Rev Mex Cienc Pecu 2010;1(4):349-361

Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales

General modeling of the effects of the illumination – vision geometry in the reflectance of grasslands

Martín Alejandro Bolaños González[a], Fernando Paz Pellat[b]

RESUMEN

En este artículo se presenta el desarrollo y evaluación de un modelo general para minimizar el efecto que la geometría iluminación-visión tiene sobre la reflectancia de la vegetación en las bandas Roja (R) e Infrarroja Cercana (IRC). Para validar el modelo propuesto se utilizaron tres bases de datos obtenidas en experimentos realizados en zonas de pastizal natural en tres diferentes partes del mundo, con características muy diferentes entre si (composición de especies, porcentaje de cobertura vegetal, tipos de suelo, etc.). Los resultados obtenidos fueron adecuados ($R^2 \geq 0.98$).

PALABRAS CLAVE: BRDF, Reflectancia, Geometría iluminación-visión, Pastizal.

ABSTRACT

In this study a general model for minimizing the effect that the illumination-vision geometry has on the vegetation reflectance in the Red (R) and Near Infrared (NIR) bands was developed and evaluated. In order to validate the proposed model three data bases, obtained in experiments carry out in natural grasslands zones in three different parts of the world, with characteristics so different among them (species composition, vegetal cover percentage, kinds of soils, etc.) were utilized. The results obtained were adequate ($R^2 \geq 0.98$).

KEY WORDS: BRDF, Reflectance, Illumination-vision geometry, Grassland.

INTRODUCCIÓN

Los datos obtenidos a partir de los sensores remotos, específicamente de imágenes de satélite, son extensivos y exhaustivos, ya que permiten obtener información muy detallada de grandes áreas. Por lo mismo, estas técnicas son muy importantes en aquellas disciplinas relacionadas con la generación de inventarios, manejo de los recursos naturales y sistemas de producción agropecuarios, como es el caso de la estimación de biomasa y cobertura vegetal en áreas de pastizal natural; sin embargo, previo al uso de la información adquirida por los sensores a bordo de satélites, es necesario aplicar metodologías

INTRODUCTION

Data obtained from remote sensing specifically of satellite images are extensive and exhaustive as they allow obtaining very detailed information of large areas. For this reason, these techniques are very important in disciplines related to developing inventory, management of natural resources, and livestock/agriculture production systems, such as the estimation of biomass and vegetation cover in areas of natural grassland, however, prior to the use of information acquired by sensors on satellites, it is necessary to apply approaches that standardize the information, because it contains effects of

Recibido el 4 de febrero de 2009. Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2010.

[a] Estancia Postdoctoral, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, 56230.Estado de México, México.

Tel: 595 9520200 ext. 1151. bolanos@colpos.mx. Correspondencia al primer autor.

[b] Colegio de Postgraduados-Campus Córdoba.

que estandaricen la información, ya que ésta contiene efectos de diversa índole (georeferenciación, geometría sol-sensor, atmosférica, etc.), los cuales pueden provocar distorsiones importantes en la reflectancia medida.

Debido a lo anterior, en este artículo se presenta una metodología que corrige los efectos de la geometría sol-sensor, los cuales son significativos en los sensores satelitales AVHRR, MODIS y SPOT, entre otros. En los dos primeros debido principalmente a que su ancho de barrido es muy grande (2,700 y 2,330 km); y en el caso del sensor SPOT, debido a que su ángulo de visión puede variar en ± 28.5°. Por tanto, es necesario reducir o eliminar estos efectos como paso inicial en el cálculo de índices de vegetación o cualquier otro cálculo realizado con base a estas imágenes de satélite y que se pretenda ligar a características biofísicas de la vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La superficie terrestre refleja la luz en cantidades diferentes dependiendo del ángulo de visión con el que se observa o capta esta luz, así como del ángulo de iluminación; es decir, la reflectancia de la superficie terrestre es anisotrópica. La Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF) describe matemáticamente esta anisotropía, prediciendo la magnitud de la radiación reflejada en una dirección dada.

La BRDF de una pequeña superficie de área δA está definida como la razón de la radianza incremental saliendo de la superficie a través de un ángulo sólido infinitesimal en la dirección definida por el vector de visión, Ω(θv,ϕv), sobre la irradianza incremental de la dirección definida por el vector de iluminación, Ω'(θs,ϕs)[1]:

$$BRDF(\theta s, \phi s, \theta v, \phi v) = \frac{dLe(\theta v, \phi v)}{dEi(\theta s, \phi s)}, \text{ en } sr^{-1} \quad \text{.....(1)}$$

Donde dLe es la irradianza incremental reflejada desde la superficie en la dirección del ángulo de visión Ω ($Wm^{-2}sr^{-1}$); dEi es la irradianza incremental ($Wm^{-2}sr^{-1}$) que llega desde la dirección de iluminación

various kinds (geo-reference, sun-sensor geometry, atmospheric effects, etc.); which can cause important distortions in the measured reflectance.

This article presents a methodology that corrects the effects of the sun-sensor geometry, which are significant in the AVHRR, MODIS, SPOT satellite sensors, among others, mainly because in the first two the wide-scanning is very large (2700 and 2330 km); and in the case of the SPOT satellite, because its angle of vision can vary ± 28.5°. It is therefore necessary to reduce or eliminate these effects as an initial step in calculating vegetation indexes or any other estimation based on these satellite images that intend to link to bio-physical characteristics of vegetation.

MATERIALS AND METHODS

The earth's surface reflects different quantities of light depending on the angle of vision with which it is observed or acquired, as well as on the angle of illumination, that is, reflectance of the earth's surface is anisotropic. The Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) describes mathematically this anisotropy, predicting the magnitude of the radiation reflected in a given direction.

