

Validación de un modelo 3D para la estimación de radiación interceptada en cubiertas heterogéneas mediante imágenes de alta resolución espacial

3D model validation to estimate intercepted radiation using high spatial resolution imagery in row-tree canopies

M. L. Guillén-Climent¹, P. J. Zarco-Tejada¹, J. A. J. Berni¹ y F. J. Villalobos^{1,2}
mariluzguillen@ias.csic.es

¹ Instituto de Agricultura Sostenible, IAS-CSIC. Alameda del Obispo, s/n. 14004, Córdoba

² Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales 14071, Córdoba

Recibido el 08 de marzo de 2010, aceptado el 10 de mayo de 2010

RESUMEN

En este trabajo se llevó a cabo la validación del modelo 3D de transferencia radiativa FLIGHT para la estimación de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (fIPAR) en cubiertas heterogéneas. El modelo permite simular cubiertas de tipo discontinuo evaluando la relación entre la energía reflejada y absorbida en función de distintos parámetros como la estructura de la plantación, geometría de visión o las propiedades espectrales del suelo y la vegetación. El estudio fue llevado a cabo en cultivos de melocotón y naranjo, pertenecientes a fincas comerciales situadas en las provincias de Córdoba y Sevilla. De cada plantación, se tomaron imágenes multispectrales de alta resolución mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV) en zonas de estudio con un amplio rango de heterogeneidad estructural, donde se realizaron medidas ópticas foliares, estructurales y de interceptación de radiación. El sensor utilizado para la toma de imágenes fue una cámara multispectral de 6 bandas y 10 nm FWHM, obteniendo los datos de radiación interceptada para validación de fIPAR mediante ceptómetro en el momento del vuelo del UAV. Los errores obtenidos en la estimación de fIPAR usando el modelo FLIGHT fueron de 10% RMSE, permitiendo parametrizar la relación NDVI vs fIPAR

ABSTRACT

A study was conducted to evaluate the 3D radiative transfer model FLIGHT to estimate fraction of Intercepted Photosynthetically Active Radiation (fIPAR) in heterogeneous canopies. The FLIGHT 3D canopy model enables simulation of the effects of different input parameters on fIPAR, such as the orchard architecture, planting grid, solar geometry and background artifacts. The study was conducted over two commercial peach and orange orchards located in Cordoba and Seville, where study areas showing a gradient in heterogeneous structure were selected. High resolution multispectral imagery was acquired by an unmanned aerial vehicle (UAV). The multispectral sensor used in this study was a 6-band multispectral camera with 10nm FWHM bands, using a ceptometer for ground truth data of intercepted radiation. Estimates for radiation interception using a modeling approach yielded errors bellow 10% RMSE.

para distintos rangos estructurales, de geometría de visión y tipos de suelo en este caso complejo de cubiertas agrícolas discontinuas.

PALABRAS CLAVE: teledetección, fIPAR, NDVI, cubiertas heterogéneas, alta resolución espacial

KEYWORDS: remote sensing, fIPAR, NDVI, heterogeneous canopies, high spatial resolution

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es la principal fuente de energía para los procesos fisiológicos que se llevan a cabo en las plantas. La fracción de radiación solar absorbida en el rango espectral comprendido entre 400-700 nm es utilizada en la fotosíntesis, de ahí que sea denominada radiación fotosintéticamente activa o radiación PAR. Siendo ésta, aproximadamente, el 45 % de la radiación solar global. La radiación PAR, es el factor medioambiental que determina principalmente la producción de un cultivo (Montheith, 1994). Habitualmente, la superficie foliar es un buen indicador de la capacidad del cultivo para interceptar radiación (Villalobos *et al.*, 2002). Sin embargo, en cultivos arbóreos discontinuos, como es el caso de los frutales, la cantidad de PAR que intercepta un árbol depende de la arquitectura del cultivo, marco de plantación, altura y dimensiones de la copa y distribución espacial de la superficie foliar, así como del índice de área foliar (IAF) (Palmer & Jackson, 1977; Sinoquet, 1993). Trabajos anteriores han estudiado la posibilidad de estimar la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fAPAR) o interceptada (fIPAR) mediante metodologías que emplean teledetección. Índices espectrales de vegetación basados en la diferencia entre la reflectancia de la cubierta en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano han sido aplicados para obtener fIPAR y fAPAR a escala global; siendo NDVI el que mejor correlaciones ha demostrado (Asrar *et al.* 1992; North, 2002). Relaciones empíricas u obtenidas mediante modelización han sido estudiadas en cubiertas homogéneas, como trigo, maíz o soja (Daughtry, 1983; Hall *et al.*, 1992 and Moriondo *et al.*, 2007, entre otros) y cubiertas forestales (Myneni, 1994; Huemmrich, 2001; and Zhang *et al.*, 2009, entre otros). Sin embargo, poco trabajo se ha llevado a cabo en el caso de cubiertas heterogéneas, y la aplicación de relaciones encontradas previamente en herbáceos o cubiertas forestales podría llevar a conclusiones erróneas. Los efectos provocados por la orientación de filas, la re-

