

EVALUACIÓN DE UN MODELO DE LA BRDF A PARTIR DE SIMULACIONES CON MODELOS SEMI-EMPÍRICOS LINEALES (SEL)

Assessment of a BRDF Model through Simulations with Linear Semi-Empirical Models

Edgardo Rafael Medrano-Ruedaflores^{1‡}, Fernando Paz-Pellat¹, José Luis Orozco-Mota¹,
J. René Valdez-Lazalde¹ y Martín Bolaños-González¹

RESUMEN

Los modelos semi-empíricos lineales, también conocidos como modelos lineales basados en kernels, han sido utilizados con relativo éxito en la derivación de parámetros biofísicos de la vegetación a partir de imágenes satelitales. Su construcción se basa en hipótesis difíciles de corroborar y su calibración demanda suponer condiciones de homogeneidad en el sistema suelo-vegetación-atmósfera. Un modelo de la BRDF libre de estas limitaciones es evaluado en este estudio simulando el proceso de dispersión de la radiación solar según diferentes configuraciones de cobertura terrestre. Los datos fueron generados mediante la implementación de cuatro modelos lineales basados en kernels. Se evaluó el ajuste del modelo en cada escenario simulado a través de regresión lineal simple, obteniéndose valores del coeficiente de determinación superiores a 0.98. Los resultados sugieren que es posible utilizar el modelo evaluado en aplicaciones donde actualmente se emplean modelos semi-empíricos lineales.

Palabras clave: *geometría sol-sensor, imágenes satelitales, kernels.*

SUMMARY

Linear semi-empirical models, also known as linear kernel-driven models, have been used with some success to extract biophysical parameters of the vegetation from satellite imagery. They are based on assumptions difficult to corroborate and their calibration requires assuming that conditions of the soil-vegetation-atmosphere system are homogeneous. A BRDF model without this constraint is evaluated in this study by simulating the scattering

process of incoming solar radiation according to different land cover configurations. Data were generated through the implementation of four linear kernel-driven models. The response of the model proposed for each scenario was assessed by means of a single linear regression, obtaining determination coefficient values above 0.98. Our results suggest that is possible to use the model evaluated on those applications where linear semi-empirical models are currently used.

Index words: *sun-sensor geometry, satellite imagery, kernels.*

INTRODUCCIÓN

Los sensores remotos a bordo de plataformas satelitales ofrecen la posibilidad de monitorear los procesos que ocurren en el sistema Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVA). Dos aplicaciones importantes de esta tecnología son: la derivación de parámetros estructurales de la vegetación, como la altura y cobertura del dosel, de acuerdo con Wang *et al.* (2011), y la investigación de nuevos esquemas para mejorar la clasificación de la cobertura terrestre (Jiao *et al.*, 2011). Hill *et al.* (2008), refieren que los datos colectados por esta clase de instrumentos son un importante insumo para modelos que caracterizan el ciclo del carbono en ecosistemas terrestres, ya que permiten determinar, en forma aproximada, las propiedades ópticas y estructurales de la vegetación (Román *et al.*, 2011). Sin embargo, previo a su utilización, es necesario considerar las perturbaciones inducidas por la atmósfera y la geometría sol-sensor en ellos (Pokrovsky y Roujean, 2002).

En este trabajo se discute el tratamiento a los efectos inducidos por la geometría sol-sensor en imágenes satelitales. Los efectos angulares pueden representar un componente de ruido en los datos cuando se analizan observaciones multi-temporales provenientes de sensores como el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) o el MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (edgar2303@gmail.com)

(MODIS), los cuales poseen un intervalo angular de observación de aproximadamente $\pm 55^\circ$; en tales casos es necesario estandarizar a una geometría sol-sensor determinada (Roujean *et al.*, 1992). Por otro lado, el muestreo angular alcanzado por estos instrumentos se puede utilizar para inferir las propiedades anisotrópicas y estructurales de los objetos sobre la superficie (Pokrovsky y Roujean, 2002). Un ejemplo de esta segunda aproximación es el trabajo de Jiao *et al.* (2011), quienes investigaron la capacidad de los efectos angulares para mejorar los sistemas de clasificación terrestre utilizando firmas espectrales y angulares a partir de datos colectados por el sensor MODIS.

El tratamiento de las distorsiones asociadas a la geometría sol-sensor en imágenes satelitales se realiza mediante el desarrollo de modelos que intentan describir las interacciones de la energía solar con la superficie terrestre y la atmósfera. Estos modelos representan aproximaciones a la Función de Distribución de la Reflectancia Bidireccional (*BRDF*, por sus siglas en inglés) (Li *et al.*, 1997; Maignan *et al.*, 2004). La complejidad del modelo dependerá del enfoque elegido por el investigador para caracterizar el fenómeno de interés (por ejemplo: dispersión de la radiación solar que incide sobre un dosel de vegetación). Li *et al.* (1996), mencionan que estos modelos pueden ser clasificados en empíricos, físicos y semi-empíricos. Los modelos empíricos son funciones matemáticas que muestran un buen ajuste a los datos observados, son relativamente sencillos de desarrollar, pero sus parámetros carecen de significado en términos de los procesos físicos que caracterizan; los modelos físicos se formulan en función de la perspectiva que se adopte para describir la dispersión de la radiación solar que interactúa con el sistema SVA. Dos paradigmas sobresalen por los trabajos realizados basados en ellos: el concepto de medio turbio en teoría de transferencia radiativa, propuesta por Ross (1981), y la geometría de rayos paralelos para describir la propagación de la radiación en óptica geométrica (Li y Strahler, 1986). Si se considera el primero, entonces la superficie observada es modelada como una o más capas paralelas de extensión infinita en donde los elementos dispersores son de un tamaño infinitesimal y están orientados aleatoriamente a lo largo de cada capa. La señal captada por el sensor es producto de las interacciones, simples o múltiples, de cada fotón con los elementos dispersores, por lo tanto depende de parámetros estructurales como el Índice de

Área Foliar (IAF) y de parámetros radiométricos como la reflectancia del suelo y la reflectancia y transmitancia de las hojas. Por otro lado, si se opta por el segundo paradigma, se considera un conjunto de objetos geométricos (por ejemplo conos) colocados de forma aleatoria sobre la superficie observada, de manera tal, que pueden traslaparse o pueden existir huecos de diversos tamaños entre ellos, dejando al descubierto porciones de suelo. En este caso, la señal captada por el sensor depende de los parámetros que caracterizan a cada objeto de manera individual (por ejemplo la altura y el ángulo del ápice para el caso de conos), de la densidad de objetos sobre la superficie, del ángulo de iluminación y de la reflectancia relativa de los objetos geométricos y de la superficie sobre la cual están colocados, tanto en condiciones de sombreado como de iluminación directa (Li y Strahler, 1985). La principal ventaja de utilizar modelos físicos es que describen el proceso de dispersión de la radiación incidente en forma explícita, por lo que es posible determinar información sobre las propiedades ópticas y la estructura geométrica de los objetos sobre la superficie, sin embargo, a menudo no son invertibles analíticamente y requieren información externa sobre el tipo de cobertura observada, con lo cual su uso en aplicaciones operacionales se dificulta (Wanner *et al.*, 1995; Hu *et al.*, 1997). Finalmente, los modelos semi-empíricos, o modelos basados en kernels, pueden ser considerados como aproximaciones a los físicos; son matemáticamente más simples que éstos, pero conservan sus características más importantes (es decir, los parámetros asociados al modelo son utilizados como un indicador de propiedades ópticas y estructurales de la vegetación). En el contexto de aplicaciones que requieren el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes satelitales, esta clase de modelos supera a las otras dos por al menos tres razones: (1) son mucho más rápidos de calcular que los modelos completamente físicos; (2) requieren solo un número limitado de observaciones para ser invertibles (menos observaciones que los empíricos) y (3) en caso de ser lineales pueden ser invertidos analíticamente (Wanner *et al.*, 1995).