BRDF of a small area δA is defined as the ratio of the incremental radiance incoming from the surface through a solid infinitesimal angle in the direction defined by the vision vector, Ω (θv, ϕV), over the incremental irradiance of the direction defined by the illumination vector Ω'(θs, ϕs)[1], as defined in Equation 1.

$$BRDF(\theta s, \phi s, \theta v, \phi v) = \frac{dLe(\theta v, \phi v)}{dEi(\theta s, \phi s)}, \text{in } sr^{-1} \quad \text{.....(1)}$$

where dLe is the incremental irradiance reflected from the surface in the direction of the angle of vision Ω ($Wm^{-2}sr^{-1}$); dEi is the incremental irradiance ($Wm^{-2}sr^{-1}$) that arrives from the direction of illumination Ω; θs is the sun zenith angle; ϕs is the sun azimuth angle of vision; θv is the vision zenith angle; ϕv is the vision azimuth angle (Figure 1).

Although there are many approaches to BRDF modeling in remote sensing, they need to have at

Ω; θs es el ángulo cenital solar; ϕs es el ángulo acimutal solar; θv es el ángulo cenital de visión; ϕv es el ángulo acimutal de visión (Figura 1).

Aunque existen muchas formas de abordar la modelación de la BRDF en sensores remotos, estas requieren de contar al menos con tres datos de reflectancia (sólo si estos están en geometrías suficientemente diferentes[2,3,4]; por lo que en realidad los algoritmos operacionales usan de 10 a 16 datos), medidos con diferente geometría iluminación-visión, en un periodo de tiempo corto (10 a 16 días). Este enfoque supone que las condiciones atmosféricas, el fondo de la vegetación (suelo, mantillo, etc.) y el crecimiento de la vegetación permanecen constantes en este periodo; sin embargo, en una situación real esta hipótesis no se cumple, particularmente en el periodo de interés de crecimiento de cultivos agrícolas o vegetación natural.

Un método que sólo considere las reflectancias del mismo día en que fue tomada una imagen (un sólo dato de reflectancia), en una base píxel por píxel, sería la mejor alternativa para evitar suposiciones de invarianza u homogeneidad, debido a lo cual, la presente investigación se centró en el desarrollo de un método de mínima hipótesis para minimizar el efecto que la geometría iluminación-visión (efecto BRDF) tiene sobre la reflectancia de la vegetación en las bandas Roja (R) e Infrarroja Cercana (IRC); esto es, modelar la función geométrica de la reflectancia en forma adecuada para reducir su complejidad y obtener como resultado una metodología que usa un solo dato de reflectancia para la corrección de los efectos anteriormente mencionados. En este sentido, es importante aclarar que la metodología desarrollada parte únicamente de la geometría de iluminación-visión (Figura 1), por lo que el desarrollo completo de la propuesta implica un aporte sustancial al conocimiento de la modelación de los efectos que la geometría sol-sensor tiene sobre la reflectancia de la vegetación.

La modelación adecuada de la BRDF parte de seleccionar un plano de simetría adecuado, que elimina la complejidad de la misma, y permite, por lo tanto, modelarla con un solo dato de reflectancia, asumiendo la hipótesis que, de acuerdo

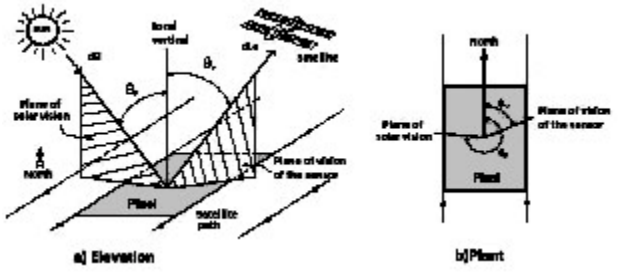
least 3 reflectance data (only if these are in sufficiently different geometries ([2,3,4]), so in reality the operational algorithms use from 10 to 16 data), measured with different illumination-vision geometry, in a short time (10 to 16 days). This approach assumes that the atmospheric conditions, the vegetation background (soil, mulch, etc) and the vegetation growth are constant over this period; but in a real situation this assumption is not satisfied, particularly in the interest period of growth of agricultural crops or natural vegetation.

A method that only considers the reflectances of the same day in which an image was taken (a single datum of reflectance), on a pixel by pixel basis, would be the best alternative to avoid assumptions of invariance and homogeneity, due to which this research focused on the development of a method of minimal hypothesis to minimize the effect that the illumination-vision geometry (BRDF effect) has on the reflectance of vegetation on the Red (R) and Near Infrared (IRC) bands; that is, modeling the geometric reflectance function properly to reduce its complexity and obtain as result a methodology that uses a single reflectance datum for the correction of the afore-mentioned effects. In this sense, it is important to note that the methodology developed starts only from the illumination-vision geometry (Figure 1), so the full development of the proposal implies a substantial contribution to the knowledge of modeling of the effects that the sun-sensor geometry has on the reflectance of vegetation

The proper modeling of the BRDF comes from selecting a suitable symmetry plane, which removes

Figura 1. Geometría sol-sensor de iluminación y visión

Figure 1. Sun-sensor geometry of illumination and vision



al plano de simetría y espacio de análisis seleccionado, es posible obtener un punto adicional del modelo que permite calcular el único parámetro del cual depende: la pendiente (b).

La generalización del modelo de la BRDF, para las bandas R e IRC, parte del modelo desarrollado por Bolaños *et al*[5], quienes propusieron modelos independientes para cada una de estas bandas (planos de simetría diferentes); sin embargo, a partir de análisis posteriores, fue posible detectar un plano de simetría único para ambas bandas, dando como resultado un modelo general para las mismas. Ambos modelos se exponen a continuación.

Simetrización y modelo inicial de la BRDF

La geometría de la iluminación está definida por el ángulo cenital solar (θs) y el ángulo acimutal solar (ϕs), mientras que la geometría de visión está definida por el ángulo cenital de visión (θv) y el ángulo acimutal de visión (ϕv). Los componentes principales de la geometría sol-sensor se muestran en la Figura 1.

