

Un modelo de reflectividad bidireccional para simular imágenes de teledetección a una escala de 1 Km

F. J. García-Haro, F. Camacho-de Coca, J. Meliá y M. A. Gilabert
Correo electrónico: garciaja@uv.es
Departamento de Termodinámica. Facultat de Física. Universitat de València
C/ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia)

RESUMEN

Presentamos un modelo de reflectividad de cubiertas heterogéneas, que reproduce con gran realismo las firmas espectrales y angulares de las superficies naturales. El modelo caracteriza el BRDF de las superficies por medio de un conjunto de parámetros fundamentales tales como cobertura vegetal, distribución espacial, LAI, coeficiente de atenuación o propiedades ópticas, teniendo en cuenta los efectos no lineales en el interior de la misma. También parametriza la textura de la cubierta, la rugosidad del suelo, el relieve del terreno, y las condiciones atmosféricas. Los resultados indican que el modelo predice adecuadamente las características fundamentales de la BRDF, como concavidad y *hotspot*. Además, su eficiencia computacional y la robustez de los algoritmos posibilitan simular escenas realistas a varias escalas (por ejemplo regional) y datos hiper-espectrales.

PALABRAS CLAVE: simulación, BRDF, cubierta vegetal.

ABSTRACT

A model for light interaction has been developed to compute spectral and bidirectional reflectance from discontinuous canopies approximated by an arbitrary configuration of porous (partially-transmitting) plants. The model is influenced by parameters of canopy, such as LAI, coefficient of attenuation and leaves transmittance in order to compensate for errors due to multiple scattering in vegetation canopies that lead to non-linear mixing. Model also accounts for texture in canopy envelopes, and roughness and relief in surface background. The model predicts the basic features of the BRDF, i.e., bowl shape and the hotspot but unlike common models it is well suited to address the spectral and spatial domains, providing a fast and efficient strategy to derive hyperspectral images at appropriate spatial resolutions (eg. regional scale) over a wide range of ecosystems.

KEY WORDS: simulation, BRDF, canopy reflectance.

INTRODUCCIÓN

La reflectividad de las superficies naturales depende de la configuración de observación e iluminación. Por ello, la estimación de la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) está jugando un papel cada vez más activo en el estudio de la cobertura terrestre desde el espacio, con la aparición de sensores multiangulares como MISR (*Multi-Angle Imaging Spectro Radiometer*) o POLDER (*POLarization and Directionality of the Earth's Reflectance*). Por otro lado, el uso combinado de sensores, como los futuros SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible & InfraRed Imager*) a bordo del MSG (*Meteosat Second Generation*) y AVHRR-

3, a bordo de la EPS (*EUMETSAT Polar System*), nos permitirán aumentar el muestreo angular, y por lo tanto una mejor caracterización de la BRDF.

En este contexto, LandSAF (*Satellite Application Facility for Land Surface Analysis*) es un proyecto financiado por EUMETSAT que trata de determinar cuales son las posibilidades reales que la combinación de datos SEVIRI/MSG y AVHRR-3/EPS ofrecerá para el estudio de la superficie terrestre. Previamente a que estén disponibles estas imágenes, la modelización de escenarios realistas se presenta como una herramienta imprescindible para analizar el problema, permitiendo analizar las posibles ventajas que la información angular proporcionará para el estudio de superficies vegetales.

En las últimas décadas, se han desarrollado una gran variedad de modelos de reflectividad bidireccional de cubiertas vegetales (Goel 1988; Myneni et al., 1990; Leblanc et al., 1999), los cuáles varían en complejidad desde modelos geométricos sencillos hasta modelos complejos que describen todas las interacciones y procesos que tienen lugar en el medio. La mayoría de ellos corresponde a cubiertas homogéneas, mientras que los modelos de cubierta discontinua han recibido una atención escasa, debido a su complejidad.

