal objetivo de este trabajo consiste en evaluar el método de las fotografías hemisféricas para la estimación *in-situ* de los parámetros biofísicos LAI, FVC y fAPAR. Las medidas experimentales fueron realizadas durante la campaña SPARC (*Spectra bARax Campaign*) en el área agrícola de Barrax (Albacete) durante el verano de 2003. El trabajo incluye, en primer lugar, la descripción de las bases teóricas en que se basa la estimación de los parámetros y se dan las recomendaciones más importantes para una correcta adquisición de las fotografías hemisféricas. En segundo lugar, se describe el área de estudio y la metodología de adquisición de las medidas *in-situ*, incluyendo el muestreo espacial realizado y el procesado de los datos. Por otra parte, uno de los objetivos importantes de este trabajo ha sido la evaluación del método de la cámara hemisférica a partir de la comparación con las estimaciones coincidentes realizadas con el LI-COR LAI2000 durante el experimento de campo. Finalmente, se detallan los principales resultados y conclusiones derivados.

¹ www.cbr.clw.csiro.au/pyelab/tour/demon.htm

² www.decagon.com/

³ www.licor.com/

⁴ 3rd Wave Engineering, Ontario, Canada

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Estimación de la gap fraction

El término *gap fraction* es una cantidad medible que hace referencia al valor integrado de la frecuencia de huecos sobre una cubierta (Nilson, 1971; Weiss et al., 2004). Se trata de un parámetro estructural de la cubierta equivalente a medir la fracción de energía incidente transmitida a través de la cubierta en el rango espectral en el cual la vegetación se comporta como un cuerpo negro. Este parámetro depende del LAI y de la función de distribución de inclinación de las hojas (LIDF). Cuando las hojas se consideran infinitamente pequeñas y distribuidas espacialmente de forma aleatoria, la *gap fraction* se puede relacionar con estos parámetros a partir del modelo de Poisson (Welles, 1990):

$$P_0(\theta_v, \varphi_v) = \exp \frac{-G(\theta_v, \varphi_v) LAI}{\cos \theta_v} \quad (1)$$

donde $G(\theta_v, \varphi_v)$ es la función de proyección, es decir la proyección media de la normal a la superficie foliar en la dirección (θ_v, φ_v) . La función $G(\theta_v, \varphi_v)$ toma unos valores dependiendo del tipo de LIDF que presente la cubierta (i.e., orientación planófila, erectófila o esférica), el cual se suele considerar acimutalmente simétrico. Una descripción más detallada de este comportamiento se puede encontrar en Ross, (1981).

Por otra parte, en el caso de que la cubierta no presente una distribución aleatoria de hojas y, muestre cierto nivel de agregación, se debe introducir un término que tenga en cuenta este factor, también denominado grado de agrupamiento (Ω) o *clumping* de la cubierta (Nilson, 1971). El efecto de dicho agrupamiento es un aumento de la fracción de radiación no interceptada por la cubierta vegetal, desviándose así del modelo de Poisson, por lo que se define un LAI efectivo (LAI_e) como $LAI_e = LAI \cdot \Omega$, donde Ω tiene un valor mayor que la unidad para distribuciones regulares, igual a la unidad para aleatorias e inferiores a la unidad para estructuras que presentan agrupamiento. El *clumping* se puede medir *in-situ* con el TRAC, pero también a partir de la fotografía hemisférica. En trabajos anteriores se ha analizado el efecto del agrupa-

miento para el caso particular de cultivos, mostrando una reducción de hasta un 30% en la radiación interceptada por la cubierta (Norman & Campbell, 1998), resultando en una subestimación del LAI.

Los parámetros biofísicos LAI, FVC y fAPAR están fuertemente relacionados con la *gap fraction* monodireccional, $P_0(\theta)$, que se define como la fracción de suelo observada para cada ángulo cenital q , e integrada para todo el rango acimutal (Andrieu & Baret, 1993). Estos parámetros se pueden estimar a partir de la *gap fraction* monodireccional del siguiente modo:

- $P_0(\theta)$, es decir, considerando todo el rango cenital (q) de ángulos. Permite estimar el LAI de la cubierta a partir de la inversión de la ecuación 1 utilizando diferentes técnicas basadas en métodos iterativos (Perry et al., 1988) o en técnicas de Look-Up-Table (LUT) (Knyazikhin et al., 1998; Weiss et al., 2000). También existen simplificaciones a este procedimiento como la estimación directa del LAI a partir de la *gap fraction* en la dirección cenital de 57.5° , dado que se ha demostrado que la función de proyección $G(\theta_v, \varphi_v)$ es independiente del ALA (Bonhomme & Chartier, 1972).
- $P_0(\theta)$ o valor en el nadir. Permite obtener directamente la fracción de cobertura vegetal a partir de la expresión, $FVC = 1 - P_0(0)$.
- $P_0(\theta_s)$ o valor medido en la dirección del sol. Permite estimar la fAPAR instantánea como $fAPAR = 1 - P_0(\theta_s)$ (Weiss et al., 1999).

Cámara hemisférica

La cámara hemisférica consta de una cámara digital equipada con una lente angular u ojo de pez que proyecta las coordenadas angulares de un objeto de tres dimensiones en un plano (Rich, 1990). Las cámaras utilizadas en este trabajo fueron la NIKON Coolpix5000 y Coolpix45000 equipadas con una lente angular NIKON FC-E8 con función de proyección polar, donde el ángulo que forma dicho objeto con el eje óptico de la lente es directamente proporcional al radio de ese punto en la imagen (Frazer et al., 2000).

Condiciones de adquisición

Las características de adquisición de las imágenes son relativamente sencillas, sin embargo hay que tener en cuenta diferentes consideraciones y

fuentes de error a la hora de adquirir la imagen. Las recomendaciones más destacadas se pueden dividir según tres aspectos, (i) las características de la cámara, (ii) los factores externos y, por último, (iii) la altura de la cubierta (ver tabla 1).