El signo del ángulo cenital de visión está definido de acuerdo a la siguiente convención:

$$\theta v = -\theta v \text{ si } \begin{Bmatrix} 0 \le \text{abs}(\phi s - \phi v) \le 90 \\ 270 \le \text{abs}(\phi s - \phi v) \le 360 \end{Bmatrix}$$
$$\theta v = +\theta v \text{ si } \{90 < \text{abs}(\phi s - \phi v) < 270\} \quad \text{..... (2)}$$

donde un valor negativo de θv implica una dirección de iluminación de retroflexión (*backscattering*), es decir que se observa a un objeto con un ángulo de visión y de iluminación que caen en el mismo semi-hemisferio. En el caso de valores positivos, implica que se observa al objeto en la dirección contraria al semi-hemisferio de iluminación (*forward scattering*). Dado que el efecto del acimut relativo entre el sol-sensor, para un día, y en una base píxel por píxel, es despreciable, se puede realizar una modelación que no considere este factor. Para un ángulo de visión a nadir, la reflectancia es débilmente dependiente del acimut relativo, por lo que la consideración mencionada es correcta.

En la Figura 2 se presenta un patrón típico de la variación de las reflectancias (R, usado en términos genéricos para cualquier banda espectral) con el

the complexity of it, and permits, therefore, to model it by a single reflectance datum, assuming the hypothesis that, according to the symmetry plane and space of selected analysis, it is possible to obtain an additional point of the model that allows calculating the only parameter from which depends: slope (b).

Generalization of the model of BRDF, for R and IRC bands comes from the model developed by Bolaños *et al*[5], who proposed independent models for each of these bands (different planes of symmetry); however, after further analysis, it was possible to detect a single plane of symmetry for both bands, resulting in a general model for them. Both models are described below.

Symmetrization and Initial model of BRDF

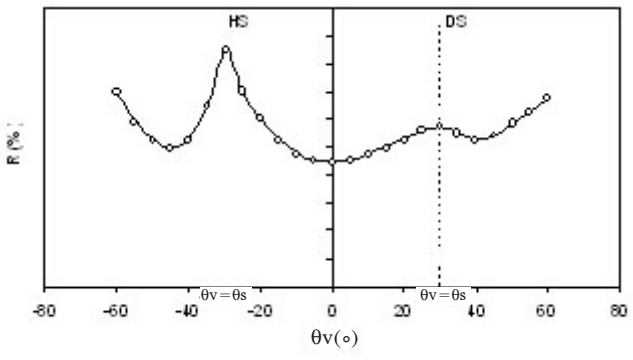
Illumination geometry is defined by the sun zenith angle (θs) and the sun azimuth angle (ϕs), while the geometry of vision is defined by the vision zenith angle of (θv) and the vision azimuth angle (ϕv). The principal components of sun-sensor geometry are shown in Figure 1.

The sign of the vision zenith angle is defined by the following convention:

$$\theta v = -\theta v \text{ si } \begin{Bmatrix} 0 \le \text{abs}(\phi s - \phi v) \le 90 \\ 270 \le \text{abs}(\phi s - \phi v) \le 360 \end{Bmatrix}$$
$$\theta v = +\theta v \text{ si } \{90 < \text{abs}(\phi s - \phi v) < 270\} \quad \text{..... (2)}$$

Figura 2. Patrón típico de variación de la reflectancia (R) con el ángulo cenital de visión (θv)

Figure 2. Typical pattern of variation of the reflectance (R) with viewing zenith angle (θv)



ángulo de visión cenital (con signo). En esta figura se observa la ocurrencia de un pico en R cuando el ángulo cenital de visión e iluminación coinciden, este pico de retroflexión (*hot spot* o HS) representa la condición donde el sensor observa la vegetación con un mínimo de sombras de ésta sobre el suelo y de auto-sombreado del follaje. A 90° se presenta un pico especular (*dark spot* o DS). Resulta claro de la complejidad de la Figura 2 que la modelación de la BRDF no puede, aparentemente, caracterizarse con un solo parámetro (a estimarse de una medición única), por lo que la mayoría de los modelos actuales tienen al menos tres parámetros, de allí los requerimientos de al menos tres observaciones y la necesidad de usar hipótesis complementarias (cuando el sensor es uni-angular).

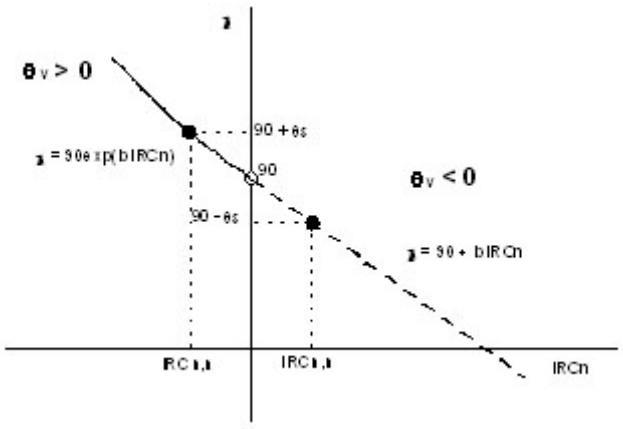
Para simetrizar y reducir la complejidad de la BRDF es necesario introducir una nueva geometría basada en una variable de posición relativa (χ):

$$\begin{aligned} \theta v < 0,\ \chi &= (90 + \theta v) - \theta s \\ \theta v > 0,\ \chi &= (90 + \theta v) + \theta s \end{aligned} \quad \text{.....(3)}$$

La Figura 3 muestra el patrón de la reflectancia en el infrarrojo cercano normalizado, IRCn = (IRC)cos(χ), en función de χ. El uso de la función cos(χ) como factor multiplicativo de IRC permite definir un punto del patrón IRCn-χ, ya que cos(90°) = 0, por lo que IRCn = 0 en χ = 90°. Para el caso de la reflectancia normalizada a nadir (θv=

Figura 3. Patrón típico de IRCn en función de χ.

Figure 3. Typical pattern of IRCn in function of χ.



where a negative value of θv implies a direction of illumination of retro-flexion (*backscattering*), that is, an object is observed with an angle of vision and illumination that falls down in the same semi-hemisphere. In the case of positive values, it implies that the object is observed in the direction opposite to the hemisphere of illumination (*forward scattering*). Given that the relative azimuthal effect between the sun-sensor, for one day, on a pixel by pixel basis, is negligible, a model that does not consider this factor can be developed. For an angle of vision at nadir, reflectance is weakly dependent on the relative azimuth, and thus, the above consideration is correct.