flectancia de suelo y geometría de visión sobre los índices espectrales de vegetación usados para estimar fIPAR, necesitan una correcta modelización para entender la influencia de cada componente.

En el estudio llevado a cabo, tenemos como objetivo validar el modelo FLIGHT (North, 1996) para la obtención de fIPAR. Así como avanzar en el desarrollo de metodologías para la estimación, mediante teledetección, de la radiación solar interceptada en las bandas de PAR e infrarrojo cercano (IR) en cubiertas heterogéneas, haciendo uso de este modelo.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

La toma de imágenes y las diferentes medidas ópticas foliares, estructurales y de interceptación de radiación se efectuaron en dos fincas comerciales de melocotón, en Córdoba (37° 48'N, 4° 48'W), y naranjo, localizada en Sevilla (37° 20'N, 5°50'W), de una extensión de 100 y 82 ha, respectivamente. En cada una de ellas se seleccionaron zonas con un amplio rango de características estructurales del cultivo, como diámetro y altura de copa e índice de área foliar (IAF), 10 zonas de estudio en el caso de naranjo y 7 en caso de melocotonero.

Las medidas de IAF se llevaron a cabo mediante un método indirecto, explicado a continuación, considerando tanto elementos verdes como no verdes, obteniendo así índice de área de planta (IAP) y no IAF.

En el caso de las parcela de naranjo, las distintas áreas de estudio seleccionadas mostraron un gradiente de IAP que varió entre 1.3 y 4, alturas de árboles entre 1.8 y 4.5 m y diámetros de copa entre 1.5 y 3.5 m, siendo el marco de plantación de algunas zonas de 7x3 m y 6x3 m en otras. En el caso del melocotón, el rango de IAP variaba entre 2 y 4.2, la altura de los árboles entre 3 y 4 m y diámetros de copa entre 1.8 y 3 m. La figura 1 muestra una imagen adquirida por el sensor aerotransportado y detalle de una de las zonas de estudio seleccionadas, cuya resolución espacial es de 15 cm.