Bolaños *et al.* (2007), propusieron un enfoque diferente para caracterizar los efectos de la geometría sol-sensor sobre las coberturas terrestres. Los autores argumentan que el tratamiento de los efectos angulares bajo las aproximaciones antes discutidas implica suponer condiciones de homogeneidad en el sistema SVA, lo cual no necesariamente se cumple, en especial durante

el período de crecimiento de la vegetación, por lo tanto, proponen diseñar estrategias de modelación simples basadas en los patrones de la geometría sol-sensor. Su trabajo se centra en la introducción de una variable de posición relativa que hace simétricos los patrones de variación de las reflectancias en el plano principal (esto es que la diferencia de ángulos acimutales es igual a cero) con respecto al punto donde el ángulo de visión y de iluminación coinciden (*hot spot*). Inicialmente utilizaron planos de simetría diferentes para las bandas del rojo y del infrarrojo cercano, más adelante desarrollaron un modelo general que estandariza los efectos de la geometría sol-sensor para todas las bandas en la región del espectro electromagnético comprendidas entre el visible y el infrarrojo (Bolaños y Paz, 2010). La principal ventaja de este enfoque consiste en que solo requiere información conocida (geometría sol-sensor y valor de reflectancia, un dato único) en cada punto de la imagen, por lo que no depende de hipótesis sobre las condiciones del sistema SVA. Ambas propuestas fueron validadas utilizando bases de datos nacionales e internacionales de experimentos en campo diseñados para caracterizar los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación.

En el presente trabajo se describe una evaluación del modelo Uni-Paramétrico de la BRDF (UPB) propuesto por Bolaños y Paz (2010), el objetivo fue explorar la capacidad de éste para responder a distintos escenarios de cobertura vegetal simulados mediante el uso de modelos Semi-Empíricos Lineales (SEL). Esta clase de modelos son utilizados actualmente en conjunto con datos provenientes de sensores remotos espaciales para la estimación de parámetros biofísicos y estructurales de la vegetación, sin embargo, presentan ciertas limitaciones que podrían ser superadas mediante el uso del modelo UPB. El estudio se realizó partiendo de cuatro kernels discutidos por Wanner *et al.* (1995): dos basados en la teoría de transferencia radiativa (Ross-Thin y Ross-Thick) y dos más basados en la teoría de óptica geométrica (Li-Sparse y Li-Dense).

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelos Semi-Empíricos Lineales

Los modelos SEL postulan que la señal registrada por un sensor a bordo de una plataforma satelital está constituida por tres elementos: un componente isotrópico, uno geométrico y uno volumétrico. Su construcción se

basa en kernels, los cuales son expresiones matemáticas que dependen exclusivamente de la geometría sol-sensor, y en factores que incluyen información sobre las propiedades ópticas y estructurales de la superficie bajo consideración. Estos modelos fueron desarrollados con la intención de producir estimaciones de albedo y otros parámetros biofísicos en tiempo cuasi-real a partir de imágenes satelitales con resolución espacial entre los 250 y los 1000 m, su estructura genérica es la siguiente (Wanner *et al.*, 1995):

$$R = f_{iso} + f_{geo}k_{geo} + f_{vol}k_{vol} \quad (1)$$

donde: R representa la reflectancia medida por el sensor, la cual es producto de las contribuciones isotrópica (f_{iso}) geométrica (f_{geo}) y volumétrica (f_{vol}) en el proceso de dispersión de la radiación solar incidente. k_{geo} y k_{vol} representan, respectivamente, un kernel derivado a través de óptica geométrica y uno obtenido a través de teoría de transferencia radiativa. Los factores f permiten diferenciar la contribución de cada componente en el proceso de dispersión.

Kernel Ross-Thick. Bajo el enfoque de la teoría de transferencia radiativa, en una aproximación de dispersión simple, este kernel describe las interacciones de la energía solar que incide sobre un dosel horizontal homogéneo y denso ($IAF \gg 1$). Su expresión matemática es la siguiente:

$$R_{thick} = c_1 k_{thick} + c_2 \quad (2)$$

$$k_{thick} = \frac{(\frac{\pi}{2} - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} - \frac{\pi}{4}$$

$$c_1 = \frac{4s}{3\pi} (1 - \exp\{-IAF * B\})$$

$$c_2 = \frac{s}{3} + \exp\{-IAF * B\} \left(\rho_0 - \frac{s}{3} \right)$$

donde: R_{thick} representa el valor de la reflectancia bidireccional de acuerdo con la aproximación planteada; θ_s es el ángulo cenital de iluminación y θ_v el ángulo cenital de visión; ξ representa el ángulo de fase entre las direcciones de iluminación y de visión; IAF es el índice de área foliar, s la reflectancia de las hojas; ρ_0

la reflectancia Lambertiana de la superficie y $B = \frac{1}{2} (\sec \theta_s + \sec \theta_v)$ es sustituido por un valor promedio, alrededor de 1.5, debido a que el valor del índice de área foliar domina el argumento de la función exponencial en c_1 (Wanner *et al.*, 1995).

Kernel Ross-Thin. Este kernel fue desarrollado por Wanner *et al.* (1995). Describe las interacciones de la radiación incidente sobre un dosel con aperturas entre sus componentes de tal manera que los fotones viajan hasta la capa inferior para ser absorbidos por este medio o sufrir interacciones múltiples y ser irradiados hacia el sensor de manera isotrópica ($IAF \ll 1$).

$$R_{thin} = c_1 k_{thin} + c_2 \quad (3)$$

$$k_{thin} = \frac{(\frac{\pi}{2} - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_s \cos \theta_v} - \frac{\pi}{2}$$

$$c_1 = \frac{2sIAF}{3\pi}$$

$$c_2 = \frac{sIAF}{3} + \rho_l$$

donde: ρ_l representa la reflectancia Lambertiana promedio de la capa debajo del dosel.