En general, cuanto mejor sea su resolución, las condiciones de brillo y compresión de la imagen, mejor será la calidad de la imagen y mejor será la separación espectral de los diferentes elementos que componen la cubierta como vegetación verde, seca, suelo y píxeles mezcla. En cuanto a la elección entre el modo de posición de la cámara, éste depende principalmente del tipo de cubierta (ver tabla 1). Las imágenes adquiridas desde abajo son más fáciles de procesar debido al contraste entre cielo y vegetación (Jonckheere et al., 2004), aunque es preferible evitar las horas donde el ángulo cenital solar es menor ya que la iluminación directa puede saturar algunas zonas de la imagen (Chen et al., 1996). Sin embargo, en el caso de cubiertas muy densas, las imágenes realizadas desde abajo pueden perturbar la arquitectura de la cubierta al introducir la cámara en el interior de la cubierta. Por otra parte, se recomienda en las cubiertas bajas situar la

cámara cerca de la cubierta para evitar que aparezcan en la imagen elementos muy lejanos situados a ángulos muy extremos. En este caso, los problemas debidos al campo de observación se pueden resolver limitando el campo de visión a un ángulo entre 0° y 60° grados.

Procesado de las fotografías hemisféricas

El procesado de las imágenes consiste en transformar la posición de los píxeles en coordenadas angulares y la clasificar los píxeles en suelo/cielo y vegetación verde para calcular la *gap fraction* y la distribución del brillo. A partir de estas variables es posible obtener los parámetros anteriormente descritos. Existen diferentes programas desarrollados para procesar este tipo de imágenes, aunque la mayoría están diseñados para procesar fotografías desde abajo, como por ejemplo Hemiview (Rich, 1990), SCANOPY (Rich et al., 1993) y GLA (Frazer S., 2000). Estos programas permiten importar imágenes hemisféricas, mostrarlas y analizarlas a partir de técnicas de segmentación de la imagen.

<i>Características de la cámara</i>	
<i>Resolución de la imagen</i>	Alta resolución (>1Megapíxel): permite discriminar mejor elementos pequeños de la vegetación y evitar los píxeles mezcla (Blennow, 1995).
<i>Sensibilidad de la imagen</i>	Alta sensibilidad: permite una mejor clasificación de la imagen.
<i>Índice de compresión de la imagen</i>	Baja compresión: una alta compresión de la imagen se traduce en un deterioro de la imagen y por tanto en pérdida de la información (Pennebaker & Mitchell, 1993).
<i>Factores externos</i>	
<i>Iluminación</i>	Las imágenes de una misma unidad deben ser tomadas en condiciones similares de iluminación para que no haya una gran variación en el color de las imágenes.
<i>Horizontalidad</i>	La cámara se debe colocar lo más horizontalmente posible para que la adquisición sea desde el nadir (Walter & Torquebiau, 2000).
<i>Orientación de la cámara</i>	Es aconsejable localizar la posición de la cámara y del Sol para la estimación de diferentes parámetros relacionados con el régimen de radiación y el fAPAR.
<i>Posición del operador</i>	El operador debe situarse siempre en la misma posición para poder enmascarar la misma zona de la imagen y no incluirla en la estimación.
<i>Características de la cubierta</i>	
<i>Cubiertas bajas (<30 cm)</i>	La cámara se sitúa sobre la cubierta a una altura cercana a la cubierta para poder distinguir mejor el suelo de fondo.
<i>Cubiertas intermedias (entre 30 y 70 cm)</i>	La cámara puede situarse tanto sobre la cubierta como al nivel del suelo.
<i>Cubiertas altas (> 70 cm)</i>	La cámara se sitúa al nivel del suelo.

Tabla 1. Recomendaciones de adquisición según las características de la cámara, factores externos y características de la cubierta.

EXPERIMENTO Y METODOS

Medidas in-situ

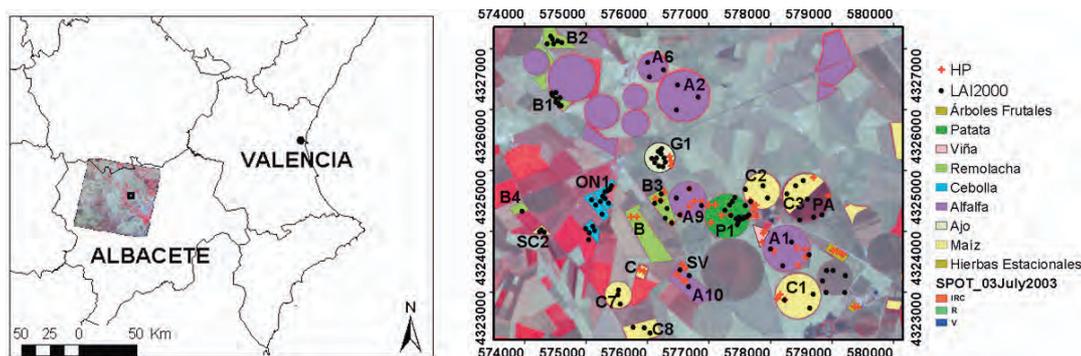
La adquisición de medidas *in-situ* tuvo lugar durante la campaña SPARC⁵ en el área de estudio de Barrax (Albacete) durante los días 12-14 de Julio del 2003. La campaña SPARC agrupa diferentes iniciativas, con el objetivo común de validar sensores (e.g., CHRIS/PROBA), algoritmos (e.g., corrección atmosférica, variables geobiofísicas) y productos derivados (e.g., MERIS/ENVISAT, SEVIRI/MSG) para lo que se realizaron numerosas medidas *in-situ*. La zona de estudio de Barrax es un área agrícola con predominio de cultivos de secano (cebada) y alrededor del 40% de cultivos de regadío (maíz, alfalfa, trigo, remolacha y cebolla). Dicha área presenta una alta variabilidad en el estado fenológico de la cubierta y en la distribución espacial de los cultivos y ha sido objeto de estudio en numerosos proyectos internacionales, tales como EFEDA, DAISEX y en la actualidad DEMETER, SPARC, VALERI y LSA SAF (Bolle et al., 1993; Moreno et al., 2001; Calera et al., 2003; Camacho de Coca et al., 2003).