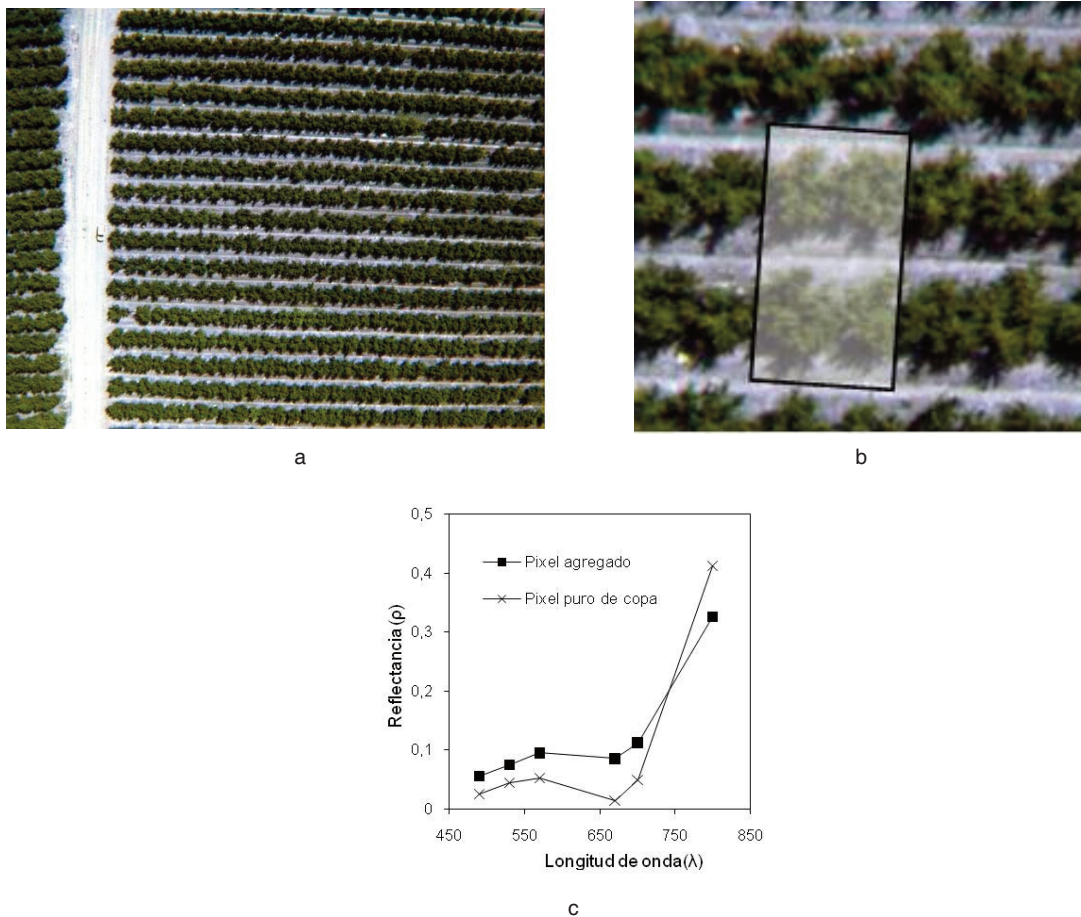


Figura 1. Imagen de la finca de melocotón adquirida por el sensor multispectral (MCA-6) (a) y zona de estudio donde se llevan a cabo las medidas de interceptación de radiación, tamaño de pixel 15 cm (b). Espectros de pixeles de copa pura y pixel agregado de copa, suelo y sombras (c)

Toma de datos

Para las medidas de radiación interceptada se usó un ceptómetro (SunScan Canopy Analysis System, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Gran Bretaña). La toma de datos se realizó entre los cuatro árboles centrales de cada una de las diferentes áreas de estudio en el momento del vuelo del UAV. En la figura 1 aparece sombreado el bloque donde se realizan las medidas dentro de cada área. El sensor usado fue una cámara multispectral de 6 bandas (MCA-6, Tetacam, Inc., California, Estados Unidos), con longitudes de onda centradas en 490, 530, 570, 670, 700 y 800 nm y 10nm de ancho de banda (FWHM). Para el cálculo de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) se usaron las bandas centradas en 670 y 800 nm.

Se llevaron a cabo estudios de variabilidad diurna, tomando medidas de interceptación de radiación e

imágenes, en intervalos de una hora desde las 8 hasta las 12 GMT en una de las áreas de estudio seleccionadas para cada cultivo.

El objetivo era conseguir variación diurna de índices de vegetación, en concreto NDVI, a lo largo del día como función del porcentaje de sombras generado, debido a cambios en la geometría solar (Fig.2). Para el estudio de la variabilidad espacial de la radiación solar interceptada en relación a NDVI como función de las características estructurales de los árboles, se adquirieron datos con el ceptómetro e imágenes, a las 10 GMT, en todas las áreas de estudio seleccionadas para cada cultivo. La reflectancia agregada de los 4 árboles de la zona de estudio, incluyendo suelo y sombras, fue usada para calcular el índice de vegetación espectral NDVI (Fig 1). Para evaluar la influencia de estos parámetros sobre este índice de vegetación, se usó el modelo 3D de transferencia radiativa FLIGHT.