Kernel Li-Sparse. Este kernel describe el campo de radiación medido por un sensor en función de las características geométricas de los objetos sobre la superficie (por ejemplo, esferoides) y de las distintas configuraciones bajo las cuales estos objetos son iluminados y observados. En su construcción se asume que no existe sombreado mutuo entre doseles. Su formulación es la siguiente:

$$R_{sparse} = c_1 k_{sparse} + c_2 \quad (4)$$

$$k_{sparse} = O(\theta_s, \theta_v, \phi) - \sec \theta_s - \sec \theta_v + \frac{1}{2} (1 + \cos \xi') \sec \theta_v'$$

$$O = \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec \theta_s' + \sec \theta_v')$$

$$\cos t = \frac{h (D^2 + (\tan \theta_s' \tan \theta_v' \sin \phi)^2)^{1/2}}{b \sec \theta_s' + \sec \theta_v'}$$

$$D = (\tan^2 \theta_s' + \tan^2 \theta_v' - 2 \tan \theta_s' \tan \theta_v' \cos \phi)^{1/2}$$

$$\cos \xi' = \cos \theta_s' \cos \theta_v' + \sin \theta_s' \sin \theta_v' \cos \phi$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{b}{r} \tan \theta \right)$$

$$c_1 = C \lambda \pi r^2$$

$$c_2 = C$$

donde: t es un parámetro que permite expresar la ecuación de la elipse (proyección del dosel sobre la superficie) en forma paramétrica; b es el semi-eje mayor y h es la distancia desde el centro del esferoide hasta el suelo. θ' es una transformación que permite tratar los esferoides (dosel de los árboles) como esferas, r es el radio de dichas esferas, C es la reflectancia de la porción iluminada del dosel, λ es la densidad de individuos presentes en la escena por unidad de área y ϕ es el acimut relativo entre las direcciones de iluminación y visión.

Kernel Li-Dense. Al igual que los dos anteriores, este kernel fue desarrollado por Wanner *et al.* (1995), quienes propusieron una serie de modelos SEL basados en estos kernels para ser utilizados en la generación de estimaciones de albedo a partir de los datos colectados con el sensor MODIS. Los principios de su derivación consideran la posibilidad de sombreado mutuo. Su estructura matemática es la siguiente:

$$R_{dense} = c_1 k_{dense} + c_2 \quad (5)$$

$$k_{dense} = \frac{(1 + \cos \xi') \sec \theta_v'}{\sec \theta_v' + \sec \theta_s' - O(\theta_s', \theta_v')} - 2$$

$$O = \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec \theta_s' + \sec \theta_v')$$

$$\cos t = \frac{h (D^2 + (\tan \theta_s' \tan \theta_v' \sin \phi)^2)^{1/2}}{b \sec \theta_s' + \sec \theta_v'}$$

$$D = (\tan^2 \theta_s' + \tan^2 \theta_v' - 2 \tan \theta_s' \tan \theta_v' \cos \phi)^{1/2}$$

$$\cos \xi' = \cos \theta_s' \cos \theta_v' + \sin \theta_s' \sin \theta_v' \cos \phi$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{b}{r} \tan \theta \right)$$

$$c_1 = \frac{C}{2}$$

$$c_2 = C$$

Los kernels Li-Sparse y Li-Dense representan en realidad una familia de kernels; diferentes combinaciones de valores para los parámetros b/r y h/b originan una respuesta distinta para los valores de reflectancia. Cuatro combinaciones son las más comunes: (1) $b/r = 2.5$ y $h/b = 2.5$ para designar individuos altos cuyo dosel puede ser aproximado como un elipsoide con semi-eje mayor orientado verticalmente (prolato); (2) $b/r = 0.75$ y $h/b = 2.5$ individuos altos con un dosel que puede ser modelado como un elipsoide cuyo semi-eje mayor está orientado horizontalmente (oblato); (3) $b/r = 2.5$ y $h/b = 1.5$ para designar individuos prolotos de baja estatura y, (4) $b/r = 0.75$ y $h/b = 1.5$ lo cual representa individuos oblatos de baja estatura (Wanner *et al.*, 1995).

Los factores isotrópico, geométrico y volumétrico de los cuatro modelos SEL utilizados en este estudio se muestran en el Cuadro 1. Para todos los modelos, α representa la proporción de cobertura que caracteriza a la componente geométrica y la proporción correspondiente a la componente volumétrica ($1 - \alpha$). Los kernels presentados y su combinación para formar modelos SEL, describen distintas configuraciones del subsistema suelo-vegetación y la respuesta de éste ante la radiación solar incidente. El kernel Ross-Thick fue construido considerando un dosel ópticamente denso (es decir $IAF \gg 1$) mientras que el Ross-Thin fue derivado pensando en el escenario opuesto ($IAF \ll 1$); de manera similar, el kernel Li-Sparse caracteriza un bosque donde los individuos están suficientemente separados entre sí, de tal forma que sus doseles no se traslapan ($\lambda < 1$), en tanto que el Li-Dense parte del supuesto contrario ($\lambda > 1$), en el caso de estos últimos kernels, es posible determinar la forma del dosel y la altura de los individuos ajustando los parámetros b/r y h/b .

Modelo Uni-Paramétrico de la BRDF (UPB)

Tomando como base la simetría sugerida por el *hot spot* cuando se analiza el comportamiento de las reflectancias en el plano principal, como función del ángulo de visión (Figura 1), Bolaños y Paz (2010) proponen un modelo para normalizar la geometría sol-sensor en las bandas contenidas entre las porciones visible e infrarrojo del espectro electromagnético. El planteamiento del modelo parte de la geometría sol-sensor y de la introducción de una variable de posición relativa que depende del ángulo cenital de visión (θ_v) y del ángulo cenital de iluminación (θ_s). Los dos puntos señalados en la Figura 1, el *hot spot* (HS) y el *dark spot* (DS), permiten definir la expresión matemática para la variable de posición relativa. El HS se presenta cuando la radiación es dispersada en el mismo ángulo desde el cual fue irradiada, mientras que el DS ocurre a 90° del HS.

La formulación del modelo es la siguiente:

$$x = 90 - \theta_v + \theta_s \tag{6}$$

$$R_n = \ln(R) * \cos(X)$$

$$X = 90 + gR_n$$

donde: R representa la reflectancia de cualquier banda en la porción del espectro comprendida entre el visible y el infrarrojo, R_n es el valor normalizado para la banda R y g es la pendiente del patrón lineal que forman las reflectancias normalizadas en el espacio conformado por χ y R_n .

Cuadro 1. Expresiones matemáticas de los factores utilizados en las simulaciones.