Figure 2 shows a typical pattern of variation of reflectance (R, used in generic terms for any spectral band) with the vision zenith angle (with sign). This figure shows the occurrence of a peak in R when the vision zenith angle and illumination coincides, this peak of retro-flexion (*hot spot* or HS) represents the condition where the sensor observes vegetation with minimal shadows of this on the ground and the self-shade of foliage. At 90° a spectacular peak is present (*dark spot* or DS). It is clear from the complexity of Figure 2 that modeling of BRDF cannot apparently be characterized by a single parameter (to be estimated from a single measurement), so that most current models have at least three parameters, so then the requirements of at least three observations and the need to use additional hypotheses (when the sensor is uni-angle).

To symmetrize and reduce the complexity of BRDF, it is necessary to introduce a new geometry based on a relative position variable (χ):

$$\begin{aligned} \theta v < 0,\ \chi &= (90 + \theta v) - \theta s \\ \theta v > 0,\ \chi &= (90 + \theta v) + \theta s \end{aligned} \quad \text{.....(3)}$$

Figure 3 shows the reflectance pattern in normalized near infrared, IRcn = (IRC)cos(χ), in function of χ. Use of the function cos(χ) as a multiplicative factor of IRC enables the definition of a point of the pattern IRCn-χ, since cos(90°) = 0; thus, IRCn = 0 in χ = 90°. For the case of normalized reflectance at nadir (θv = 0), IRCn,n, there is an established symmetry given by cos(90 - θs) = -cos(90 + θs)

0), IRCn,n, existe una simetría definida por cos(90 – θs) = -cos(90-θs) (Figura 3) que permite utilizar los casos θv < 0 y θv > 0 en forma independiente.

El uso de la función coseno para normalizar IRC esta basado en la condición de utilizar el plano de simetría del HS (χ = 90):

$$\theta v < 0, \theta v = \theta s$$
$$\theta v > 0, -\theta v = \theta s \quad \text{.....(4)}$$

En el caso de la condición de iluminación de sombreado (θv > 0), la condición de χ= 90, cos(χ)= 0, no se presenta dado que θv tiene signo positivo. Así, con esta condición restringida, es necesaria la utilización de dos patrones diferentes para la variación de las reflectancias en relación a χ.

En la Figura 3 se observa que para el caso de θv < 0, el patrón es lineal con intersección del eje χ en 90°. Para θv > 0, el patrón es exponencial con intersección también en 90°. Así, los dos patrones dependientes del signo de θv coinciden en χ = 90° y ambos patrones intersectan el valor de la reflectancia normalizada a nadir. Para la reflectancia de la banda del rojo (R), y del visible, este patrón de simetría no es válido y requiere otro tipo de aproximación.

Las funciones de la BRDF, para los casos mostrados en la Figura 3, están definidas por:

$$\theta v < 0, \chi = 90 + bIRCn$$
$$\theta v > 0, \chi = 90 \exp(bIRCn) \quad \text{.....(5)}$$

Puesto que las funciones mostradas dependen sólo del parámetro b (pendiente), es posible estimarlo con un solo dato. Para la estimación de las bandas espectrales del visible (A = Azul, V = Verde y R = Rojo), Bolaños *et al*[5] utilizaron las bandas normalizadas R'n e IRC'n (simetría en χ' = θs – θv), que usa la hipótesis de una relación lineal que pasa por el origen y, por lo tanto, dependiente de sólo la pendiente b'. Esta estrategia de modelación presenta el problema de propagación del error de estimación de IRC'n a nadir, requerido para poder estimar R'n, además de utilizar dos simetrías generales para la banda del IRC.

(Figure 3) that permits the independent use of cases θv<0 and θv>0.

The use of the cosine function to normalize IRC is based on the condition of using the plane of symmetry of the HS (χ = 90):

$$\theta v < 0, \theta v = \theta s$$
$$\theta v > 0, -\theta v = \theta s \quad \text{.....(4)}$$

In the case of the shading illumination condition (θv> 0), the condition of χ = 90, cos(χ) = 0, is not present since θv has a positive sign. Thus, under this restricted condition, it is necessary the use of two different patterns for variation of reflectances with respect to χ.

In Figure 3 it can be observed that for the case θv<0, the pattern is linear intersecting at the χ axis at 90°. For θv > 0, the pattern is exponential also intersecting in 90°. Thus, the two patterns depending on the sign of èv coincide in χ = 90° and both patterns intersect the normalized reflectance value at nadir. For the reflectance of the red (R), and visible bands, this symmetry pattern is not valid and requires another type of approach.

The BRDF functions for the cases shown in Figure 3 are defined by:

$$\theta v < 0, \chi = 90 + bIRCn$$
$$\theta v > 0, \chi = 90 \exp(bIRCn) \quad \text{.....(5)}$$

Since the functions shown depend only on parameter b (slope), it is possible to estimate it with a single datum. For the estimation of the spectral bands of the visible (B=Blue, G=Green, and R=Red), Bolaños *et al*[5] used the normalized R'n and IRC'n bands (symmetry in χ' = θs – θv), which uses the hypothesis of a linear relationship passing through the origin and, therefore, depends only of the slope b'. This modeling strategy has the problem of propagation of error estimation of IRC'n at nadir, required to estimate R'n, in addition to use two general symmetries for the IRC band.

General model of the BRDF

To develop a general model of BRDF applicable to all the spectral bands, a plane of generic symmetry

Modelo general de la BRDF

Para desarrollar un modelo general de la BRDF aplicable a todas las bandas espectrales, se buscó un plano de simetría genérico. El plano de simetría seleccionado fue $\chi = 90 - \theta v + \theta s$, donde θv no tiene signo. Esta simetría general cumple con la condición de $\chi = 90$, $\cos(\chi=90)$ y $Rn = 0$, cuando $\theta v = \theta s$ (ambas condiciones de iluminación, con simetría en el plano HS). Las reflectancias normalizadas están definidas como $Rn = Rx\cos(\chi)$, donde R es cualquier banda espectral.