En muchas aplicaciones, tales como en procedimientos de inversión o la evaluación de ecosistemas a escalas espaciales, temporales y direccionales diferentes se precisa de modelos suficientemente rápidos y al mismo tiempo realistas. Con dicho objetivo, hemos desarrollado un modelo híbrido que combina un modelo óptico geométrico (pues los mecanismos que gobiernan la BRDF están principalmente relacionados con el patrón de sombras vistas por el sensor) con una teoría promedio de la transmisión de la radiación, que tiene en cuenta efectos no lineales en el interior de la cubierta. Las plantas son idealizadas como objetos porosos, influenciados por parámetros estructurales como el LAI (*leaf area index*) y el coeficiente de extinción, o por la transmisividad de las hojas.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se trata de una extensión de modelos anteriores con mejoras muy significativas (García-Haro et al. 1997, Gilabert et al. 2000). El modelo se basa en principios óptico-geométricos pero usa una teoría promedio de la transmisión de la radiación para compensar los errores debidos a los efectos de dispersión múltiple que se producen en el interior de la cubierta. El modelo identifica tres componentes macroscópicas fundamentales: suelo, vegetación y elementos sombreados.

Visibilidad y brillo de los objetos

El modelo calcula, mediante métodos proyectivos altamente optimizados, una serie de parámetros geométricos. La Figura 1 resume las variables geométricas utilizadas.

Para cada celdilla (de tamaño 0.5-1m) en que se subdivide la escena, se traza un rayo desde el sensor al centro de la misma y se calcula la longitud de penetración en la cubierta, teniendo en cuenta que puede interceptar más de una planta (especialmente para ángulos grandes), la cuál permite parametrizar

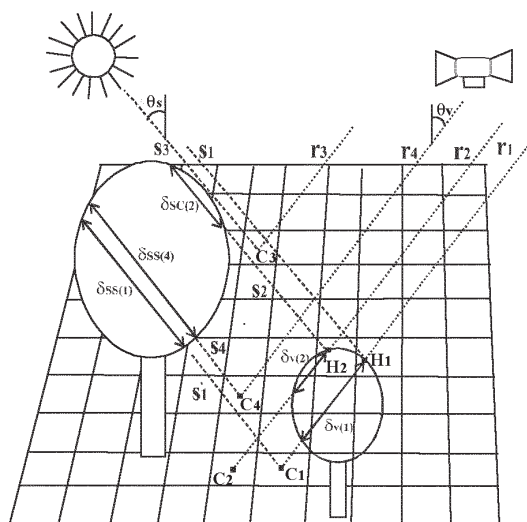


Figura 1. Representación del modelo geométrico para el cálculo del brillo y del patrón de sombras de los objetos.

la contribución del suelo en la señal. A continuación se proyecta un rayo desde la posición de la primera intercepción en dirección al sol, y se calcula nuevamente la longitud de penetración a lo largo de la trayectoria, con el fin de estimar la iluminación que recibe, y lo mismo se realiza para el centro de la celdilla, con el fin de estimar la iluminación del suelo de fondo.

Modelo de reflectividad

Un modelo de transferencia utiliza todos los parámetros geométricos, así como parámetros estructurales de las plantas individuales (LAI, opacidad) o propiedades ópticas de hojas y suelo, para calcular la signatura espectral de cada pixel. Así, el modelo caracteriza la BRDF de la cubierta a partir de variables conectadas con parámetros medibles y/o con significado físico (densidad de plantas, LAI, coeficiente de atenuación o propiedades ópticas), lo que facilita su interpretación e incluso su estimación mediante inversión.

Si consideramos únicamente la componente directa de la radiación, la reflectividad de una celdilla correspondiente a copa, R_p , se expresa como sigue:

$$R_p(\lambda) = R_\infty(\lambda) + [\rho_{\text{back}}(\lambda) - R_\infty(\lambda)] \cdot T_v \quad (1)$$

$$T_v = \exp(-k\delta_v \text{LAI}_v) \quad (2)$$

donde R_c es la reflectividad de saturación, es decir, el valor asintótico correspondiente a una planta con un LAI muy elevado, ρ_{back} es la reflectividad del suelo de fondo, δ_v es la penetración de la radiación o distancia recorrida por la radiación a través de la copa en la dirección del sensor (ver Figura 1), LAI_v es el LAI acumulado a lo largo de la distancia δ_v , y k es el coeficiente de extinción que describe la capacidad de los elementos de la cubierta para interceptar flujo de radiación.

T_v es la fracción de suelo visible, la cuál decrece de forma exponencial en función de dos parámetros estructurales de la cubierta, y representa la probabilidad de que un fotón atraviese la cubierta para un ángulo de observación dado θ_v . La variación espectral del coeficiente de atenuación la hemos expresado mediante una función decreciente de la transmitividad de las hojas:

$$k = k_o \tau^{-\kappa} \quad (3)$$

donde k_o y κ son constantes positivas.

