

UN MÉTODO SIMPLE PARA ESTIMAR DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y ÓPTICAS DE LAS HOJAS DE LA VEGETACIÓN

A SIMPLE METHOD FOR ESTIMATING GEOMETRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF VEGETATION

Fernando Paz-Pellat*, Alfonso Zarco-Hidalgo, Alejandro Cano-González, Martín A. Bolaños-González, Magali Odi-Lara

Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5, Carretera México-Texcoco. 56230. Montecillo, Estado de México. (pellat@colpos.mx)

RESUMEN

La determinación de las propiedades geométricas y ópticas de las hojas de la vegetación es un proceso tedioso y que requiere de equipo especializado. El desarrollo de un método alternativo rápido y de bajo costo permite usar esta información en aplicaciones rutinarias de la transferencia radiativa en la vegetación. En este trabajo se presenta un método simple para la estimación de las propiedades geométricas y ópticas de la vegetación, usando el concepto de atrayente de la dinámica del crecimiento en espacios espectrales transformados. Con los atrayentes estimados, reflectancias en el infinito, es posible estimar el albedo foliar estandarizando el ángulo cenital de iluminación a 57° y, con este valor, los coeficientes de extinción y propiedades angulares de las hojas. La metodología propuesta sirve de base para desarrollar una estrategia de medición de un solo tiempo, equivalente a mediciones multi-temporales.

Palabras clave: Atrayente, dinámica de crecimiento, espacios espectrales transformados.

INTRODUCCIÓN

La determinación de las propiedades geométricas y ópticas de las hojas de la vegetación es una tarea compleja que requiere de procedimientos experimentales intensivos y tediosos, así como de hipótesis fuertes en lo referente a la inversión de modelos radiativos. En las propiedades geométricas, el coeficiente de extinción es una de las variables de mayor interés, ya que define la tasa de crecimiento relativa del área foliar de la vegetación (Goudriaan y van Laar, 1994) y por tanto el potencial productivo. Respecto a las propiedades ópticas, el albedo foliar (reflectancia más transmitancia de las hojas) es una de las variables de mayor interés, dada su relación con el estado nutricional de las hojas (Jacquemoud y Baret, 1990).

ABSTRACT

Determining geometric and optical properties of vegetation leaves is a tedious process that requires specialized equipment. The development of an alternative, fast, and low-cost alternative would facilitate the use of this information in routine applications of radiative transfer in vegetation. This paper presents a simple method for estimating vegetation geometric and optical properties, using the concept of attractor of growth dynamics in transformed spectral spaces. With the estimated attractors, infinite reflectances, it is possible to estimate leaf albedo by standardizing zenith angle of illumination at 57° , and with this value, the coefficients of extinction and angular properties of the leaves. The methodology proposed serves as the basis for developing a one-time measurement strategy, equivalent to multi-temporal measurements.

Key words: Attractor, growth dynamics, transformed spectral spaces.

INTRODUCTION

Determining geometric and optical properties of vegetation leaves is a complex task that requires intensive, tedious experimental procedures, as well as strong hypotheses referring to the inversion of radiative models. In the geometric properties, the coefficient of extinction is one of the variables of greatest interest since it defines the relative growth rate of foliar area of the vegetation (Goudriaan and van Laar, 1994) and, therefore, productive potential. In regard to optical properties, leaf albedo (leaf reflectance and transmittance) is one of the variables of greatest interest given its relationship to the nutritional state of the leaves (Jacquemoud and Baret, 1990).

The fundamental problem in extracting geometric and optical information using remote sensors (on satellites or in the field) is that the inversion of radiative models is an indeterminate problem (with many unknowns with respect to the relationships established among them), which does not give satisfactory results (Jacquemoud *et al.*, 1995). This situation is particularly important when the vegetation does not

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Enero, 2008. Aprobado: Enero, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 417-425. 2009.