El modelo propuesto para las reflectancias es un modelo lineal simple:

$$\chi = a + bRn \quad (6)$$

donde se utiliza un valor de $a = 90$ para obtener un punto adicional y poder estimar b usando un esquema similar al de el IRC del modelo inicial.

Las bases de datos utilizadas son producto de una serie de mediciones con equipos BRDF y tuvieron la finalidad de modelar el efecto que la geometría iluminación-visión tiene sobre la respuesta espectral de la vegetación (BRDF). Todas estas mediciones se realizaron en zonas extensas de vegetación natural, dominadas principalmente por pastizales de diferentes especies. Las bases de datos analizadas fueron: Arizona, Estados Unidos; Mongolia Interior, República Popular de China; e Hidalgo, Durango y Namiquipa, Chihuahua, México.

Arizona, Estados Unidos

Los datos de este experimento fueron colectados durante el verano de 1990 como parte del experimento Monzón 90 en la cuenca experimental *Walnut Gulch* en el sureste de Arizona, Estados Unidos. Las coordenadas geográficas de este sitio son 31.7° N, 110° W. El sitio de muestreo consistió de pastizales (*Bouteloua* spp) sobre pendientes variantes menores del 5 %. El follaje del pastizal fue homogéneo con una cobertura máxima del 40 % y consistió de cantidades variantes de material verde, senescente y muerto dependiendo del estado de crecimiento[6,7,8]. Las fechas de muestreo del pastizal, con los ángulos cenitales solares correspondientes, así como condiciones particulares

was sought. The plane of symmetry selected was $\chi = 90 - \theta v + \theta s$, where θv has no sign. This general symmetry complies with the condition of $\chi = 90$, $\cos(\chi=90)$ and $Rn = 0$, when $\theta v = \theta s$ (both conditions of illumination, with symmetry in the HS plane). The normalized reflectances are defined as $Rn = Rx\cos(\chi)$, where R is any spectral band.

The proposed model for reflectances is a single linear model:

$$\chi = a + bRn \quad (6)$$

where a value of $a = 90$ is used to obtain an additional point and to estimate b by using a scheme similar to that of the IRC of the initial model.

The used databases are the product of a series of measurements with BRDF equipments and had the purpose of modeling the effect that the illumination-vision geometry has on the spectral response of vegetation (BRDF). All these measurements were made in large areas of natural vegetation, dominated mainly by grasslands of different species. The analyzed databases were: Arizona, USA; Inner Mongolia, People's Republic of China; and Hidalgo, Durango, and Namiquipa, Chihuahua, Mexico.

Arizona, United States of America

Data from this experiment were collected during the summer of 1990 as part of the 90's Monsoon experiment in the Walnut Gulch experimental watershed in southeastern Arizona, USA. The geographic coordinates are 31.7° N, 110° W. the sampling place consisted of grasslands (*Bouteloua spp*) on variant slopes of less than 5 %. The foliage of the grassland was homogenous with a maximum coverage of 40 % and consisted of variant amounts of green, senescent and dead material depending on the stage of growth[6,7,8]. Sampling dates of grassland, with the corresponding sun zenith angles, as well as particular conditions of each measurement can be consulted[6,7,8].

BRDF measurements essentially consider all of the phases and stages of grass growth and therefore represent the seasonal pattern for this type of vegetation. Just before julian day 220 of the year, the grassland reached its maximum growth in

de cada medición se pueden consultar en trabajos publicados[6,7,8].

Las mediciones de la BRDF consideran esencialmente todas las fases y etapas del crecimiento del pasto, por lo que son representativas del patrón estacional de este tipo de vegetación. Poco antes del día 220 del año el pastizal alcanzó su máximo crecimiento de biomasa y cobertura (40 %), representando la situación típica de vegetación sin cobertura total del suelo.

Las reflectancias fueron medidas con un espectroradiómetro Spectron SE 590, con un ángulo de visión de 15°, en un rango espectral de 400 a 900 nm y ancho de banda efectivo de 10 nm. Para este estudio, los datos de reflectancia de alta resolución fueron remuestreados para aproximar los datos a los anchos de banda correspondientes a las bandas R e IRC del sensor LANDSAT TM (bandas 3 y 4). Los ángulos cenitales de visión variaron de -40° a + 40°, con incrementos de 10°.

Mongolia Interior, República Popular de China

El área de estudio de este experimento fue un pastizal en Xilingol. Las coordenadas geográficas del área de muestreo son 112.400° - 116.051° E y 42.843° - 44.711° N.

En este estudio se midieron con equipo BRDF 10 sitios de muestreo, durante el periodo comprendido del 6 de agosto al 9 de septiembre de 1996. La ubicación de cada uno de los sitios de muestreo, así como la fecha, hora y ángulo zenital solar en el momento de realizar la medición se pueden consultar[9].

Para tomar las mediciones radiométricas se utilizó un radiómetro multiespectral Milton. El ángulo de visión instantáneo (IFOV, por sus siglas en inglés) fue de 15° y la distancia a la superficie de 4 m (altura de medición), por lo que el diámetro del área de medición fue de 1.49 m. Las mediciones de BRDF fueron hechas en las tardes con ángulos zenitales de visión de -40° (*back scattering*) a +40° (*forward scattering*) con incrementos de 10° en un plano Este-Oeste.

biomass and cover was 40 %, representing a typical situation of crop that does not totally cover the ground.

Reflectances were measured with a Spectron SE 590 spectroradiometer with a 15° angle of vision, within a spectral range of 400 to 900 nm and an effective band width of 10 nm. For this study, the high resolution reflectance data were re-sampled to approximate the data of the corresponding R and IRC band widths of the LANDSAT TM sensor (bands 3 and 4). The vision zenith angles varied from -40° to + 40°, with increments of 10°.

Inner Mongolia, People's Republic of China

The study area of this experiment was a grassland area in Xilingol, Autonomous Region of Inner Mongolia, People's Republic of China. The geographic coordinates of the sampling area are 112.400° - 116.051° E and 42.843° - 44.711° N.

In this study, 10 sampling sites were measured with BRDF equipment during the period from August 6 to September 9, 1996. The location of each of the sampling sites as well as date, hour and zenith sun angle at the time of measurement can be found in[9].