De forma similar, las plantas vecinas producen una reducción de la irradiancia solar incidente sobre suelo y vegetación, que se expresa como una función exponencial del LAI acumulado en la dirección del sol. Así, se tiene en cuenta la penetración en todas aquellas plantas que interceptan la radiación solar.

Generación de imágenes

Primeramente, se calcula la signatura espectral de cada pixel, en el intervalo $[0.4, 2.5] \mu\text{m}$ y con resolución espectral de 5 nm. Finalmente, se aplica una convolución de las imágenes con las características espaciales (PSF) y filtros espectrales del sensor deseado. Las características de los sensores más comunes están implementados. Asimismo, el modelo permite especificar las direcciones de observación e iluminación para reproducir la repuesta de sensores multiangulares.

Características generales

Aunque no mostramos los detalles del cálculo, describimos brevemente las características fundamentales del modelo.

- Permite acomodar diferentes figuras geométricas y tamaños para representar árboles/arboles, así como sus densidades/distribuciones espaciales, ya sean éstas teóricas (estadísticas o regulares, como en plantaciones) o importadas de situaciones reales (mapas de usos de suelo o inventarios forestales).

- Utiliza un modelo de reflectividad no-Lambertiano para modelar la topografía del terreno, que se puede incorporar si se dispone de un modelo digital de terreno (MDT) del área de estudio, la rugosidad del suelo y la textura de la cubierta. Para simular éstos últimos el modelo ofrece al analista el uso de diferentes patrones estadísticos, obtenidos al dotar a una imagen de ruido de coherencia espacial. El modelo permite superponer dichos patrones con la superficie de los diferentes elementos del paisaje.
- Permite simular diferentes suelos de fondo a partir de mezclas de materiales (composición de suelos, rocas, hierba o agua) para reproducir casos reales.
- Parametriza los flujos de radiación incidentes, permitiendo especificar el modelo de atmósfera. La expresión del modelo incluye, además de la componente directa descrita anteriormente, la componente difusa de la radiación.
- Proporciona un marco ideal para analizar efectos de escala y reproduce con éxito las relaciones básicas entre reflectividad, cobertura y LAI.
- Su característica fundamental es la eficiencia computacional, que le permiten simular escenarios realistas a varias escalas, incluyendo grandes imágenes (escala regional) y datos hiper-espectrales. El modelo parece ser adecuado para representar cubiertas de matorral, áreas de cultivos y bosques de hoja caduca. Sin embargo, las ecuaciones del mismo son generales y permiten adaptar un número mayor de ecosistemas y condiciones diferentes.

RESULTADOS

El modelo nos ha servido para investigar la influencia de las variables fundamentales que afectan a la BRDF, tales como la cobertura vegetal, el LAI, la distribución espacial y de tamaños de las plantas, y las propiedades ópticas de las hojas y del suelo de fondo.

Investigación de efectos direccionales

Una adecuada interpretación y explotación de los datos de teledetección implica la correcta caracterización de las propiedades geométricas de la reflectividad, para lo cual se precisa disponer de un muestreo suficientemente fino de la BRDF para un

conjunto significativo de configuraciones geométricas. Hemos simulado un gran número de cubiertas, y variado los ángulos de iluminación/observación (ver ejemplos de transectos a lo largo del plano principal solar en la Figura 2).

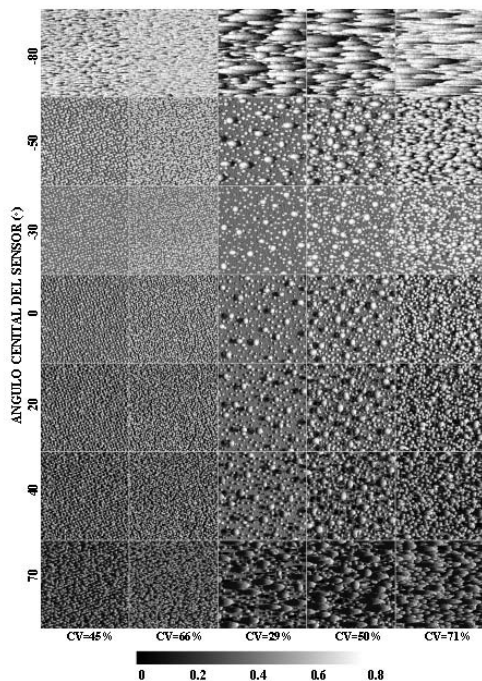


Figura 2. BRDF, en TM4, de varias escenas simuladas. El ángulo cenital solar, θ_s , es de 30° .