Factores	Modelos			
	Ross-Thin + Li-Sparse	Ross-Thin + Li-Dense	Ross-Thick + Li-Sparse	Ross-Thick + Li-Dense
Isotrópicos	$\alpha C + (1 - \alpha) \left(\frac{sIAF}{3} + \rho_l \right)$		$\alpha C + (1 - \alpha) \left(\frac{s}{3} + \exp\{-IAF * B\} \left(\rho_0 - \frac{s}{3} \right) \right)$	
Volumétricos	$(1 - \alpha) \frac{2sIAF}{3\pi}$		$(1 - \alpha) \frac{4s}{3\pi} (1 - \exp\{-IAF * B\})$	
Geométricos	$\alpha C \lambda \pi r^2$	$\alpha \frac{C}{2}$	$\alpha C \lambda \pi r^2$	$\alpha \frac{C}{2}$

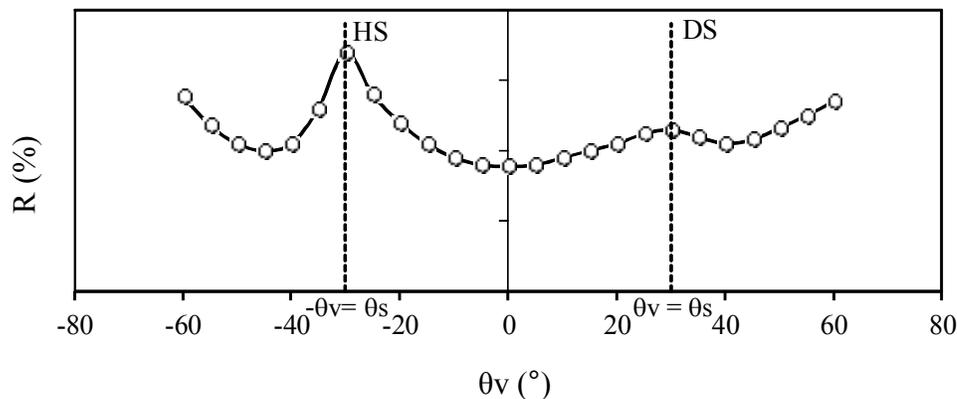


Figura 1. Variación de la reflectancia con el ángulo de observación (θ_v) en el plano principal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del Modelo Uni-Paramétrico de la BRDF

Se evaluó el desempeño del modelo UPB en relación a escenarios simulados mediante modelos SEL, cada uno de los modelos discutidos fue implementado y se realizaron simulaciones proponiendo valores para los parámetros involucrados en los factores isotrópico, geométrico y volumétrico de cada modelo. Los escenarios fueron simulados considerando tres ángulos de iluminación distintos (0° , 30° y 60°) en un rango de visión comprendido entre los 0° y los 60° a la izquierda y derecha de nadir. Esta configuración de la geometría sol-sensor fue analizada tanto en el plano principal como en el ortogonal (es decir, diferencia de ángulos acimutales igual a 90°). Un enfoque similar de análisis fue presentado por Lucht (1998), quien simuló mediciones de los sensores MODIS y MISR (aún no estaban operacionales), utilizando un modelo físico (Myneni *et al.*, 1992). Posteriormente invirtió los datos así generados utilizando modelos SEL para evaluar la precisión que se

podía alcanzar en estimaciones de reflectancia bidireccional y albedo a partir del muestreo angular ofrecido por estos instrumentos.

Los valores de reflectancia generados con cada modelo SEL a partir de la Ecuación 1, junto con la geometría asociada, fueron utilizados como insumo para el modelo UPB. El ajuste de este modelo mediante regresión lineal simple fue evaluado a través del coeficiente de determinación.

Un primer conjunto de valores utilizados para simular escenarios se muestran en el Cuadro 2. Los valores asignados a cada parámetro fueron elegidos de tal forma que representaron los supuestos implicados en la derivación de cada kernel y de cada modelo en su conjunto. Por ejemplo, si se considera el modelo Ross-Thick y Li-Dense, entonces el escenario simulado estará constituido por una superficie cubierta con un gran número de árboles de dosel cerrado, por lo tanto, la contribución de la superficie debajo del dosel a la reflectancia total de la escena será mucho menor ($\rho_0 = 0.3$) que la correspondiente al dosel en sí ($IAF = 6.0$; $s = 0.7$; $C = 0.7$).

Cuadro 2. Valores utilizados en la simulación de escenarios.

Modelos	Parámetros										
	IAF	s	ρ_l	ρ_0	C	λ	r	α	$(1-\alpha)$	b/r	h/b
Ross-Thin + Li-Sparse	0.1	0.4	0.6	--	0.4	0.2	1	0.5	0.5	0.75	1.5
Ross-Thin + Li-Dense	0.1	0.7	0.3	--	0.7	--	--	0.5	0.5	0.75	1.5
Ross-Thick + Li-Sparse	6	0.7	--	0.3	0.7	0.2	1	0.5	0.5	0.75	1.5
Ross-Thick + Li-Dense	6	0.7	--	0.3	0.7	--	--	0.5	0.5	0.75	1.5

IAF = índice de área foliar; s = reflectancia de las hojas; ρ_l = reflectancia Lambertiana promedio de la capa debajo del dosel; ρ_0 = reflectancia Lambertiana de la superficie; C = reflectancia de la porción iluminada del dosel; λ = densidad de individuos presentes en la escena por unidad de área; r = radio de las esferas que idealizan los doseles de los individuos; α = proporción de cobertura que caracteriza a la componente geométrica; $(1-\alpha)$ = proporción de cobertura que caracteriza a la componente volumétrica; b/r y h/b = proporciones geométricas para designar individuos con dosel oblató o prolato.

Por otro lado, las proporciones b/r y h/b fueron escogidas de tal manera que representaran individuos de dosel oblatos y baja altura; el radio de las esferas que aproximan el dosel de los árboles (r) fue asumido como unitario. Finalmente, se asignó igual peso a las componentes geométricas y volumétricas de cada modelo ($\alpha = 1 - \alpha = 0.5$).

Un mayor número de escenarios fueron simulados al considerar variaciones en los parámetros ópticos y estructurales de cada modelo SEL. Los valores asignados a las propiedades ópticas representan el comportamiento dispersor en las bandas del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC), mientras que los estructurales varían configurando distintos niveles de cobertura. Los escenarios fueron construidos al combinar cada uno de los tres valores enlistados en el Cuadro 3 para los parámetros que se encuentran en el Cuadro 2.

Como se ha mostrado, existen diversas aproximaciones al tratamiento de los efectos angulares en la señal captada por un sensor remoto espacial, cada una con fortalezas y debilidades. En el caso de los modelos SEL, los cuales han sido utilizados con relativo éxito en la generación de productos a partir de imágenes satelitales (por ejemplo estimaciones de albedo a escala

global), aún quedan preguntas fundamentales sin resolver, entre otras cosas, no se ha establecido un marco teórico que justifique el desarrollo de la BRDF en kernels (Pokrovsky y Roujean, 2002). Además, esta clase de modelos requieren información captada con diferente geometría sol-sensor para ser calibrados, por tanto, utilizan imágenes acumuladas en un periodo de 10 a 16 días (Huete *et al.*, 1999). Este enfoque implica suponer condiciones de homogeneidad en el sistema SVA (Bolaños *et al.*, 2007). Finalmente, mientras que Barnsley *et al.* (1997) encontraron que la componente direccional en datos multi-angulares provee un importante medio de discriminación para ciertos tipos de cobertura, Bacour y Bréon (2005) mencionan que diferentes tipos de coberturas terrestres presentan patrones angulares altamente semejantes, lo cual atribuyen a la correlación que existe entre los factores geométricos y volumétricos de los modelos SEL utilizados en su estudio.