El problema fundamental de la extracción de información geométrica y óptica usando sensores remotos (en satélites o en campo), es que la inversión de modelos radiativos es un problema indeterminado (con muchas incógnitas con respecto a las relaciones establecidas entre ellas) que da resultados poco satisfactorios (Jacquemoud *et al.*, 1995). Esta situación es particularmente importante cuando la vegetación no cubre completamente al suelo (medio heterogéneo) y los sensores miden una mezcla suelo-vegetación.

En este trabajo se presenta un método simple, aplicable, para el muestreo de la vegetación de tal forma que se puedan obtener las propiedades geométricas y ópticas de las hojas en forma rápida y eficiente a nivel de satélites o de campo.

ATRAYENTES ESPECTRALES DE LA DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN

En la Figura 1 se muestra el espacio de la banda espectral del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) asociado a la dinámica del crecimiento de la vegetación, representada por el índice de área foliar (IAF), la cual fue generada usando simulaciones radiativas discutidas en Paz *et al.* (2005), donde se usaron seis suelos diferentes (S2 al S12, del más oscuro al más claro).

En la Figura 1, se usó un mismo cultivo variando su IAF y diferentes tipos de suelos como fondo. Las líneas iso-IAF representan la misma cantidad de vegetación, pero con suelos diferentes donde $IAF = 0$ representa la línea del suelo desnudo. Si el suelo permanece constante, entonces el crecimiento de la vegetación sigue una curva iso-suelo. El atrayente de la dinámica del crecimiento de la vegetación para la banda del R es el punto de convergencia de todas las curvas iso-suelo. En este punto la banda del R se satura (no cambia de valor al aumentar el IAF) y representa a un medio ópticamente denso o infinito (Ross, 1981), por lo que se le denomina como R_{∞} . El valor del IRC asociado al R de saturación es $IRC_{R_{\infty}}$. La banda del IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio punto de saturación definido por IRC_{∞} .

Las reflectancias en el infinito están relacionadas con los albedos foliares (ω) de interés, por lo que es necesario estimar primero sus valores. Para lograr este objetivo se requiere hacer lineales las curvas iso-suelo usando el espacio transformado $dIRC-IRC$ (Paz *et al.*, 2006) y el $IVPP-R$ (Paz, 2006^[1]), donde $dIRC = IRC - (a_s + b_s R)$, $IVPP = dIRC/IRC$ (Paz *et al.*, 2003); a_s y b_s son las constantes de la línea del suelo $IRC = a_s + b_s R$ (Figura 1). Los espacios

completamente cover the soil (heterogeneous medium) and the sensors measure a soil-vegetation mixture.

This paper presents a simple applied method for sampling vegetation so as to obtain geometric and optical properties of the leaves in a rapid, efficient way using satellite or field information.

SPECTRAL ATTRACTORS OF VEGETATION DYNAMICS

In Figure 1 it is shown the red (R) and near infrared (NIR) band spectral space associated with vegetation growth dynamics, represented by the leaf area index (LAI), which was generated using radiative simulations discussed in Paz *et al.* (2005), where six different soils were used (S2 to S12, from darkest to lightest).

In Figure 1, we used the same crop and varied LAI and different soil types as background. The iso-LAI lines represent the same amount of vegetation, but different soils; $LAI = 0$ is the line of bare soil. If the soil remains constant, vegetation growth follows an iso-soil curve. The attractor of vegetation growth dynamics for the R band is the point at which all the iso-soil curves converge. At this point, the R band becomes saturated (no change in value when LAI increases) and represents an optically dense or infinite medium (Ross, 1981); for this reason it is denominated R_{∞} . The NIR value associated with saturated R is $NIR_{R_{\infty}}$. The band of NIR keeps increasing until it reaches its own saturation point defined by NIR_{∞} .