Las dos primeras columnas representan áreas arbustivas con una distribución espacial bastante aleatoria y con una cobertura variable. Las tres siguientes representan áreas forestales con una composición mixta de grandes árboles de hoja caduca y de matorral. El caso con cobertura del 29% podría representar una Dehesa (del centro y sur de España) con grandes espacios entre especies arbóreas (*Fagus silvatica*), que coexisten con especies subdominantes de arbusto bajo (*Quercus*). Para -30° no existen sombras y existe un máximo en la reflectividad.

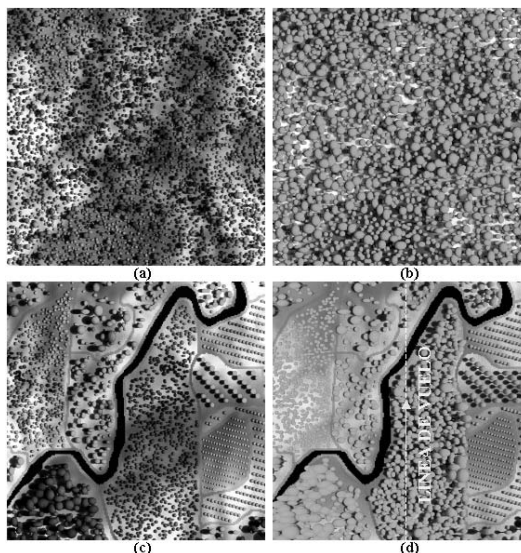
Además, el modelo nos ha permitido reproducir los efectos angulares dominantes, tales como el pico del *hotspot*, la forma cóncava (*bowl-shape*) ligeramente asimétrica, con valores mayores en la dirección de retro-dispersión (ángulos negativos), en que la proporción de sombras disminuye. La Figura 3 muestra algunos ejemplos en los que se aprecia la influencia específica del ángulo de iluminación y de

los factores ópticos y estructurales fundamentales en la signatura direccional de la cubierta.

Por ejemplo, el modelo nos ha permitido cuantificar la influencia en la BRDF de la forma de las plantas (las más alargadas proyectan más sombras), del LAI (cuanto menor es éste, las sombras son más atenuadas) y de la distribución espacial, que puede ocasionar ángulos privilegiados en plantaciones regulares.

Imágenes simuladas

La Figura 4 muestra varios ejemplos de imágenes simuladas.



* **Figura 4.** Falso color (R=TM3; G=TM4; B=TM5) de imágenes simuladas, caracterizadas por dimensiones de $500 \times 500 \text{m}$, resolución de 0.5m y $\theta_s = 30^\circ$.

El ejemplo (a) podría corresponder a un ecosistema pre-alpino, con una topografía acusada, grandes árboles y densidad alta de arbustos, el caso (b) a un clima húmedo, con grandes árboles de hojas anchas. Los casos (c) y (d) podrían corresponder a zona forestal Mediterránea, por su estratificación y variedad en usos de suelo. En la figura (c), la parcela central junto al río podría representar una plantación forestal joven, mientras que en la figura (d) representaría un estadio posterior de la mismas, tras un largo periodo de regeneración natural. En la figura (d) se aprecian efectos direccionales, pues hemos reproducido la adquisición desde un sensor situado a una altura baja (250m). Pueden apreciarse efectos angulares, ya que los extremos izquierdo y derecho de la imagen correspondien a un ángulos cenitales de observación de -45° y 45° , respectiva-