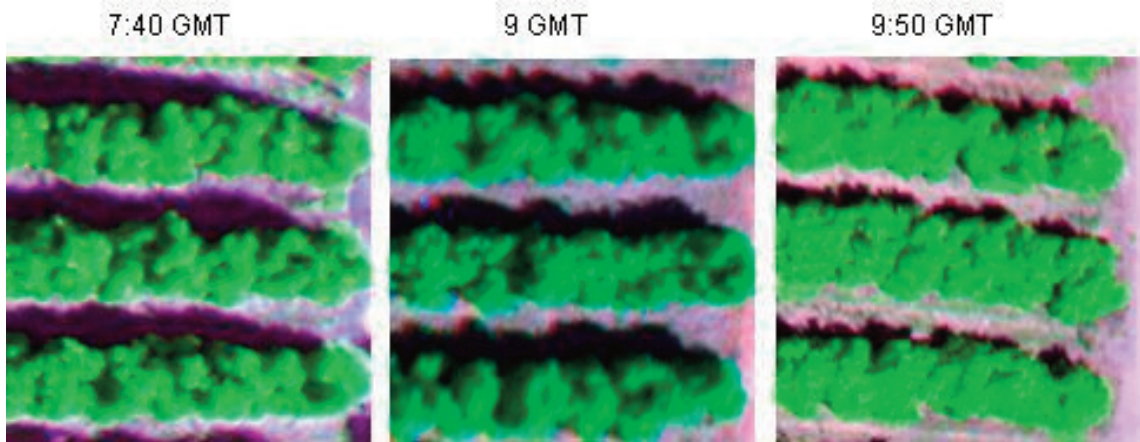


Figura 2. Imágenes adquiridas con el sensor multispectral (MCA-6) mostrando la evolución de sombras a las 7.40 GMT, 9 GMT y 9.50 GMT

Para alimentar el modelo FLIGHT, se tomaron además las siguientes medidas auxiliares. Datos de reflectancia y transmitancia de las hojas mediante medidas de esfera integrante (Li-Cor 1800-12, Inc., Lincoln, NE, USA) acoplado con una fibra óptica de 200 μm a un espectrómetro (Ocean Optics Inc. model HR2000) realizando las medidas tal y como se describe en Zarco-Tejada *et al.* (2005). Más de 1500 hojas fueron medidas y el valor medio fue obtenido para calcular el valor final de reflectancia y transmitancia. Datos estructurales de cultivo, altura y diámetro de copa, fueron obtenidos como media del radio de los cuatro árboles que componen cada zona de estudio. En cada cuadrante de cada árbol, su silueta fue estimada midiendo el límite superior e inferior de la copa con una pértiga metrada vertical, la cual era movida sistemáticamente desde el tronco hacia fuera cada 0.2 m (Villalobos, 1995).

El índice de área foliar (IAP) fue estimado mediante la ecuación (Lang, 1987).

$$IAP = -\frac{\cos(\theta) \ln T(\theta)}{G(\theta)} \quad (1)$$

Donde G es la proyección media de la superficie de la hoja en un plano perpendicular a la dirección de los rayos del sol, T es la transmitancia y θ es el ángulo zenital solar. Tomando medidas de transmitancia con el ceptómetro en el momento en que el ángulo zenital es de 1 radián (57.3°), ángulo para el cual se cumple que G es igual a 0.5 (Ross, 1981), la ecuación queda como:

$$IAP = -1.1 \ln T(1) \quad (2)$$

Simulaciones con FLIGHT

Las simulaciones llevadas a cabo para entender la relación entre índices espectrales de vegetación y radiación interceptada fueron realizadas con el modelo de transferencia radiativa FLIGHT (North, 1996). El modelo FLIGHT, está basado en el método de Monte Carlo. Los parámetros de entrada que requiere FLIGHT para su ejecución se muestran en la Tabla 1. El rango de datos seleccionados corresponde a un rango similar a los medidos en campo. El índice de área foliar que se incluye es índice de área de planta, tal como fue medido en campo. Fracción de corteza, sin embargo, fue considerada 0 ya que no tenemos estimación de este porcentaje y podría hacer un cálculo incorrecto de la reflectancia de la cubierta estimada por el modelo. Los datos de salida del modelo FLIGHT son; una imagen hiperespectral 3D, con el mismo número de bandas que la signatura espectral de hojas y suelo usadas como datos de entrada, y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (fIPAR) para la escena.