Infinite reflectances are related to the leaf albedos (ω) of interest, and thus, it is necessary to estimate their values first. To achieve this objective requires

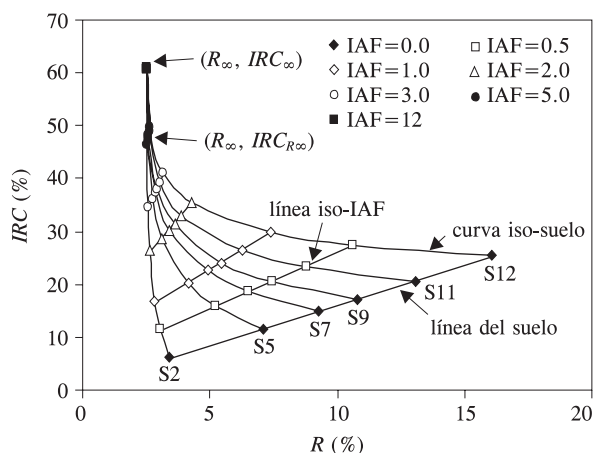


Figura 1. Dinámica del crecimiento de la vegetación en el espacio del $R-IRC$.

Figure 1. Vegetation growth dynamics in the $R-NIR$ space.

¹ Paz, F. 2006. Modelos simples de reflectancia. Reporte Julio para AGROASEMEX. 65 p.

transformados $IVPP-R$ y $dIRC-IRC$ para algunos datos del ejemplo anterior se muestran en la Figura 2.

En el espacio transformado $IVPP-R$, las curvas iso-suelo, transformadas a líneas rectas, convergen el punto $\{R_{\infty}, IVPP_{R_{\infty}} = [IRC_{R_{\infty}} - (a_S + b_S R_{\infty})] / IRC_{R_{\infty}}\}$. Además en el espacio $dIRC-IRC$, las curvas iso-suelo, transformadas a líneas rectas, convergen en el punto $(dIRC_{R_{\infty}}, IRC_{R_{\infty}})$, que representa los puntos debajo de $(R_{\infty}, IRC_{R_{\infty}})$ (Figura 1). Para valores de IRC y $dIRC$ más grandes, los puntos caen sobre una línea recta de pendiente unitaria hasta llegar al punto de saturación de la banda del IRC (Paz *et al.*, 2006).

Partiendo de los espacios transformados mencionados puede estimarse R_{∞} , para estimar el coeficiente de extinción de la radiación fotosintéticamente activa, ya que este valor es aproximado adecuadamente (95 % del valor) por el de la banda del R (Myneni y Williams, 1994).

ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y ÓPTICAS

La reflectancia en el infinito para hojas no horizontales, puede aproximarse razonablemente, de Goudriaan y van Laar (1994):

$$R_{\infty} = qR_{\infty}, h$$

$$q = \frac{2Kdir}{Kdir + Kdif} \quad (1)$$

donde, K es un coeficiente de extinción, dir se refiere a radianza directa, dif a radianza difusa y h a hojas con distribución angular horizontal.

Para evaluar el coeficiente de extinción $Kdir$ es necesario conocer la distribución de probabilidad angular de las hojas (Ross, 1981):

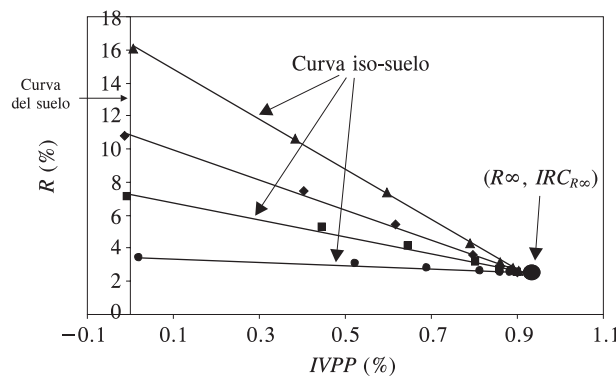


Figura 2. Espacios transformados $IVPP-R$ y $dIRC-IRC$ de los datos de la Figura 1.
Figure 2. Transformed $IVPP-R$ and $dNIR-NIR$ space from Figure 1 data.

making the iso-soil curves linear using the transformed $dNIR/NIR$ space (Paz *et al.*, 2006) and $IVPP-R$ (Paz, 2006^[1]), where $dNIR = NIR - (a_S + b_S R)$, $IVPP = dNIR/NIR$ (Paz *et al.*, 2003); a_S and b_S are constants of the soil line $NIR = a_S + b_S R$ (Figure 1). The transformed spaces $IVPP-R$ and $dNIR/NIR$ for some data of the above example are shown in Figure 2.