Durante la campaña SPARC se midieron diferentes parámetros relacionados con la cubierta vegetal (respuesta radiométrica de las superficies, clorofila, biomasa) simultáneamente al paso de sensores aerotransportados (HyMAP, ROSIS) y a bordo de satélite (SPOT, Landsat, CHRIS, MERIS). Para caracteri-

zar los parámetros de vegetación (LAI, FVC y fAPAR) seleccionamos aproximadamente unas 50 Unidades Elementales de Medida (ESUs) con la cámara hemisférica y unas 100 ESUs con el LI-COR LAI2000 (ver figura 1), en los cultivos de alfalfa (A), maíz (C), remolacha (SB), patata (P), cebolla (ON), ajo (G), árboles frutales y hierbas estacionales. El muestreo fue mayor en el caso del LAI2000, dado el mayor número de instrumentos disponibles (5 LAI2000 por 3 cámaras). Se caracterizaron un total de 9 tipos cultivos, obteniéndose un rango de valores de LAI entre 0 y 6, que cubre todo el rango de valores posibles (Jonckheere et al., 2004). Los cultivos donde se realizaron medidas con ambos instrumentos fueron tres campos de alfalfa (A1, A9 y A10), dos de maíz (C1 y C2) y uno de patata (P1), ajo (G1), remolacha (SB3) y cebolla (ON1).

Muestreo espacial

El muestreo espacial es un aspecto tan importante como complicado, ya que se pretende que el conjunto de medidas *in-situ* caracterice lo mejor posible la variabilidad presente en el área de estudio. Los tipos de muestreo que se encuentran en la literatura dependen mayormente del instrumento utilizado, la arquitectura de la cubierta y las características del área de estudio (Chen et al., 1996; Baret et al., 2004). En nuestro caso, el muestreo espacial que realizamos con la cámara hemisférica se basa



*Figura 1. Localización del área de estudio Barrax (izquierda) y el muestreo realizado con el LI-COR LAI2000 y la cámara hemisférica (HP) durante la campaña de campo de SPARC en Julio del 2003 (derecha). La imagen de fondo corresponde a una composición RGB de las bandas del infrarrojo cercano (IRC), rojo (R) y verde (V) del sensor HRVIR2/SPOT4 (20m).

⁵ <http://gpds.uv.es/sparc>

* Todas la figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color.

en los mismos criterios utilizados por el proyecto de validación VALERI (Baret et al., 2004). Cada ESU se escogió con dimensiones de 20x20 m² (aproximadamente el área de un píxel SPOT), y se georeferenció con un GPS en su punto central. Dentro de cada ESU realizamos 12 medidas distribuidas según los esquemas de la figura 2, lo que nos proporciona el valor promedio del parámetro biofísico en dicha área. El esquema de la figura 2 (izquierda) se aplicó en aquellos cultivos que presentaban una distribución homogénea, como la Alfalfa, la Remolacha y el Maíz, mientras que el diseño de la figura 2 (derecha) se aplicó en aquellos cultivos distribuidos por filas, como era el caso de la Viña, para caracterizar la variabilidad presente en la cubierta determinada por la distribución de las plantas (Weiss et al., 2004). Para Las medidas realizadas con el LI-COR LAI2000 utilizamos un muestreo diferente. En este caso, cada ESU se

caracterizó a partir de 24 medidas distribuidas de forma aleatoria en la superficie de la ESU.

Una vez definido el muestreo en una ESU, el siguiente paso consiste en caracterizar la heterogeneidad existente en los diferentes cultivos. Para ello, se trató de obtener un mínimo de 12 ESUs para cada cultivo con el objetivo de proporcionar valores para la media y desviación estándar estadísticamente fiables (Tukey, 1977). En general, el número de ESUs por campo fue mayor para los cultivos presentes en un número menor de campos. La localización de las ESUs en cada campo se realizó de forma aleatoria, pero siempre evitando los bordes de los cultivos. Con el LI-COR LAI2000 se realizaron medidas en 100 ESUs correspondiente a 6 cultivos (ver tabla 2). Sin embargo, con la cámara hemisférica el número de ESUs fue inferior (53), pero mayor el de cultivos muestreados (9), lo que reduce la significación estadística por cultivo.

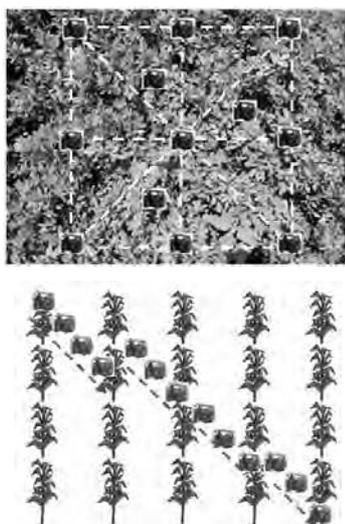


Figura 2. Esquemas de muestreo espacial utilizado en la adquisición de medidas in-situ (ver detalles en el texto).

Procesado de las fotografías hemisféricas

El procesado se realizó mediante un programa específico (CAN_EYE) diseñado en Matlab[®] por el grupo de INRA-CSE en Avignon. El CAN_EYE está diseñado para estimar los parámetros de la cubierta, LAI, FVC, ALA y fAPAR a partir de la *gap fraction*. Presenta la posibilidad de procesar hasta 20 imágenes y analizar tanto la *gap fraction* bidireccional como la monodireccional en un rango cenital y acimutal determinado, lo que permite seleccionar la resolución angular a la que se desea estimar dichas variables. El tiempo medio de procesado de 12 imágenes es de aproximadamente 10 minutos, en un ordenador personal con 2 procesadores de 1.98 GHz y 768 MB RAM. La estimación del LAI y ALA se realiza a partir de la inversión de la ecuación 1 mediante técnicas de Look-Up-Table (LUT).