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

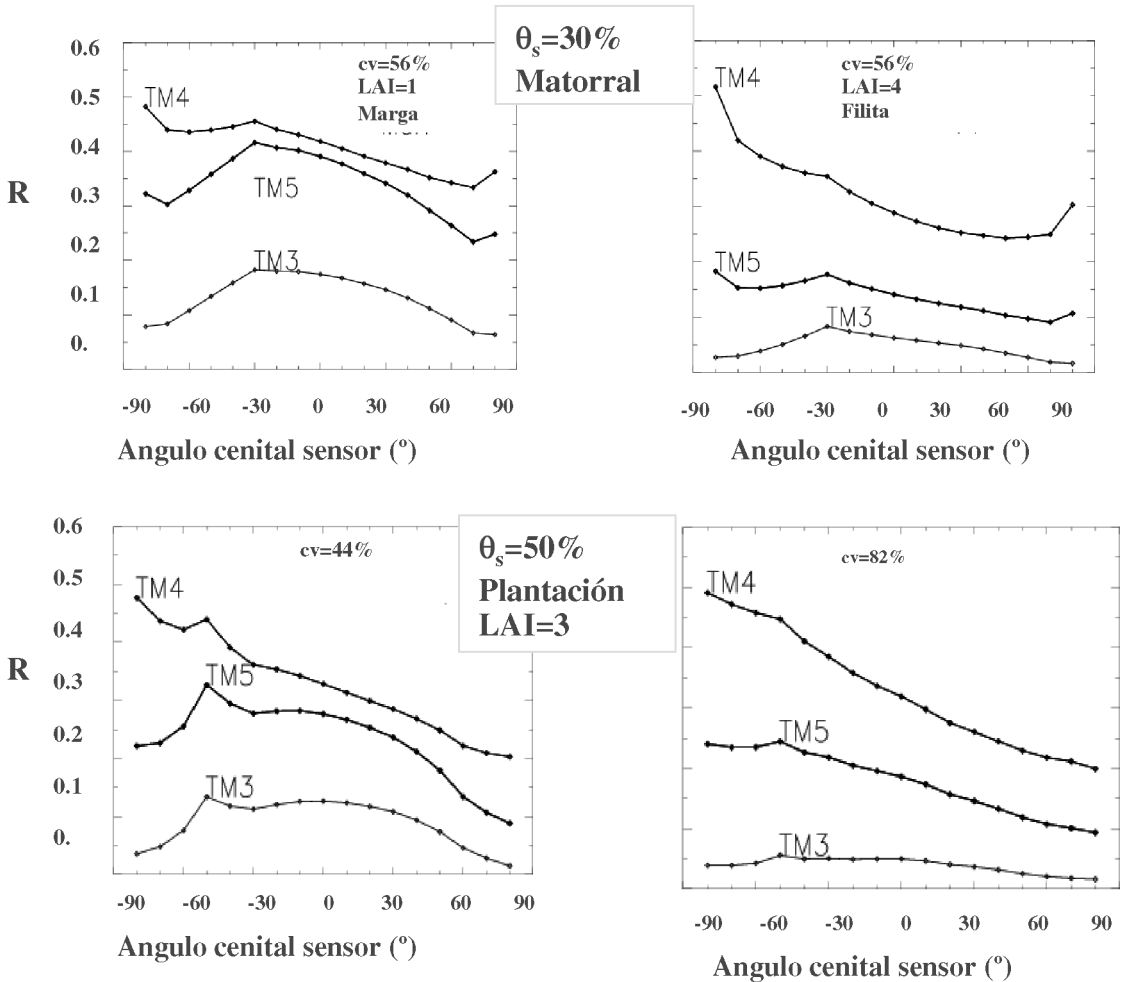


Figura 3. Signaturas direccionales en el plano principal, para tres regiones diferentes: TM3, TM4 y TM5. Arriba: área de vegetación natural con cobertura intermedia. Los ejemplos revelan la influencia del suelo de fondo y de la densidad foliar de las plantas. Abajo: bosque joven (plantación). Se ha considerado dos coberturas diferentes: intermedia (44%) y densa (82%). En ambos casos, el ángulo cenital solar es de 50°.

mente. Se observa que para ángulos negativos la proporción de sombras es menor (siendo nulas en la dirección del *hotspot*, -30°), y viceversa. También se puede observar como la proporción de suelo es mayor a lo largo de la línea de vuelo, y disminuye conforme nos alejamos de ésta, debido al aumento de la oclusión del suelo por parte de plantas.

CONCLUSIONES Y DIRECCIONES FUTURAS

El modelo de reflectividad de cubiertas heterogéneas que presentamos tiene en cuenta las propiedades biofísicas (FVC, LAI, dimensiones, distribución espacial, etc.) y ópticas dominantes de la

cubierta, y reproduce con éxito las relaciones básicas entre BRDF, cobertura y LAI. Una característica muy destacada del modelo es su capacidad para producir imágenes de cubiertas heterogéneas correspondientes a diferentes dominios (direccional, espectral y espacial) correspondientes a una gran variedad de ecosistemas.