To make radiometric measurements a Milton multispectral radiometer was used. The instantaneous field of view (IFOV) angle was 15° and distance to the surface of 4 m (height measurement), so that the diameter of the measuring area was 1.49 m. BRDF measurements were made in the afternoons with vision zenith angles of –40° (*back scattering*) to +40° (*forward scattering*) with increases of 10° in an East-West plane.

According to,[9] chopping, the study area was adequate for the validation of BRDF models because there is a wide variety of surface types from desert steppes with low height and low coverage of *Stipa gobica* on light soils to typical steppes of *Stipa grandis/ Aneurolipideum chinense* with a foliage height of 1 m, on dark soils.

Namiquipa, Chihuahua and Hidalgo, Durango. Mexico

As part of the evaluation of the proposed methodology to correct the effects of sun-sensor

De acuerdo a Chopping[9], el área de estudio resultó adecuada para la validación de los modelos de BRDF debido a que existe una amplia variedad de tipos de superficie desde estepa desértica con vegetación de poca altura y baja cobertura de *Stipa gobica* sobre suelos claros, hasta estepas típicas de *Stipa grandis/ Aneurolipideum chinense,* con una altura de follaje de 1 m, sobre suelos oscuros.

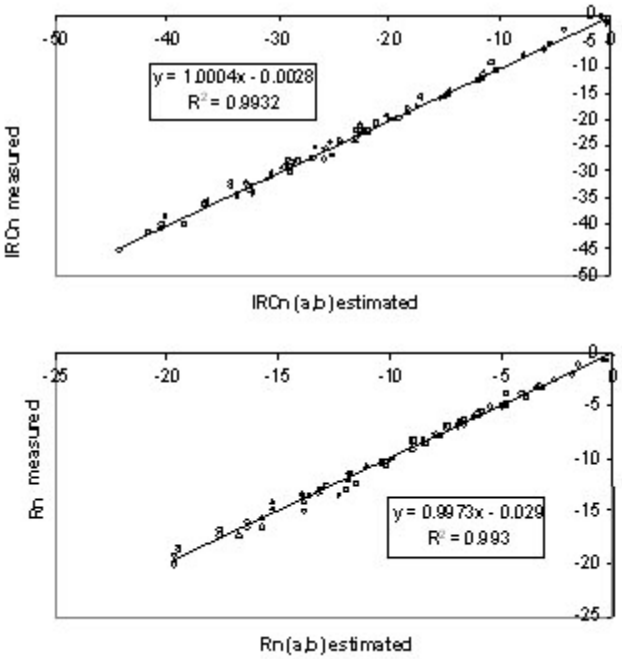
Namiquipa, Chihuahua e Hidalgo, Durango. México

Como parte de la evaluación de la metodología propuesta, para corregir los efectos de la geometría sol-sensor sobre la reflectancia de la vegetación, se llevaron a cabo una serie de muestreos en zonas de pastizales en los Municipios de Namiquipa, Chihuahua e Hidalgo, Durango en México. Estas visitas se realizaron en los periodos comprendidos del 24 al 31 de Julio, del 22 de agosto al 4 de septiembre, del 7 al 16 de octubre y del 5 al 12 de diciembre de 2005.

Se establecieron un total de cinco sitios de muestreo en cada uno de los municipios visitados, los cuales

Figura 4. Modelo general, a y b estimados, para los pastizales de China a) IRCn, b)Rn.

Figure 4. General model, a and b estimated, for China's grassland. a) IRCn, b)Rn



geometry on the reflectance of vegetation a series of surveys were carried out in grassland areas in the municipalities of Namiquipa, Chihuahua and Hidalgo, Durango in Mexico. These visits were carried out in the periods from 24 to 31 of July, from August 22 to September 4, from 7 to October 16, and from 5 to December 12, 2005.

A total of five sampling sites were established in each of the municipalities visited which were located in such a way to be representative of the grassland areas in both municipalities. The dominant type of grass was blue grama (*Bouteloua gracilis*)[5].

To carry out radiometric measurements of the BRDF, a metal structure of measurement was built *ex professo*, which allowed the measurement of the reflectance under different angles of vision (-50 º to 50 º with increments of 10 º). The measuring equipment consisted of a digital camera with a resolution of 5.0 megapixels (calculation of vegetation cover) and a CROPSCAN radiometer of five bands corresponding to the first five bands of LANDSAT TM (reflectance). This measuring equipment was mounted on a metallic structure and was maintained at a distance of 3 m from the sampling area independently of the angle of vision; that is, the length of the rotating arm was adjusted as the angle of vision varied in such a way that the equipment will be always measuring the same area.

RESULTS AND DISCUSSION

In this section the results obtained with the general model of the BRDF using all available experimental data are analyzed, to review the feasibility of the model in general. The analyzed cases correspond to the situation of not assume values of the a parameter of the linear model proposed and the case where it is assumed a=90, so it is possible to determine the validity of the hypothesis used.

Figure 4 shows the case of a and b estimated from data for IRCn and Rn, respectively, for China's grasslands of and Figure 5 shows the same data, but assuming a=90.

Figure 6 shows the case of a and b estimated from data for IRCn and Rn, respectively, for Mexico's

Figura 5. Modelo general, a=90 y b estimado, para los pastizales de China. a) IRCn, b)Rn

Figure 5. General model, a=90 and b estimated, for China's grassland. a) IRCn, b)Rn