CULTIVO	CAMPOS	ESUs_LAI2000	CAMPOS	ESUs CAMERA
Maíz	7	21	4	10
Alfalfa	6	19	3	16
Remolacha	4	19	1	6
Cebolla	2	16	2	2
Ajo	1	11	1	2
Patata	1	14	1	6
Viña	0	0	1	1
Hierba	0	0	1	6
Árboles frutales	0	0	2	2
TOTAL	21	100	16	53

Tabla 2. Descripción de las ESUs adquiridas por cada instrumento y de los campos muestreados para cada cultivo.

El procedimiento del CAN_EYE se basa en una secuencia de tres etapas: (1) estimar la *gap fraction* bidireccional, (2) integrarla acimutalmente con el fin de obtener la *gap fraction* monodireccional, y (3) derivar los parámetros biofísicos, LAI, ALA, FVC, fAPAR y *clumping*. El paso más crítico durante el procesamiento se refiere al proceso de segmentación, debido a que el resultado es muy dependiente del criterio para distinguir las diferentes clases. El CAN_EYE incluye la herramienta del *convex hull* (Barber et al., 1986) para realizar la segmentación. El *convex hull* de un determinado conjunto de datos se define como la mínima región convexa que incluye a todos los datos del conjunto. De este modo, en primer lugar, se asocia un determinado conjunto de píxeles a cada clase y se calcula el *convex hull* en el espacio RGB para cada clase. El resto de los píxeles de la imagen se clasifican dentro de una determinada clase si al representarlos en el espacio RGB se incluyen dentro de la región convexa definida para esta clase.

La estimación de los parámetros LAI y ALA se lleva a cabo a partir de la inversión del modelo de Poisson (eq.1) con la técnica de la LUT. El modelo de Poisson en el que se basa el CAN_EYE considera la función de distribución de inclinación de las hojas acimutalmente simétrica y se caracteriza a partir de un solo parámetro, el ángulo medio de inclinación de las hojas (ALA) (Campbell, 1986; Wang & Jarvis, 1988).

La estimación del LAI y ALA se realiza a partir de la simulación de 50000 casos de *gap fraction* resultantes de la combinación aleatoria de valores de LAI entre [0-9] y ALA entre [0°-90°]. El valor de LAI y ALA estimado a partir de la *gap fraction* derivada de las imágenes corresponde al valor medio de los 200 primeros que menor valor de la expresión (2) presente, donde el P_{LUT}^i y P_{medido}^i corresponden a la *gap fraction* obtenida de la LUT y la estimada de las fotografías hemisféricas para cada anillo acimutal. El término w_i corresponde a un peso asignado que considera el hecho de que algunos anillos presenten una proporción alta de píxeles enmascarados, N_{mas}^i , donde N_{pix}^i corresponden a los píxeles totales en cada anillo acimutal.

$$C_i = \sqrt{\sum_1 w_i (P_{LUT}^i - P_{medido}^i)^2} \quad (2)$$

$$w_i = \frac{N_{pix}^i - N_{mas}^i}{N_{pix}^i}$$

La FVC y fAPAR se estiman tal como se explica en el capítulo de fundamentos teóricos, mientras que el *clumping* se obtiene a partir de la segmentación de la *gap fraction* bidireccional en celdas de 4°x4°, en la dirección cenital y acimutal. De este modo, el *clumping* se puede estimar en función del ángulo cenital de observación y del ALA. El procedimiento consiste, en primer lugar, en estimar la *gap fraction* en cada celda y obtener las diferentes combinaciones de ALA recogidas en la LUT para dicha *gap fraction*. En segundo lugar, se calcula el logaritmo de la *gap fraction* para los diferentes valores de ALA, en el caso de una *gap fraction* igual a cero se considera un LAI de saturación igual a 10 y entonces se calcula (eq. 1) la *gap fraction* con diferentes valores de ALA. Finalmente, el *clumping* se calcula integrando acimutalmente $\ln(P_o)/P_o$. Este resultado proporciona un valor del *clumping* en función del ángulo cenital de observación y del ALA.

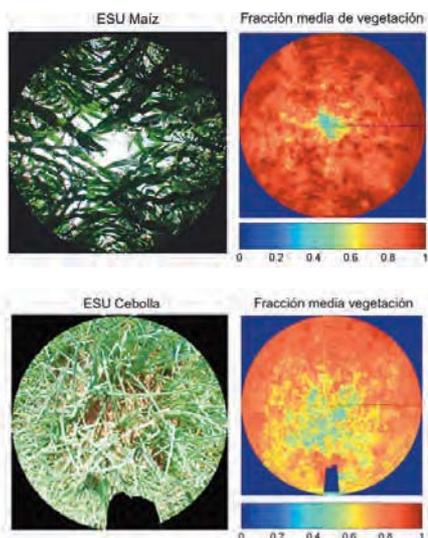
RESULTADOS

La metodología se basa en tres etapas secuenciales: (i) estimar la *gap fraction* bidireccional, (ii) integrarla acimutalmente con el fin de obtener la *gap fraction* monodireccional, y (iii) derivar los parámetros biofísicos, LAI_e, LAI_{57.5°}, FVC, fAPAR y el *clumping* aplicando el algoritmo de inversión.

Gap fraction bidireccional

La *gap fraction* bidireccional proporciona información sobre la distribución de los huecos y, por tanto, sobre la proporción de vegetación observada en el hemisferio. La figura 3 muestra la fracción de vegetación media (que se obtiene promediando las 12 imágenes hemisféricas clasificadas) de dos ESUs correspondientes a Maíz y Cebolla. En ambos casos se observa una mayor fracción de huecos (colores azulados) alrededor del nadir (centro de la imagen), huecos que van desapareciendo a medidas que el ángulo cenital aumenta (radios exteriores de la imagen), efecto conocido como *gap effect* (Camacho-de Coca et al., 2003). Este efecto es más marcado en el caso del Maíz debido a la altura de la plantas.