En cada una de las simulaciones realizadas por FLIGHT, se representaron escenarios de plantación equivalentes a las zonas de estudio, que fueron validadas con las medidas de radiación interceptada tomadas por el ceptómetro. En la figura 3 se muestra una imagen adquirida por el sensor junto a la escena simulada por FLIGHT, incluye dos áreas de estudio con mayor y menor porcentaje de cobertura de vegetación.

Parámetros de entrada de FLIGHT	Valores/Unidades
<i>Parámetros ópticos y estructurales de las hojas</i>	
Reflectancia y transmitancia hemisférica de hojas verdes	Esfera integrante
Reflectancia y transmitancia hemisférica de hojas senescentes	No usado
Radio equivalente de la hoja	0.025 m
<i>Datos de la cubierta y estructura de los árboles</i>	
Índice de área foliar	1 – 6
Fracción de cobertura	5 – 80 %
Función de distribución foliar angular	Empírica
Fracción de hojas verdes	1
Fracción de hojas senescentes	0
Fracción de tronco	0
Reflectancia y transmitancia del tronco	No usada
Numero de arboles representados y coordenadas	Coord. (m)
Forma de la copa	Elíptica
Diametro de la copa	1-4 m
Altura del arbol	1.5-5 m
<i>Suelo y geometría de visión</i>	
Cenit y azimut solar	Grados
Cenit y azimut del sensor	Grados
Reflectancia del suelo	Tomada de la imagen
Rugosidad del suelo	0
Espesor óptico	0.15

Tabla 1. Valores nominales y rango de parámetros usados para modelizar la cubierta con el modelo FLIGHT

La signatura espectral de cada uno de los bloques estudiados, fue obtenida tanto en las imágenes obtenidas con el sensor aerotransportado como en las simulaciones, calculando así los índices de vegetación. El modelo FLIGHT permitió a su vez simular los efectos de diferentes parámetros de entrada, características estructurales del cultivo, marcos de plantación y la reflectancia de suelo sobre el NDVI, entre otros.

Así el modelo FLIGHT usado en este estudio permitió; en primer lugar, su validación, representando los escenarios de plantación de los que se tenían datos de campo tanto de reflectancia como de radiación interceptada. Así como para entender el efecto de los diferentes parámetros de entrada, geometría de visión, arquitectura de la cubierta o propiedades ópticas del suelo, que afectan a la relación Índices de vegetación-fIPAR.

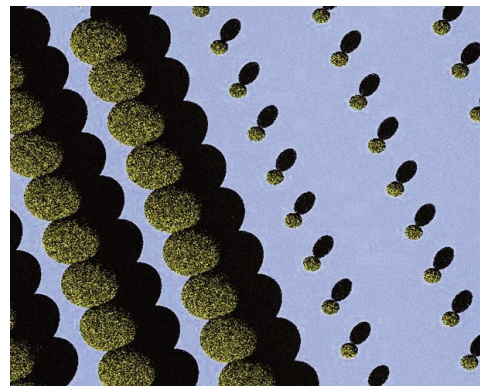
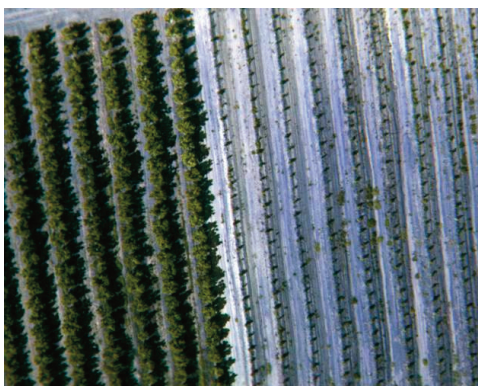


Figura 3. Imagen de la finca de naranjo adquirida por el sensor multispectral (MCA-6) (a) e Imagen simulada obtenida con FLIGHT (b)