Las gráficas a, c y e en las Figuras de la 2 a la 5 muestran los escenarios que describen el comportamiento de cada modelo SEL bajo las condiciones impuestas por los parámetros presentados en el Cuadro 2 y las variaciones de la geometría sol-sensor; en el eje de las abscisas se muestra

Cuadro 3. Dispersión simulada en las bandas R e IRC considerando distintos niveles de cobertura.

Parámetros	Modelos			
	Ross-Thin + Li-Sparse	Ross-Thin + Li-Dense	Ross-Thick + Li-Sparse	Ross-Thick + Li-Dense
S_r	0.05, 0.07, 0.09	0.06, 0.08, 0.1	0.04, 0.06, 0.08	0.05, 0.07, 0.09
C_r	0.03, 0.06, 0.09	0.03, 0.06, 0.09	0.025, 0.045, 0.065	0.02, 0.04, 0.06
ρ_{0r}	--	--	0.05, 0.07, 0.09	0.03, 0.05, 0.07
ρ_{lr}	0.04, 0.06, 0.08	0.05, 0.07, 0.09	--	--
λ	0.5, 0.7, 0.9	--	0.5, 0.7, 0.9	--
IAF	0.4, 0.6, 0.8	0.3, 0.6, 0.9	4.0, 6.0, 8.0	4.0, 6.0, 8.0
r	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7
b/r	0.3, 0.5, 0.7	0.75, 1.0, 1.25	0.75, 1.0, 1.25	0.75, 1.0, 1.25
h/b	0.5, 0.7, 0.9	1.0, 1.25, 1.5	1.0, 1.25, 1.5	1.0, 1.25, 1.5
α	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7
$(1 - \alpha)$	0.7, 0.5, 0.3	0.7, 0.5, 0.3	0.7, 0.5, 0.3	0.7, 0.5, 0.3
S_{irc}	0.4, 0.55, 0.7	0.35, 0.55, 0.75	0.45, 0.7, 0.95	0.45, 0.7, 0.95
C_{irc}	0.15, 0.30, 0.45	0.20, 0.35, 0.50	0.35, 0.50, 0.65	0.23, 0.53, 0.83
ρ_{0irc}	--	--	0.1, 0.2, 0.3	0.1, 0.2, 0.3
ρ_{lirc}	0.1, 0.2, 0.3	0.1, 0.2, 0.3	--	--

IAF = índice de área foliar; s = reflectancia de las hojas; ρ_s = reflectancia Lambertiana promedio de la capa debajo del dosel; ρ_0 = reflectancia Lambertiana de la superficie; C = reflectancia de la porción iluminada del dosel; λ = densidad de individuos presentes en la escena por unidad de área; r = radio de las esferas que idealizan los doseles de los individuos; α = proporción de cobertura que caracteriza a la componente geométrica; $(1 - \alpha)$ = proporción de cobertura que caracteriza a la componente volumétrica; b/r y h/b = proporciones geométricas para designar individuos con dosel oblatos o prolatos. Los sub-índices r e irc se refieren a las bandas en la porción del rojo y del infrarrojo cercano del espectro electromagnético, respectivamente.

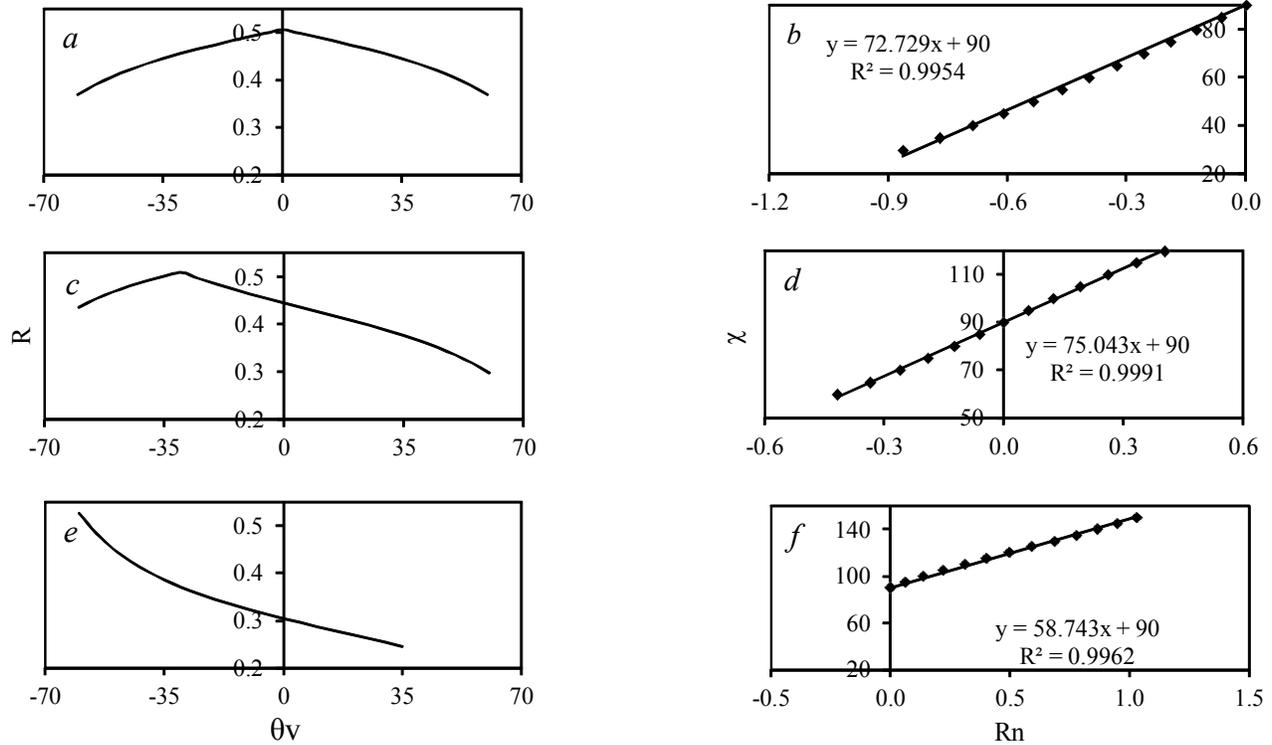


Figura 2. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thin y Li-Sparse y ajuste correspondiente del modelo UPB.