La tabla 3 muestra algunos ejemplos donde se ha obtenido el LAI corregido del efecto de agrupamiento. En general, se observa un aumento del LAI corregido, como era de esperar, donde los cultivos



* **Figura 3.** Gap fraction bidireccional en un rango cenital de 0 a 60° para las ESUs de Maíz y Cebolla. En cada ejemplo, la imagen de la izquierda muestra una de las 12 fotografías adquiridas dentro de la ESU y la imagen de la derecha muestra la fracción media de vegetación de la ESU.

más afectados son la Patata, el Maíz y la Alfalfa, siendo la Patata el cultivo más afectado con un LAI corregido dos veces mayor que el LAI efectivo. El LAI corregido para la Patata se aproxima al obtenido durante la misma campaña por un método destructivo. Se obtuvo un LAI de 7.34 calculando el factor de biomasa fresca de una hoja por unidad de área y aplicándolo a la biomasa fresca de un conjunto de siete plantas de Patata. Los cultivos menos afectados por este efecto son la Remolacha, el Ajo, la Cebolla y el campo de Hierba.

Campo	ESU	LAI _{efectivo}	Clumping	LAI _{corregido}
Patata	P1	2.60	0.45	5.79
Alfalfa	A9	2.30	0.61	3.76
Maíz	C2	3.10	0.65	4.80
Ajo	G1	0.20	0.74	0.27
Remolacha	B3	5.60	0.93	6.00
Alfalfa	A10	3.80	0.83	4.60
Cebolla	ON1	2.30	0.88	2.60
Hierba	GR	2.50	0.96	2.60
Maíz	C1	2.70	0.60	4.50

Tabla 3. LAI efectivo y LAI corregido del efecto de agrupamiento para algunas de las ESUs presentes en la zona de estudio.

* Todas la figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color.

Gap fraction monodireccional

La *gap fraction* monodireccional se obtuvo integrando la *gap fraction* bidireccional para el rango acimutal de 0 a 360°. A partir de esta cantidad se derivó el LAI efectivo correspondiente al valor integrado en un rango cenital [0°-60°], la FVC a partir de la *gap fraction* integrada en el rango cenital de observación [0°-10°], y la fAPAR a partir de la $P_0(q_s)$ en el momento de la medida.

La figura 4 muestra la *gap fraction* monodireccional para los cultivos más representativos del área de estudio. Las líneas de un mismo color representan las ESUs de un mismo campo, mientras que el trazo refleja el modo de adquisición de las imágenes.

La figura 4 pone de manifiesto que la variación de la *gap fraction* con el ángulo cenital de observación depende de las características estructurales de la cubierta vegetal. Así, las cubiertas más densas (Patata) y las más dispersas (Ajo) presentan poca variación de la *gap fraction* con el ángulo cenital en el intervalo considerado [0-60°]. Sin embargo, las cubiertas con vegetación intermedia-alta (Maíz, Alfalfa) presentan una variación muy importante, con diferencias de hasta el 60%. Podemos también apreciar diferencias significativas entre la adquisición realizada desde arriba o desde abajo (Alfalfa). Del análisis que efectuamos se desprendió una mayor significación de los resultados obtenidos desde abajo, dada la mejor discriminación de los elementos vegetales con el cielo. Este hecho debe ser especialmente tenido en cuenta en campañas posteriores.

La figura 4 pone de manifiesto que la variación de la *gap fraction* con el ángulo cenital de observación depende de las características estructurales de la cubierta vegetal. Así, las cubiertas más densas (Patata) y las más dispersas (Ajo) presentan poca variación de la *gap fraction* con el ángulo cenital en el intervalo considerado [0-60°]. Sin embargo, las cubiertas con vegetación intermedia-alta (Maíz, Alfalfa) presentan una variación muy importante, con diferencias de hasta el 60%. Podemos también apreciar diferencias significativas entre la adquisición realizada desde arriba o desde abajo (Alfalfa). Del análisis que efectuamos se desprendió una mayor significación de los resultados obtenidos desde abajo, dada la mejor discriminación de los elementos vegetales con el cielo. Este hecho debe ser especialmente tenido en cuenta en campañas posteriores.

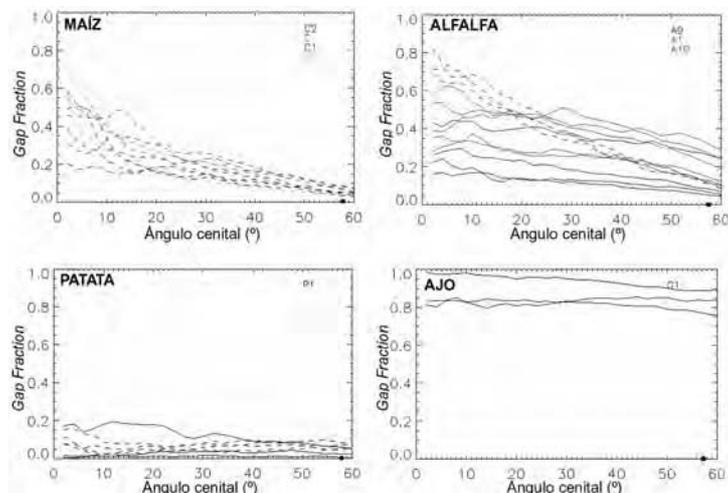


Figura 4. Gap fraction monodireccional para los cultivos más representativos del área de estudio en función del ángulo cenital de observación. La línea discontinua se refiere a las imágenes adquiridas desde el suelo y la línea continua a las adquiridas desde el techo de la cubierta.

Estimación de LAI, FVC y fAPAR

Los valores medios y la desviación estándar de LAI, FVC y fAPAR obtenidos a partir de la gap fraction monodireccional se muestran para cada campo en la tabla 4. Los resultados muestran una buena correspondencia con los valores esperados. Por ejemplo, la Patata y Remolacha aparecen como los cultivos más densos, mientras que el cultivo de Ajo muestra ser el menos denso. Por otra parte, la Alfalfa muestra ser el cultivo con mayor variabilidad en la zona tal como se observa a partir del rango de valores de LAI, FVC y fAPAR obtenido.