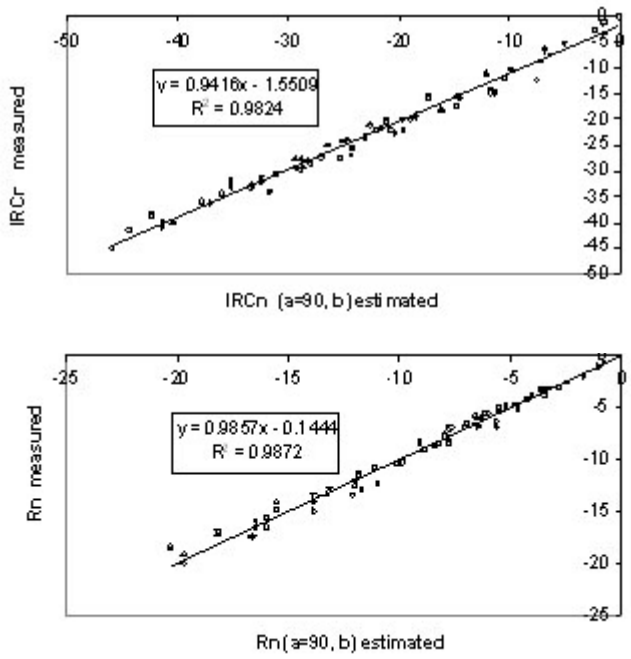
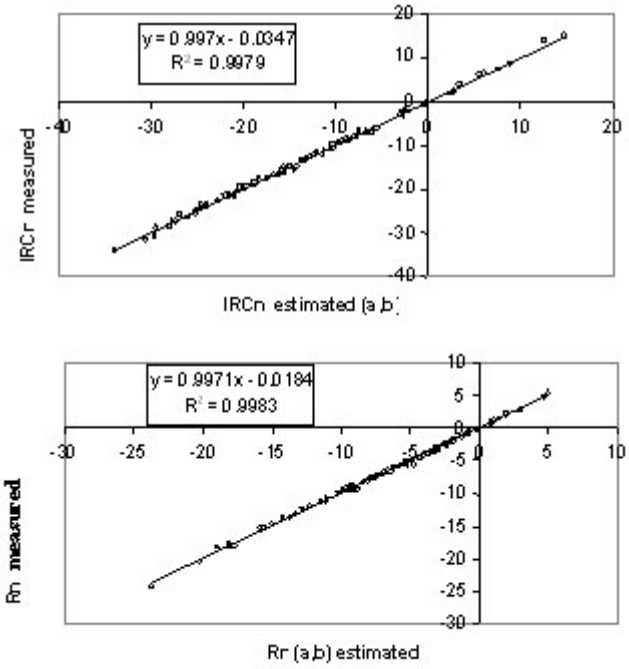


Figura 6. Modelo general, a y b estimados, para los pastizales de México. a) IRCn, b)Rn

Figure 6. General model, a and b estimated, for Mexico's grassland. a) IRCn, b)Rn



se ubicaron de tal forma que fueran representativos de las zonas de pastizales de ambos municipios. El tipo de pasto dominante fue el navajita (*Bouteloua gracilis)*[5].

Para llevar a cabo las mediciones radiométricas de la BRDF, se utilizó una estructura metálica de medición construida *ex profeso*, la cual posibilitó la medición de la reflectancia con diferentes ángulos de visión (de -50º a 50º con incrementos de 10º). El equipo de medición consistió de una cámara digital con resolución de 5.0 megapixeles (cálculo de cobertura vegetal) y un radiómetro *Cropscan* de cinco bandas, correspondiente a las cinco primeras bandas de LANDSAT TM (reflectancia). Este equipo de medición se montó en la estructura metálica y se mantuvo a una distancia de 3 m del área de muestreo independientemente del ángulo de visón; es decir la longitud del brazo giratorio se ajustó conforme se varió el ángulo de visión, de tal forma que el equipo de medición siempre midiera la misma área.

grasslands and Figure 7 shows the same data but assuming a=90. Similar results were obtained for Arizona's grasslands, USA.

Table 1 shows, as a comparative summary, the determination coefficients calculated in the evaluation of the general model, with and without using the hypothesis of a=90. According to these results it is observed that differences in both bands (R and IRC) are minimal.

CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

The general model of the proposed BRDF results in appropriate adjustments to the experimental data. The higher dispersion observed in Figures 4 and 5 is due in part to measurements carried out in China's grasslands that followed a measuring sequence where the values with an angle of vision at nadir were performed with differences of 2 to 4 degrees in the sun-illumination angles. For Arizona and Mexico's grasslands, the maximum differences were about

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se analizan los resultados obtenidos con el modelo general de la BRDF usando todos los datos experimentales disponibles, para revisar la factibilidad del modelo en lo general. Los casos analizados corresponden a la situación de no suponer valores de los parámetros a y b del modelo lineal propuesto y el caso donde se supone a=90, de tal forma que sea posible determinar la validez de la hipótesis utilizada.

La Figura 4 muestra el caso de a y b estimados de los datos para IRCn y Rn, respectivamente, para los pastizales de China y la Figura 5 muestran los mismos datos, pero suponiendo a=90.

La Figura 6 muestra el caso de a y b estimados de los datos para IRCn y Rn, respectivamente, para los pastizales de México y la Figura 7 muestra los mismos datos, pero suponiendo a=90. Resultados similares a estos se obtuvieron para el pastizal de Arizona, Estados Unidos.

En el Cuadro 1 se muestran, a manera de resumen comparativo, los coeficientes de determinación calculados en la evaluación del modelo general, con y sin la utilización de la hipótesis de a=90. De acuerdo a estos resultados se observa que las diferencias en ambas bandas (R e IRC) son mínimas.

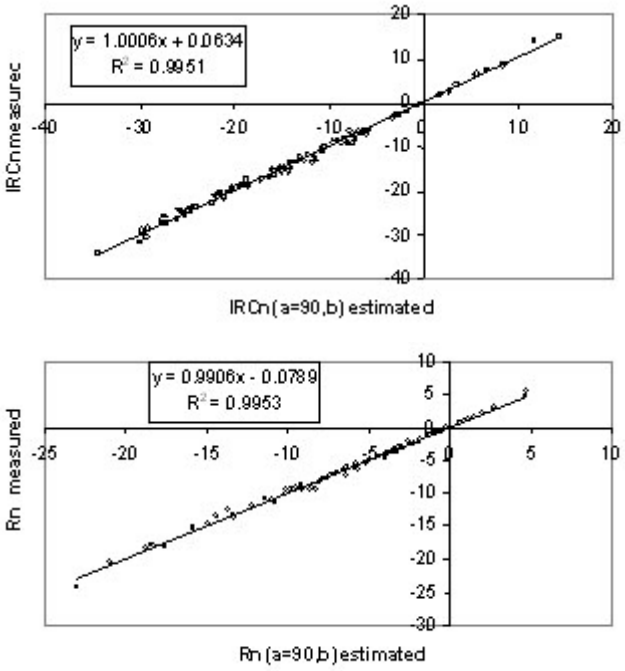
CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