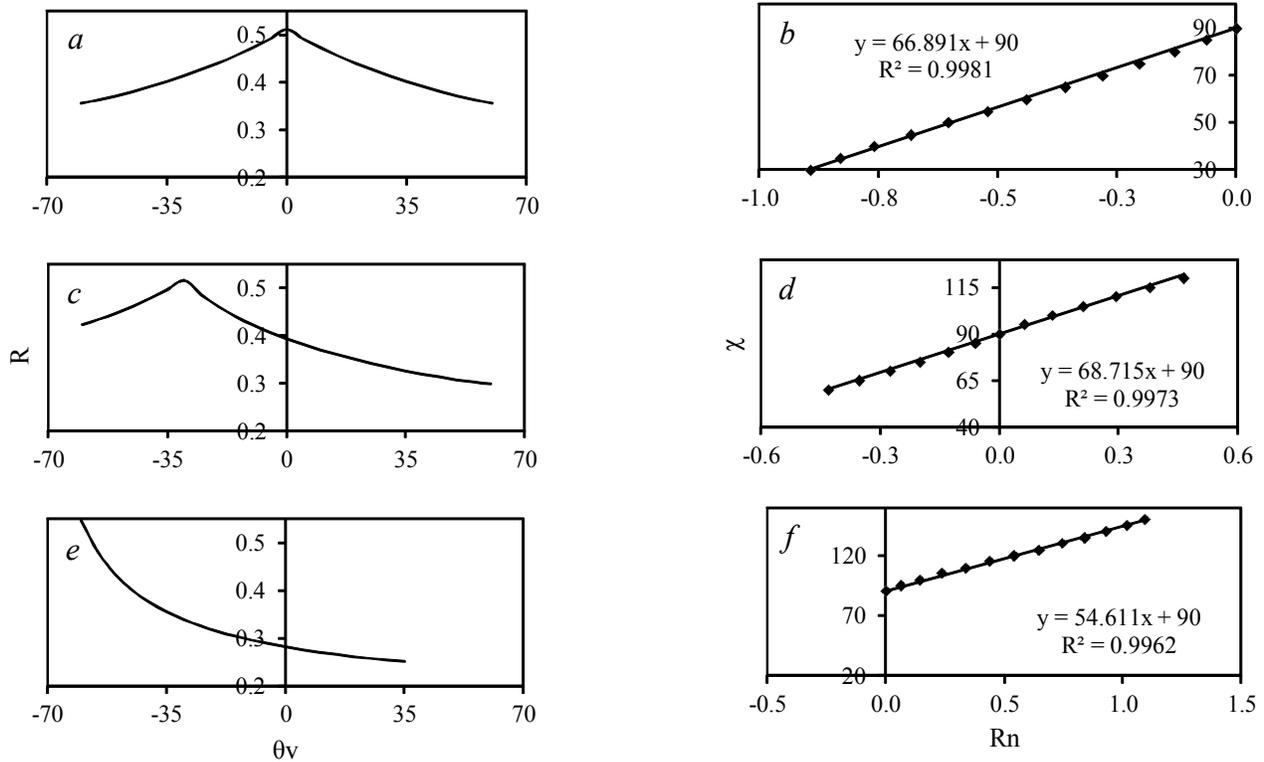


Figura 3. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thin y Li-Dense y ajuste correspondiente del modelo UPB.

la variación del ángulo cenital de visión (θ_v) mientras que en el eje de las ordenadas el valor de reflectancia (R). La gráfica a corresponde a un ángulo cenital de iluminación igual a 0° ; la gráfica c representa una iluminación a 30° y la gráfica e a 60° .

En cada figura se observa que el máximo valor de reflectancia ocurre cuando el ángulo cenital de iluminación coincide con el cenital de visión (efecto *hot spot*), después, este valor disminuye a medida que el ángulo de visión aumenta. Este comportamiento se debe a que el proceso de dispersión en óptica geométrica es regulado por la presencia de sombras en la escena, éstas aparecen a medida que el ángulo de visión se aleja del ángulo de iluminación. En transferencia radiativa ocurre lo contrario; el ángulo de fase entre las direcciones de iluminación y visión modula la cantidad de energía dispersada, la cual disminuye de acuerdo con un coeficiente de extinción. El efecto combinado de los comportamientos descritos es el responsable de lo que se aprecia en las gráficas a, c y e de la Figura 2 a la Figura 5. Nótese que, en los modelos donde interviene el kernel Li-Dense, el descenso en el valor de

reflectancia es más abrupto que en aquellos donde aparece el kernel Li-Sparse, esto puede ser interpretado como un mayor efecto de sombreado en la escena a causa del gran número de individuos presentes ($\lambda > 1$).

Por otra parte, las gráficas b, d y f representan el ajuste obtenido mediante el modelo UPB para cada condición de iluminación. El eje de las abscisas muestra los valores de la reflectancia normalizada por el modelo (R_n) y el de las ordenadas las variaciones de la geometría sol-sensor correspondientes (χ).

Los valores presentados en el Cuadro 3 permiten estudiar el ajuste del modelo UPB en relación al comportamiento dispersor de las bandas rojo e infrarrojo cercano bajo diversas condiciones de cobertura y variaciones en las propiedades ópticas. En los modelos donde interviene el kernel Li-Sparse, 19 683 escenarios fueron simulados, mientras que en los otros dos se consiguieron 6561. En cuanto a la geometría sol-sensor, el ángulo cenital de iluminación osciló entre 0° y 45° con pasos de 15° , mientras que para el cenital de visión los incrementos fueron de 5° en un rango de 0° a 50° . Dada esta configuración de valores, se obtuvieron más