Con el objeto de analizar la consistencia entre los productos estimados mediante las fotografías hemisféricas, se ha buscado la relación existente

entre los valores de FVC y el LAI frente a la fAPAR (figura 5). Las relaciones encontradas entre los parámetros responden a un comportamiento lineal entre la FVC y la fAPAR y un comportamiento exponencial entre el LAI y la fAPAR como se observa en diferentes trabajos (Myneni et al., 1994; Turner et al., 2002).

ESU	LAI ± s	FVC ± s	fAPAR ± s
Alfalfa (A9)	2.40±0.10	0.33±0.03	0.59±0.02
Alfalfa (A1)	1.7±0.3	0.55±0.09	0.72±0.18
Alfalfa (A10)	2.8±0.8	0.73±0.12	0.80±0.10
Patata (P1)	4.0±0.9	0.94±0.06	0.94±0.03
Maíz (C2)	3.5±0.2	0.71±0.12	0.91±0.01
Maíz (C1)	2.9±0.3	0.63±0.08	0.79±0.13
Ajo (G1)	0.23±0.15	0.17±0.09	0.13±0.07
Remolacha (B3)	4.6±0.4	0.95±0.03	0.97±0.01
Cebolla (ON1)	2.2±0.4	0.63±0.05	0.72±0.11

Tabla 4. Valores medios de LAI, FVC y fAPAR para cada campo junto con la desviación estándar.

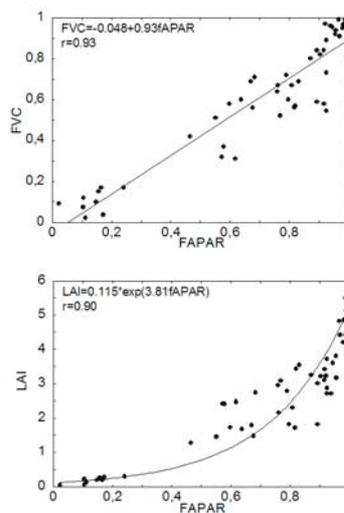


Figure 5. LAI, FVC y fAPAR estimados a partir de la cámara digital. La FVC y la fAPAR se comportan linealmente (izquierda) mientras que el LAI y la fAPAR lo hacen a partir de una función exponencial (derecha).

Comparación con el LI-COR LAI2000

Por último, se ha llevado a cabo una comparación entre el LAI efectivo y la FVC estimados a partir de dos métodos diferentes, fotografía hemisférica y LI-COR LAI2000. El FVC derivado del LAI2000 se ha estimado a partir de la *gap fraction* medida por el sensor situado lo más cerca del nadir, el situado a un ángulo cenital de 7°. Cabe destacar que en la comparación realizada las superficies de medida (ESUs) generalmente no se localizaron exactamente sobre el mismo punto y que el número de ESUs y medidas dentro de cada ESU fue aproximadamente el doble para el LI-COR LAI2000.

La figura 6 muestra la diferencia entre los valores medios de ambos instrumentos relativa al valor medio estimado por el LI-COR LAI2000 para cada cultivo. Los valores negativos indican una subestimación de la cámara frente al LI-COR LAI2000, mientras que valores positivos indican una sobreestimación de la cámara. En general se observa para el LAI discrepancias menores del 25%, excepto para los campos de Ajo (G1) y Alfalfa A10 donde las discrepancias son mayores. En el caso del campo G1, cabe destacar que, a diferencia del LI-COR LAI2000, la estimación del LAI a partir de las fotografías hemisféricas permitió corregir la presencia de vegetación seca, proporcionando así un valor más bajo del LAI y, por tanto, la consecuente sobrestimación del LI-COR LAI2000.

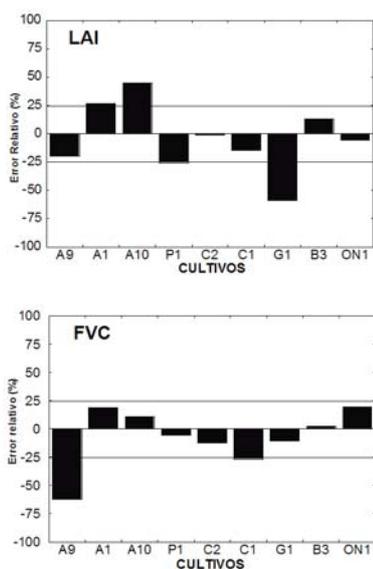


Figura 6. Diferencias relativas (referidas al valor medio estimado por el LAI2000) de los valores obtenidos por los dos métodos para cada cultivo, LAI (izquierda) y FVC (derecha).

mación del LI-COR LAI2000. Respecto al campo de Alfalfa, las imágenes disponibles para estimar el LAI presentaban una alta proporción de sombras debido, principalmente, a la alta densidad de la cubierta y al bajo ángulo cenital solar en el momento de adquisición. Estos factores introdujeron confusión en la clasificación de suelo de fondo, lo que dio lugar a valores altos del LAI y, por tanto, a una sobreestimación respecto al LI-COR LAI2000. Con excepción de un cultivo de Alfalfa, los errores relativos en la estimación de la FVC son menores, típicamente inferiores al 20%. El orden de magnitud de estos errores es similar al que se comete cuando medimos una superficie utilizando dos LI-COR LAI2000 diferentes. En este caso, hemos comprobado que el error típico oscila entre el 10% y el 60%, dependiendo del tipo de cubierta, siendo menor el error para superficies densas y mayor para superficies dispersas, donde el muestreo realizado (dependiente del operador) adquiere una mayor importancia en la estimación final.