Dada la gran flexibilidad del algoritmo propuesto, el modelo puede mejorarse con un incremento mínimo del cálculo para incorporar características anisotrópicas de la copa y del suelo, tales como expresar la dependencia con el ángulo de fase de la interacción de la radiación con la materia, o el efecto del *hotspot*, relacionado con la correlación entre las dirección de observación y de iluminación (Jacquemond et al. 1992; Hapke, 1993; Qin y Goel, 1995).

Asimismo, el modelo se validará de una forma más fina a partir de datos reales obtenidos por los sensores POLDER y HyMAP (proyecto DAISEX). En general, el modelo ha demostrado ser un banco de pruebas ideal para (i) generar imágenes realistas y paralelamente información apropiada a nivel del pixel para validar los algoritmos propuestos, (ii) controlar y parametrizar la influencia específica de los parámetros de interés, (iii) seleccionar la configuración espectral y angular óptima, (iv) corregir la influencia de la geometría de observación/iluminación con el fin de normalizar efectos angulares no deseados y (v) diseñar estrategias complementarias para la estimación de FVC y LAI mediante la inversión del modelo (proyecto LandSAF).

Así por ejemplo, la BRDF obtenida para los diferentes tipos de cubierta vegetal nos proporciona una información adicional a la del nadir (Camacho-de Coca *et al.*, 2001) que nos permitirá definir índices angulares, basados en la signatura angular del *hotspot*, directamente relacionados con la estructura de la cubierta vegetal (Breon *et al.*, 2001), corregir de los efectos de la anisotropía los índices de vegetación, mejorar clasificaciones o estimar con mayor precisión parámetros biofísicos como el LAI o la FAPAR (Bicheron y Leroy, 1999).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado mediante una beca post-doctoral de la Unión Europea, en el *Space Applications Institute* del *Joint Research Centre* (Ispra).

BIBLIOGRAFÍA

BICHERON, P. y LEROY, M. 1999. A Method of Biophysical Parameter Retrieval at Global Scale by Inversion of a Vegetation Reflectance Model. *Remote Sensing of Environment*. 67: 251-266.

- BREON, F. M., MAIGNAN, F., LEROY, M. y GRANT, I. 2001. A statistical analysis of Hot Spot directional signatures measured from space. *Proc. 8th Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*. Aussoi (Francia).
- CAMACHO-DE COCA, F., MARTINEZ, B., GILABERT, M. A. y MELIÁ, J. 2001. Reflectance Anisotropy Analysis of Homogeneous Canopies Using Laboratory and Hymap Airborne Data.
- OWE, M. y D'URSO, G. E. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology II. *Zilioli, Editors*. SPIE. V. 4171: 280-291.
- GARCÍA-HARO, F. J., GILABERT, M. A. y MELIÁ, J. 1997. Sensitivity study of vegetation related parameters by simulating reflectance scenes. *Proc 7th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*.
- GARCÍA-HARO, F. J. 1997. *Modelización y estimación de parámetros relacionados con la cubierta vegetal en teledetección*. Tesis doctoral. Universitat de València, 447 pp.
- GILABERT, M. A., GARCÍA-HARO, F. J. y MELIÁ, J. 2000. A mixture modeling approach for estimate vegetation parameters in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 72 (3): 328-345.
- GOEL, N. S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sens. Rev.* 4: 1-212.
- HAPKE, B. 1993. *Topics in remote sensing 3: theory of reflectance and emittance spectroscopy*. University of Pittsburg, New York. Cambridge University Press.
- JACQUEMOD, S., BARET, F. y HANOCQ, J. F. 1992. Modeling spectral and bi-directional soil reflectance. *Remote Sens. Environ.* 41:123-132.
- LEBLANC, S. G., BICHERON, P., CHEN, J. M., LEROY, M. y CIHLAR, J. 1999. Investigations of Directional Reflectance in Boreal Forests With an Improved Four-Scale Model and Airborne POLDER Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37: 1396-414.
- MYNENI, R. B., ROSS, J. K. y ASRAR, G. 1990. A review on the theory of photon transport in leaf canopies in slab geometry. *Agric. For. Meteorol.* 45: 1-153.
- QIN, W. y GOEL, N. S. 1995. An evaluation of hotspot models for vegetation canopies. *Remote Sens. Rev.* 13: 121-159.