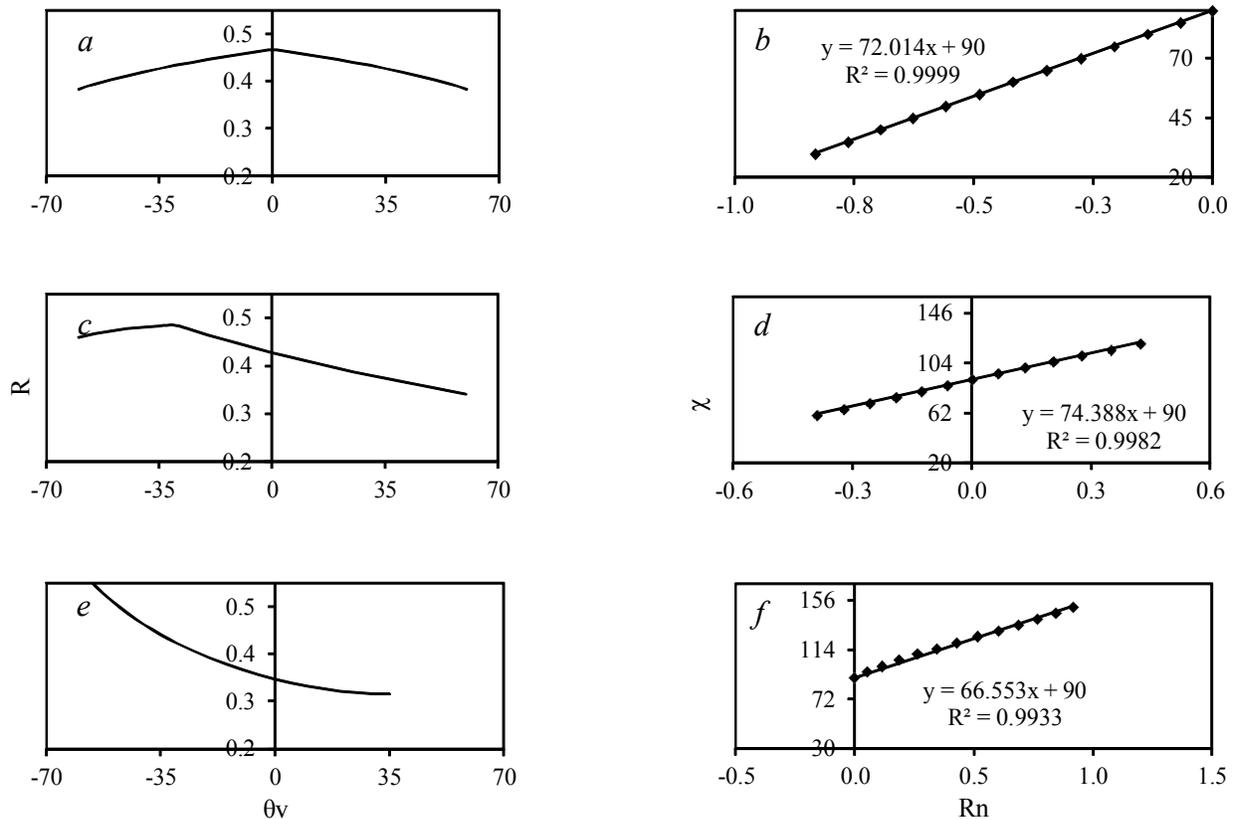


Figura 4. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thick y Li-Sparse y ajuste correspondiente del modelo UPB.

de 800 mil valores para los modelos que involucran al kernel Li-Sparse y cerca de 300 mil para los demás, esto para cada una de las bandas analizadas. Del conjunto total de datos, se seleccionaron 27 154 en forma

aleatoria para presentar la correspondencia entre los valores de reflectancia descritos por cada modelo SEL bajo distintas configuraciones de cobertura y aquellos obtenidos una vez ajustado el modelo UPB.

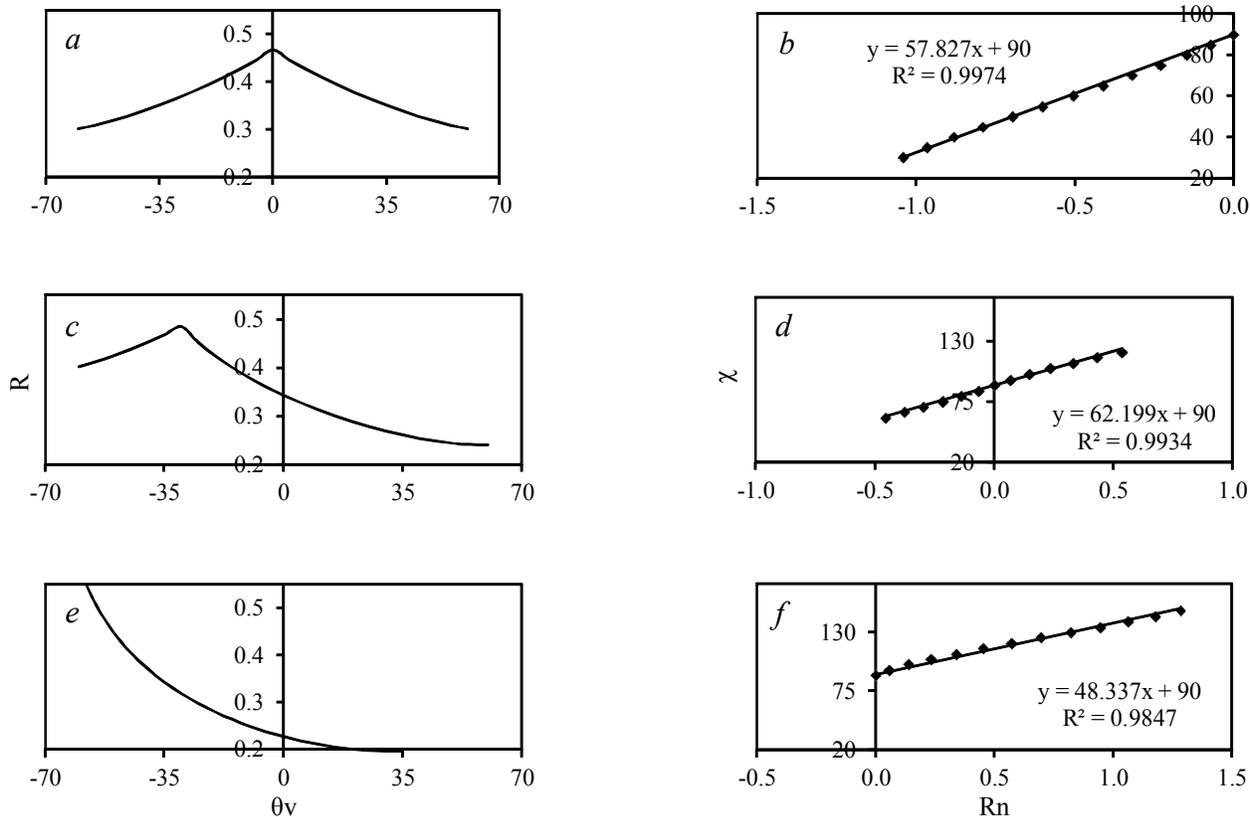


Figura 5. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thick y Li-Dense y ajuste correspondiente del modelo UPB.

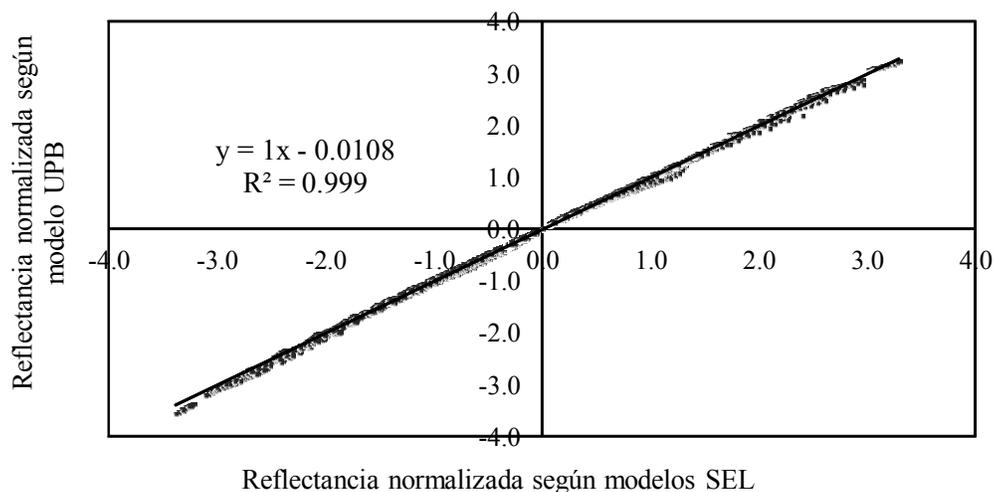


Figura 6. Correspondencia entre reflectancias simuladas a partir de modelos SEL y su correspondiente normalización mediante el modelo UPB.