Ventajas y limitaciones de la cámara hemisférica

En este apartado se resumen las diferentes ventajas y limitaciones que se derivan de este trabajo en la estimación de parámetros biofísicos, LAI, FVC y fAPAR (tabla 5), las cuales se describen a continuación:

- Estimación de los parámetros estructurales de la cubierta como el LAI, FVC, ALA, *clumping* y parámetros relacionados con la actividad fotosintética como la fAPAR. Permite corregir el LAI del efecto *clumping* y de la vegetación seca respecto a otros instrumentos como el LI-COR LAI2000.
- La posibilidad de situar la cámara arriba o debajo de la cubierta permite caracterizar un mayor número de cubiertas que el LI-COR LAI2000.
- El campo continuo de visión de la cámara (0-90°) permite evaluar la *gap fraction* en un rango más amplio que el LI-COR LAI2000, con la limitación de que para cubiertas caracterizadas desde arriba es recomendable limitar el campo de visión a un rango cenital entre 0° y 60°. De este modo, se evita que el procesado incluya elementos de la cubierta que están muy alejados del nadir.
- La cámara permite estimar la *gap fraction* bajo un amplio rango de condiciones de ilu-

	Ventajas	Limitaciones
<i>Posición de la cámara</i>	Puede situarse la cámara tanto arriba como debajo de la cubierta.	Desde arriba se sobreestima el LAI respecto al LI-COR, y desde abajo se puede alterar la estructura de la cubierta.
<i>Campo de visión</i>	Evaluación de la <i>gap fraction</i> en un rango continuo del ángulo cenital de 0-90°.	Adquisición desde arriba a limitar el campo de visión al rango cenital de 0 a 60°.
<i>Condiciones de iluminación</i>	Amplio rango de iluminación respecto al LI-COR.	Saturación en la imagen en horas centrales y presencia de sombras en horas extremas.
<i>Tiempo procesado</i>	Información permanente que puede procesarse varias veces y con programas diferentes.	Procesado posterior a la adquisición, que es lento computacionalmente.
<i>Segmentación</i>	Permite distinguir vegetación seca.	Dependiente del usuario.
<i>Parámetros biofísicos</i>	Estima el LAI corregido del efecto de agrupamiento, FVC y fAPAR.	Dependiente del modelo.

Tabla 5. Ventajas y limitaciones que presenta el método de la cámara hemisférica en la estimación de parámetros biofísicos.

minación, con la limitación de posibles saturaciones del brillo cuando la imagen se adquiere desde debajo de la cubierta en horas centrales del día y presencia de sombras cuando la imagen se adquiere desde arriba en horas extremas del día.

- El proceso de segmentación se presenta como el paso más crítico, dado que depende en gran parte del criterio del analista para distinguir la vegetación verde de la seca, que es especialmente complicado en cubiertas muy densas adquiridas desde arriba. En este tipo de situaciones, la resolución de la cámara y la posición son dos factores importantes a considerar para extraer la máxima información relativa a la cubierta vegetal.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado el método de la cámara hemisférica para la estimación de los parámetros biofísicos, LAI, FVC y fAPAR a partir de la estimación de la *gap fraction* y en el caso concreto de un área de cultivos. En resumen, el método de la cámara hemisférica se presenta como una técnica apropiada para la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta en un área de cultivos, presentando discrepancias con el LI-COR menores del 25% respecto a las proporcionadas por el LI-COR LAI2000, sobre la misma área de cultivos.

De las principales ventajas y limitaciones derivadas, se destaca la posibilidad de estimar un conjunto de parámetros estructurales y biofísicos de la cubierta, como el LAI, ALA, FVC, *clumping* y la fAPAR. La ventaja de la cámara hemisférica en estimar el *clumping* es que permite corregir el LAI del efecto de agrupamiento de los elementos que componen la cubierta (e.g., hojas) a diferencia de otros instrumentos, como el LI-COR LAI2000. Otra de las ventajas importantes es la posibilidad de calcular la *gap fraction* bajo un amplio rango de condiciones de iluminación a diferencia del LI-COR y evaluar la *gap fraction* en un rango más amplio que el LI-COR LAI2000 gracias a su campo continuo de visión (0-90°), con la limitación de que es recomendable limitarlo entre 0° y 60 cuando se caracterizan cubiertas desde arriba. Por último, destacar que a pesar del tiempo computacional requerido en el procesado las imágenes respecto al LI-COR LAI2000, las fotografías hemisféricas se pueden volver a procesar con otros algoritmos más precisos o que estimen parámetros de la cubierta diferentes.

Como perspectivas futuras, destacamos el estudio que se está realizando actualmente con los dos conjuntos de datos descritos en este trabajo (i.e. LI-COR LAI2000 y cámara hemisférica). De este estudio se pretende determinar el número óptimo de medidas necesarias en la caracterización de una superficie de cultivos (e.g. Barrax) y derivar conclusiones sobre el diseño del muestro espacial para futuros trabajos de campo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el proyecto LSA SAF (EUMETSAT), DESURVEY (EC-003950), IDEAS (REN2002-01495) y TEDECVA (GV2004-B-191).