El modelo general de la BRDF propuesto resulta en ajustes adecuados a los datos experimentales. La mayor dispersión observada en las Figuras 4 y 5 es debida, en parte, a que las mediciones realizadas en los pastizales de China siguieron una secuencia de medición donde los valores con un ángulo de visión a nadir fueron realizados con diferencias de 2 a 4 grados en los ángulos de iluminación solar. Para los pastizales de Arizona y México, las diferencias máximas fueron del orden de 1.5 grados y la gran mayoría menores a 1 grado. El hecho de suponer que la ordenada al origen del modelo general analizado adquiere un valor de 90 (a=90) en el espacio normalizado resulta adecuada, ya que como se observó en el análisis de resultados la disminución en el ajuste del modelo

1.5 degrees and the vast majority less than 1 degree. The fact of assuming that the ordinate to the origin of the general model analyzed acquires a value of 90 (a=90) in the normalized space results appropriate because as noted in the analysis of results the decrease in the fitting of the model is minimal (less to 1% according to the determination coefficients, R2). The use of this hypothesis makes possible the correction of the effects of the

Figura 7. Modelo general, a=90 y b estimados, para los pastizales de México. a) IRCn, b)Rn

Figure 7. General model, a=90 and b estimated, for Mexico's grassland. a) IRCn, b)Rn



Cuadro 1. Coeficientes de determinación, R^2, del modelo general propuesto

Table 1. Coefficients of determination, R^2, of the proposed general model

Database	IRCn (a,b)	IRCn (a=90,b)	Rn (a,b)	Rn (a=90,b)
Arizona	0.9962	0.9919	0.9954	0.9930
China	0.9932	0.9824	0.9930	0.9872
México	0.9979	0.9951	0.9983	0.9953

es mínima (inferiores a 1 %, de acuerdo a los coeficientes de determinación, R^2). El uso de esta hipótesis hace posible la corrección de los efectos de la geometría iluminación-visión sobre la reflectancia con un solo dato; es decir, con una sola imagen de satélite (un solo dato de reflectancia de cada píxel), es posible realizar la corrección de todos los píxeles incluidos en dicha imagen, transformando la reflectancia medida con cualquier geometría específica en cada píxel, a una geometría de visión a nadir. Este hecho, por si mismo, marca una diferencia notable con el resto de las metodologías propuestas por otros autores, ya que implica la posibilidad de realizar las correcciones y aplicaciones en tiempo *cuasi* real, tales como estimación de necesidades hídricas y nutrimentales de los cultivos, estimación de producción de biomasa y parámetros biofísicos de cultivos y vegetación natural, balances de energía, etc.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Alfredo Huete de la Universidad de Arizona en Estados Unidos y al Dr. Mark Chopping de la Universidad de Nottingham en Inglaterra por su permiso en la utilización de sus bases de datos. También agradecen al CONACYT por el apoyo recibido para realizar la estancia posdoctoral del Dr. Martín Alejandro Bolaños González en el Colegio de Postgraduados, bajo la dirección del Dr. Fernando Paz Pellat, durante el periodo de marzo de 2008 a febrero de 2009. Esta investigación fue realizada con apoyo parcial de AGROASEMEX, S.A., contrato ADJ-CDTA-C-033-2007.

LITERATURA CITADA

1 Nicodemus FE, Richmond JC, Hsia JJ, Ginsberg EJ, Limperis, T. Geometric considerations and nomenclature for reflectance, Natural Bureau of Standards Monograph 160, Institute for Basic Standards, Washington, DC. 1977.

2 Walthall CL, Norman JM, Campbell G, Blad B. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetation canopies and bare soil surfaces. Applied Optic 1985;(24):383-387.

illumination-vision geometry on reflectance with a single datum; that is, with a single image of satellite (with a single datum of reflectance of each pixel) it is possible to carry out the correction of all the pixels included in such image, transforming the measured reflectance with any specific geometry in each pixel, into a geometry of vision at nadir. This fact, by itself, gives a noted difference with the rest of methodologies proposed by other authors since it implies the possibility to carry out the corrections and applications in quasi-real time, such as the estimation of hydric and nutrimental needs of crops, estimation of production of biomass and biophysical parameters of crops and natural vegetation, energy balances, etc.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Dr. Alfredo Huete of the University of Arizona, USA, and Dr. Mark Chopping of the University of Nottingham, England for their permission in using their databases. We also thank CONACYT for the support received for postdoctoral studies of Dr. Martín Alejandro Bolaños González in the Colegio de Postgraduados, under the direction of Dr. Fernando Paz Pellat, during the March 2008 – to February 2009 period.This research was carried out with the partial financial support of AGROASEMEX, S.A., contract ADJ-CDTA-C-033-2007.

End of english version

3 Rahman H, Pinty B, Verstraete MM. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2. Semiempirical surfaces model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. J Geophys Res 1993;(98):20791-20801.

4 Wanner W, Li X, Strahler AH. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. J Geophys Res 1995;(100):21077-21089.

5 Bolaños M, Paz F, Palacios E, Mejía E, Huete A. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. Agrociencia 2007;(41):527-537.

6 Huete AR, Hua G, Qi J, Chehbouni A. Normalization of multidirectional red and nir reflectances with SAVI. Remote Sensing of Environment 1992;(41):143-154.

7 Chehbouni A, Kerr YH, Qi J, Huete AR, Sorooshian S. Toward the development of a multidirectional vegetation index. Water Resources Res 1994;(30):1281-1286.

8 Qi J, Huete AR, Cabot F, Chehbouni, A. Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed. Water Resources Res 1994;(30):1271-1279.

9 Chopping, MJ. Testing a LiSK BRDF model with in situ bidirectional reflectance factor measurements over semiarid grasslands. Remote Sensing of Environment 2000;(74):287-312.