Los resultados del ejercicio realizado se muestran en la Figura 6; los ajustes experimentales son excelentes para todos los escenarios simulados y los coeficientes de determinación alcanzados son congruentes con los reportados por Bolaños y Paz (2010) al validar el modelo con datos de experimentos en campo, lo cual sugiere que el modelo Uni-Paramétrico de la BRDF puede ser utilizado en aplicaciones donde actualmente se emplean modelos SEL.

Los kernels descritos en este trabajo son utilizados en la generación del producto BRDF/Albedo de MODIS. El algoritmo combina datos de reflectancia de la superficie terrestre captados por el sensor MODIS y el Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR) para ajustar los modelos utilizados en este estudio, la calibración se realiza en siete bandas espectrales a una resolución espacial de 1 km cada 16 días. Los kernels elegidos para construir los modelos, son aquellos que presentan la estimación más baja del error cuadrático medio (ECM) durante el proceso de inversión, posteriormente, las integrales direccional-hemisférica (*black-sky albedo*) y bi-hemisférica (*white-sky albedo*) del modelo construido son calculadas (Strahler *et al.*, 1996).

CONCLUSIONES

Se presentó un ejercicio de evaluación sobre ajuste del modelo Uni-Paramétrico de la BRDF propuesto por Bolaños y Paz (2010). El estudio se llevó a cabo mediante simulaciones realizadas con modelos semi-empíricos lineales formados a partir de los kernels descritos en Wanner *et al.* (1995). Los resultados obtenidos indican que el modelo UPB responde de manera adecuada a diversas configuraciones de cobertura terrestre, las cuales van desde cobertura arbórea dispersa con doseles abiertos, hasta cobertura arbórea densa con doseles cerrados. El comportamiento del modelo UPB sugiere que puede ser utilizado en la generación de productos derivados de datos obtenidos por sensores remotos a bordo de plataformas satelitales.

Estudios posteriores deben ser realizados en dos direcciones: (1) determinar a cuál o cuáles parámetros radiométricos o estructurales responde la pendiente del modelo, único parámetro del cual depende, y (2) evaluar el desempeño del modelo con datos provenientes de imágenes satelitales, tanto en la normalización de observaciones multi-temporales como en la derivación de productos biofísicos a partir de estos datos.

LITERATURA CITADA

- Bacour, C. and F. M. Bréon. 2005. Variability of biome reflectance directional signatures as seen by POLDER. *Remote Sens. Environ.* 98: 80-95.
- Barnsley, M. J., D. Allison, and P. Lewis P. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images. *Int. J. Remote Sens.* 18: 1937-1960.
- Bolaños, M., F. Paz-Pellat, E. Palacios-Vélez, E. Mejía-Sáenz y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Bolaños, M. y F. Paz-Pellat. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mex. Cienc. Pecuarias* 1: 349-361.
- Hill, M. J., C. Averill, Z. Jiao, C. B. Schaaf, and J. D. Armston. 2008. Relationship of MISR RPV parameters and MODIS BRDF shape indicators to surface vegetation patterns in an Australian tropical savanna. *Can. J. Remote Sens.* 34: 247-267.
- Hu, B., W. Lucht, X. Li, and A. H. Strahler. 1997. Validation of kernel-driven semiempirical models for the surface bidirectional reflectance distribution function of land surfaces. *Remote Sens. Environ.* 62: 201-214.
- Huete, A., C. Justice, and W. van Leeuwen. 1999. MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document version 3. Tucson, AZ, USA.
- Jiao, Z., C. Woodcock, C. B. Schaaf, B. Tan, J. Liu, F. Gao, A. Strahler, X. Li, and J. Wang. 2011. Improving MODIS land cover classification by combining MODIS spectral and angular signatures in a Canadian boreal forest. *Can. J. Remote Sens.* 37: 184-203.
- Li, X. and A. H. Strahler. 1985. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geosci. Remote Sens.* GE-23: 705-721.
- Li, X. and A. H. Strahler. 1986. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* GE-24: 906-919.
- Li, Z., J. Cihlar, X. Zheng, L. Moreau, and H. Ly. 1996. The bidirectional effects of AVHRR measurements over boreal regions. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 34: 1308-1322.
- Li, Z., L. Moreau, J. Cihlar, and D. W. Deering. 1997. An evaluation of kernel-driven bidirectional models using PARABOLA measurements. *Can. J. Remote Sens.* 23: 120-130.
- Lucht, W. 1998. Expected retrieval accuracies of bidirectional reflectance and albedo from EOS-MODIS and MISR angular sampling. *J. Geophys. Res.* 103: 8763-8778.
- Maignan, F., F. M. Bréon, and R. Lacaze. 2004. Bidirectional reflectance of earth targets: Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the Hot Spot. *Remote Sens. Environ.* 90: 210-220.
- Myneni, R. B., G. Asrar, and F. G. Hall. 1992. A three-dimensional radiative transfer method for optical remote sensing of vegetated land surfaces. *Remote Sens. Environ.* 41: 105-121.
- Pokrovsky, O. and J. L. Roujean. 2002. Land surface albedo retrieval via kernel-based BRDF modeling: I. Statistical inversion method and model comparison. *Remote Sens. Environ.* 84: 100-119.
- Román, M. O., C. K. Gatebe, C. B. Schaaf, R. Poudyal, Z. Wang, and M. D. King. 2011. Variability in surface BRDF at different spatial scales (30 m-500 m) over a mixed agricultural landscape as retrieved from airborne and satellite spectral measurements. *Remote Sens. Environ.* 115: 2184-2203.

- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Springer. The Netherlands.
- Roujean, J. L., M. Leroy, and P. Deschamps. 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophys. Res.* 97: 20455-20468.
- Strahler, A.H., W. Wanner, C. B. Schaaf, X. Li, B. Hu, J.-P. Muller, P. Lewis, and M. J. Barnsley. 1996. MODIS BRDF/Albedo product: Algorithm theoretical basis document version 4.0. NASA/GSFC, MODIS Product ID: MOD43. Boston, MA, USA.
- Wang, Z., C. B. Schaaf, P. Lewis, Y. Knyazikhin, M. A. Schull, A. H. Strahler, T. Yao, R. B. Myneni, M. J. Chopping, and B. J. Blair. 2011. Retrieval of canopy height using moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sens. Environ.* 115: 1595-1601.
- Wanner, W., X. Li, and A. H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *J. Geophys. Res.* 100: 21077-21089.