RESULTADOS

En primer lugar se obtuvo la relación entre índices de vegetación (NDVI) calculado a partir de las imágenes multispectrales tomadas desde el UAV y radiación interceptada medida con el ceptómetro en las distintas zonas de estudio como primera aproximación a la estimación de la radiación interceptada mediante uso de la teledetección en cubiertas discontinuas (Figura 4). La reflectancia agregada de cuatro árboles, incluyendo suelo y sombras, fue usada para obtener el NDVI de cada zona que fue relacionado con la radiación interceptada medida en cada una de ellas, tanto en naranjo como en melocotonero. En la Figura 4 se observa la estrecha relación existente entre este índice y la radiación interceptada, obteniendo $r^2=0.92$ en naranjo y $r^2=0.89$ en melocotón. En este primer acercamiento a la relación obtenida, zonas con distinta arquitectura, así como distintas geometrías de visión solar fueron consideradas. Por tanto la figura 4 muestra una relación que incluye tanto variabilidad diurna como espacial. A continuación, para validar el valor de fIPAR obtenido por FLIGHT, se estudió la relación entre la radiación interceptada medida por el ceptómetro y la simulada por FLIGHT. La figura 5 representa los valores de fIPAR medidos con el ceptómetro y los simulados por FLIGHT en las distintas zonas seleccionadas. Se observa que el modelo FLIGHT infraestima la radiación interceptada, con un error cuadrático medio inferior al 10%. Estos resultados demuestran el potencial para estimar radiación interceptada mediante la combinación de índices y simulación mediante un modelo 3D. Finalmente se evaluó cómo la variación de parámetros,

como reflectancia de suelo, geometría solar, fracción de cobertura o datos estructurales, como la altura de la vegetación, pueden afectar a la relación NDVI y fIPAR.

Haciendo uso del modelo FLIGHT para este estudio, todos los parámetros para realizar estas simulaciones permanecen fijos, excepto el parámetro en estudio encada uno de los casos que se presentan. Se ilustran en la figura 6. La figura 6a muestra la relación NDVI vs fIPAR para los mismos porcentajes de cobertura para 3 tipos de suelo. Se observa que la relación se ve afectada por este parámetro, ya que NDVI, está muy influenciado por la reflectancia de suelo. Es el caso también del parámetro, distribución espacial de la cubierta (fig. 6b). Las sombras generadas a distintas horas del día varían dependiendo de la orientación del cultivo, afectando de esta forma, tanto a NDVI, ya que varía el porcentaje suelo soleado-suelo sombreado como a la fracción de radiación interceptada. En el caso de parámetros estructurales como la altura de la vegetación el impacto en la relación NDVI vs fIPAR es inapreciable (fig. 6c). Esto se debe a que la influencia ocasionada por la altura de la vegetación en el cálculo de NDVI y en la fracción interceptada de radiación es similar, lo que hace que la relación permanezca constante. Este estudio nos indica que no puede establecerse una relación general entre NDVI y radiación interceptada, sino como función de parámetros que influyen de una forma importante a la relación. Una metodología para estimar radiación interceptada en este tipo de cubiertas discontinuas haciendo uso de imágenes de alta resolución espacial y el modelo de transferencia radiativa FLIGHT es propuesta en Guillén-Climent *et al.*, 2010 (enviado).

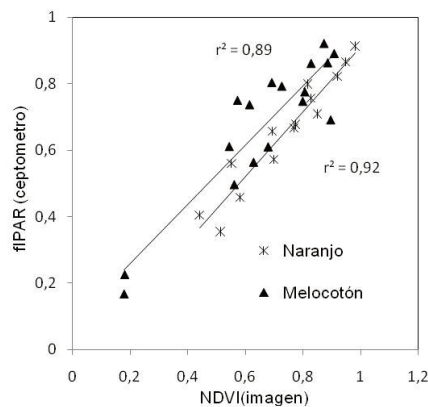


Figura 4. Relación entre radiación interceptada medida con ceptómetro y NDVI (imagen) para cultivos de melocotón y naranjo

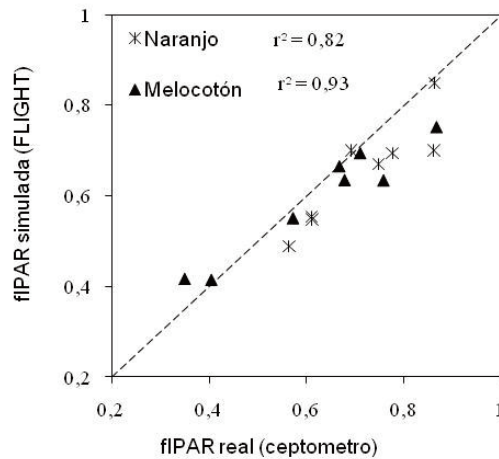


Figura 5. Relación entre radiación interceptada medida y simulada para cultivos de melocotón y naranjo, caso de variabilidad espacial