REFERENCIAS

- ANDRIEU, B., and BARET, F. 1993. Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements. In *Crop Structure and Light Microclimate, Characterization and Applications* (C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, and H. Sinoquet, Eds.), INRA, Paris, pp.285-322.
- BARBER, C.B., DOBKIN, D.P., and Huhdanpaa, H.T. 1986. The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 22 (4): 469-483.
- BARET, F., WEISS, M., LEROY, M., ALLARD, D., GARRIGUES, S., BOHBOT, H., BOSSENO, R., BELLA, C. D., ESPANA, M., GOND, V., GUINOT, J.-P., GUYON, D., LELONG, C., MOUGIN, E., NILSON, T., and VINTILLA, R. 2004. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of land satellite products. *Remote Sensing of Environment*. (en prensa).
- BLENNOW, K. 1995. Sky view factors from high-resolution scanned fish-eye lens photographic negatives. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12: 1357-1362.
- BOLLE, H.J., et al. 1993. EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area. *Annales Geophysical*, 173-189.
- BONHOMME, R., and CHARTIER, P. 1972. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Israel Journal of Agricultural Research*, 22: 53-61.
- CALERA, A., JOCHUM, A., and CUESTA, A. 2003. Space-assisted irrigation management: Towards user-friendly products. *ICID Workshop on Remote Sensing of Crop Evapotranspiration, Montpellier*, 17 Sep 2003.
- CAMACHO-DE COCA, F., GARCÍA HARO, F.J., MARTÍNEZ, B., and MELIÁ, J. 2003. Prototyping algorithm for retrieving vegetation parameters from the MSG and EPS Eumetsat platforms. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystem and Hydrology*. SPIE, 5232: 1-10.
- CAMPBELL, G. S. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36: 317-321.
- CHEN, J. M. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80: 135-163.
- CHEN, J. M., RICH, P. M., GOWER, S. T., NORMAN, J. M., and PLUMMER, S. 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 102: 29429-29443.
- DECAGON. 2001. AccuPAR, Linear PAR/LAI ceptometer. Operator's Manual, Version 3.4. Decagon Devices, Inc.
- FENSHOLT, R., SANDHOLT, I., and RASMUSSEN, S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91: 490-507.
- FRAZER, G. W., CANHAM, C. D., and LERTZMAN, K. P. 2000. Gap Light Analyzer (GLA), version 2.0. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 81 (3): 191-197.
- GOWER, S. T., KUCHARIK, C. J., and NORMAN, J. M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70: 29-51.
- HILL, R. 1924. A lens for whole sky photographs. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50:227-235.
- JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUYSA, B., COPPIN, P., WEISS, M. and BARET, F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 19-35.
- JUSTICE, C. O., BELWARD, A., MORISETTE, J., LEWIS, P., PRIVETTE, J., and BARET, F. 2000. Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 21 (17): 3383-3390.
- KNYAZIKHIN, Y., MARTONCHIK, J. V., MYNENI, R. B., DINER, D. J., AND RUNNING, S. W. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research*, 103 (D24): 32257-32275.
- LANG, A. R. G., XIANG, Y., and NORMAN, J. M. 1985. Crop structure and the penetration of direct

- sunlight. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35: 83-101.
- LEBLANC, S. G., FERNANDES, R., and CHEN, J. M. 2002. Recent advancements in optical field leaf area index, foliage heterogeneity, and foliage angular distribution measurements. In: *Proceedings of IGARSS 2002*, Toronto, Canada, 24-28 June.
- LI-COR. 1992. LAI-2000 Plant Canopy Analyser. Instruction Manual. LICOR, Lincoln, NE, USA.
- MORENO, J., CALERA, A., CASELLES, V., CISNEROS, J. M., MARTÍNEZ-LOZANO, J. A., MELIÁ, J., MONTERO, F., and SOBRINO, J. 2001. The measurements programme at Barrax. *ESA-DAISEX proceedings*, ESA SP-499: 43-52.
- MYNENI, R. B., and WILLIAMS, D. L. 1994. On the relationship between fAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49: 200-211.
- NILSON, T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 8:25-38.
- NOILHAN, J., and PLANTON, S. 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weath. Rev.*, 117: 536-549.
- NORMAN, J. M., and CAMPBELL, G. S., 1989. Canopy structure. In: Pearcy, R.W., Ehleringer, J., Mooney, H.A., Rundel, P.W. (Eds.), *Plant Ecology: Field Methods and Instrumentation*. Chapman & Hall, London, pp. 301-325.
- PENNEBAKER, W. B., and MITCHELL, J. L. 1993. JPEG Still Image Data Compression Standard. Van Nostrand Reinhold Press, New York, NY, 650 pp.
- PERRY, S. G., FRASER, A. B., THOMSON, D. W., and NORMAN, J. M. 1988. Indirect sensing of plant canopy structure with simple radiation measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42: 255-278.
- PRINCE, S. D. 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1313-1330.
- RICH, P. M. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews*, 5: 13-29.
- RICH, P. M., CLARK, D. B., CLARK, D. A., and OBERBAUER, S. F. 1993. Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65:107-127.
- ROSS, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands, The Hague, 391 pp.
- SELLERS, P. J., DICKINSON, R. E., RANDALL, D. A., BETTS, A. K., HALL, F. G., BERRY, J. A., COLLATZ, C. J., DENNING, A. S., MOONEY, H. A., NOBRE, C. A., and SATO, N. 1997. Modelling the exchanges of energy, water, and carbon between the continents and the atmosphere. *Science*, 275: 502-509.
- TUKEY, J. W. 1977. Exploratory data analysis. Addison-Wesley editor.
- TURNER, D. P., GOWER, S. T., COHEN, W. B., GREGORY, M., and MAIERSPERGER, T. K. 2002. Effects of spatial variability in light use efficiency on satellite-based NPP monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 17: 233-249.
- WALTER, J. M., and TORQUEBIAU, E. 2000. The computation of forest leaf area index on slope using fish-eye sensors. *Compte-Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, Life Sciences*, 323: 801-813.
- WANG, Y. P. and JARVIS, P. G. 1988. Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.*, 43: 319-321.
- WATSON, D. J. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11, 41-76.
- WEISS, M., and BARET, F. 1999. Evaluation of Canopy Biophysical Variable Retrieval Performances from the Accumulation of Large Swath Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 70: 293-306.
- WEISS, M., BARET, F., MYNENI, R. B., PRAGNÈRE, A., and KNYAZIKHIN, Y. 2000. Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. *Agronomie*, 20: 3-22.
- WEISS, M., BARET, F., SMITH, G. J., JONCKHEERE, I., and COPPIN, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 37-53.
- WELLES, J. M. 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Rem. Sens. Rev.* 5: 31-43.
- White, M.A., Asner, G.P., Nemani, R.R., Privette, J.L., and Running, S.W. 2000. Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems: Digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods. *Remote Sensing of Environment*, 74: 45-57.