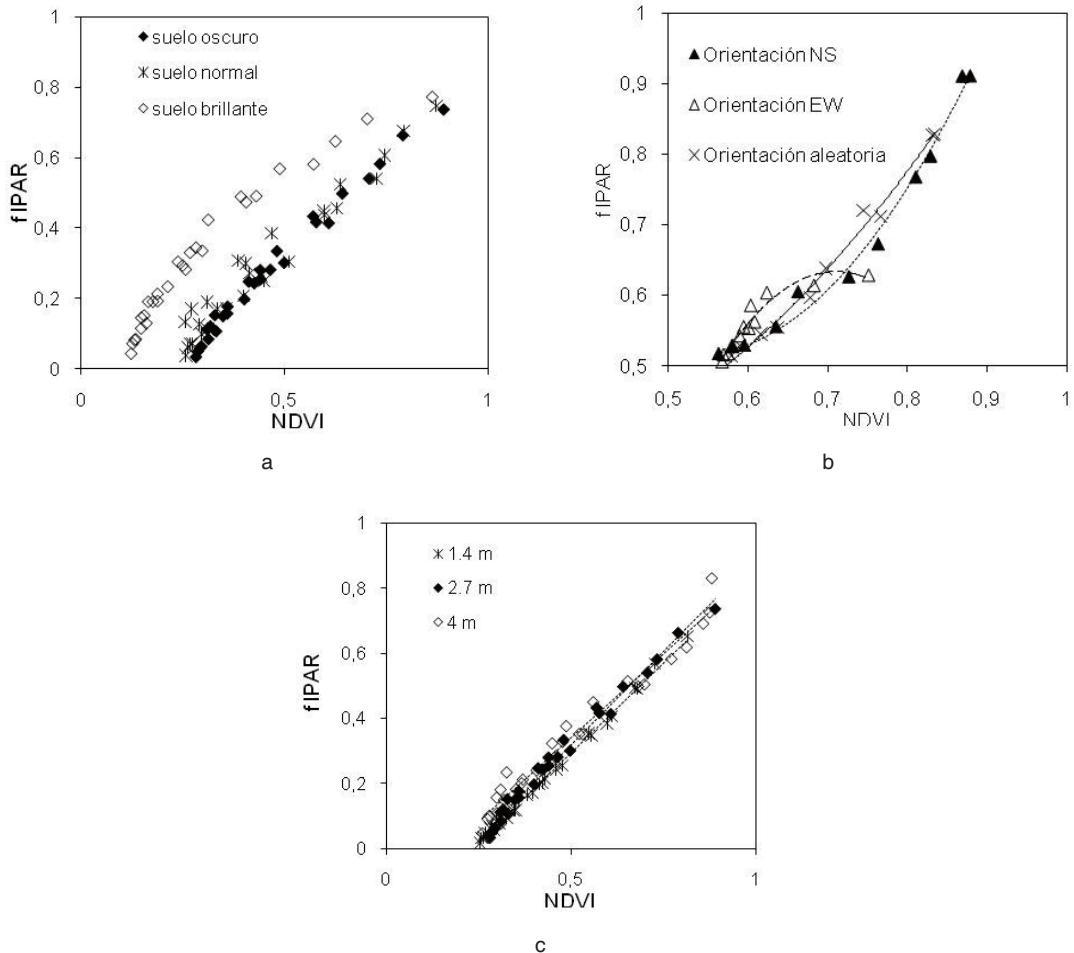


Figura 6. fIPAR simulado frente a NDVI simulado para diferentes tipos de suelos variando el porcentaje de cubierta de 5-80%, LAI de 2 a 6, manteniendo propiedades ópticas constantes (a), para 3 orientaciones distintas de la cubierta, variando la geometría de visión solar, manteniendo propiedades ópticas y estructurales constantes (b) y para distintas alturas de los árboles variando los demás parámetros de igual manera que la expuesta para los suelos

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que el NDVI agregado de copa, suelo y sombras obtenido mediante alta resolución espacial es un indicador potencial de la radiación interceptada en cubiertas de tipo heterogéneo. Sin embargo, simulaciones realizadas con el modelo de transferencia radiativa FLIGHT demuestran que el NDVI está altamente influenciado por parámetros de tipo estructural y espectral, por lo que se hace necesaria una correcta parametrización. FLIGHT demostró ser una buena alternativa para estimar radiación interceptada en cultivos de melocotón y naranjo. Los errores obtenidos en la estimación de radiación interceptada usando el modelo FLIGHT fueron de 10% RMSE, permitiendo, por tanto, parametrizar la relación NDVI vs radiación interceptada para distintos rangos estructurales, porcentaje de cubierta, geometría de visión y tipo de suelo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias al equipo de trabajo de QuantaLab (quantalab.ias.csic.es) por su ayuda en toda la labor de trabajo de campo. M.L. Guillén-Climent es beneficiaria de una beca predoctoral I3P del CSIC, cofinanciada por European Social Fund. Este estudio es financiado también por AGR-595 de la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa (Junta de Andalucía, España) y AGL2009-13105-C03-01 from MICINN.

REFERENCIAS

- ASRAR, G. *et al.* 1992. Spatial Heterogeneity in Vegetation Canopies and Remote Sensing of Absorbed Photosynthetically Active Radiation: A Modeling Study. *Remote Sensing of Environment*. 41:85-103.
- DAUGHTRY, C.S.T., *et al.* 1983. Spectral estimates of solar radiation by corn canopies, *Agron. J.* 75:527-531.
- GUILLEN-CLIMENT, M.L. *et al.* Estimating Radiation Interception using High Resolution Multispectral Imagery in row tree orchards. (enviado).
- HALL, F.G. *et al.* 1992. Satellite remote sensing of surface energy balance: success, failures, and unresolved issues in FIFE, *J. Geophys. Res.* 97, 19,061-19,089
- HUEMMRICH, K. F. 2001. The GeoSail model: a simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 75:423-431.
- LANG, A. R. G. 1987. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*. 41:186-179.
- MONTEITH, J. L. 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology* 68: 213-220.
- MORIONDO, M. *et al.* 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *Europ. J. Agronomy*. 26:266-274.
- MYNENI, R. B. *et al.* 1994. On the Relationships between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*. 49:200-211.
- NORTH P. R. J. 1996. Three dimensional forest light interaction model using Montecarlo method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 116(2):118-192.
- NORTH P. R. J. 2002. Estimation of f_{APAR} , LAI, and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*. 80: 114-121.
- PALMER, J. W. *et al.* 1977. Seasonal light interception and canopy development in hedgerow and bed system apple orchards. *Journal of Applied Ecology*. 14(2):539-549.
- ROSS, J. 1981. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. Dr.W. Junk Publisher, The Hague, The Netherlands. 391.
- SINOQUET, H. 1993. Modelling radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems. P. 229-252. En C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme and H. Sinoquet (ed.) Crop structure and light microclimate. INRA, París.
- VILLALOBOS F.J. *et al.* 1995. Non-destructive measurement of leaf area in olive (*Olea europaea* L.) trees using a gap inversion method. *Agricultural and Forest Meteorology*. 73:29-42.
- VILLALOBOS F.J. *et al.* 2002. Fitotecnia. Bases y Tecnologías de la Producción Agrícola. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 1-493.
- ZHANG, Q. *et al.* 2009. Can a satellite-derived estimate of the fraction of PAR absorbed by chlorophyll (FAPAR_{chl}) improve predictions of light-use efficiency and ecosystem photosynthesis for a boreal aspen forest? *Remote Sensing of Environment*. 113:880-888.

ZARCO-TEJADA, P.J. *et al.* 2005. Assessing Vineyard Condition with Hyperspectral Indices: Leaf and Canopy Reflectance Simulation in a

Row-Structured Discontinuous Canopy. *Remote Sensing of Environment*. 99:271-287.