In the $IVPP-R$ transformed space the iso-soil curves, transformed into straight lines, converge at $\{R_{\infty}, IVPP_{R_{\infty}} = [NIR_{R_{\infty}} - (a_S + b_S R_{\infty})] / NIR_{R_{\infty}}\}$. Furthermore, the iso-soil curves, transformed into straight lines, converge in the $(dNIR_{R_{\infty}}, NIR_{R_{\infty}})$ space at $(R_{\infty}, NIR_{R_{\infty}})$ (Figure 1). For larger NIR and $dNIR$ values, the points fall on the straight line with a slope of one until arriving at the saturation point of the NIR band (Paz *et al.*, 2006).

Parting from the transformed spaces mentioned above, we can estimate R_{∞} , to estimate the coefficient of extinction of photosynthetically active radiation since this value is adequately approximated (95 % of the value) by the R band (Myneni and Williams, 1994).

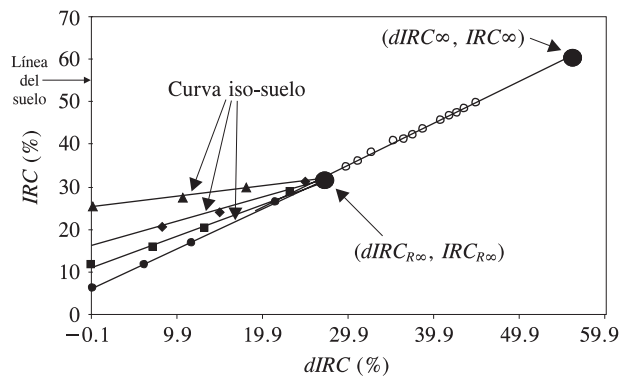
ESTIMATION OF GEOMETRIC AND OPTICAL PROPERTIES

Infinite reflectance for non-horizontal leaves can be reasonably approximated from Goudriaan and van Laar (1994):

$$R_{\infty} = qR_{\infty}, h$$

$$q = \frac{2Kdir}{Kdir + Kdif} \quad (1)$$

where K is a coefficient of extinction, dir refers to direct radiance, dif to diffuse radiance, and h to leaves with horizontal angular distribution.



$$K_{dir} = \frac{G(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \quad (2)$$

donde, θ_s es el ángulo cenital de iluminación y $G(\theta_s)$ es la proyección del área foliar de las hojas en la dirección θ_s .

Usando el modelo de radiación difusa de “cielo nublado estándar” (Moon y Spencer, 1942), Sinoquet *et al.* (2000) usaron datos obtenidos por Bonhomme y Varlet-Grancher (1977) para generar la relación:

$$K_{dif} = 0.988 \cos\left(\frac{\bar{\theta}_l}{2}\right)^{2.4} \quad (3)$$

donde, $\bar{\theta}_l$ es el ángulo promedio de las hojas. Goudriaan (1977) y Ross (1981) propusieron una serie de simplificaciones para estimar la reflectancia en el infinito para hojas horizontales. Así, para hojas horizontales y bi-Lambertianas (reflectancia igual a transmitancia), la reflectancia en el infinito está dada por:

$$R_{\infty, h} = \frac{1 - [1 - \omega]^{1/2}}{1 + [1 - \omega]^{1/2}} \quad (4)$$

Una vez conocidos los coeficientes de extinción, se invierten las relaciones (1) y (4) para obtener el albedo foliar, conocida la reflectancia en el infinito, como:

$$\omega = 1 - \left[\frac{q - R_{\infty}}{q + R_{\infty}} \right]^2 \quad (5)$$

Aunque hay diferentes propuestas de distribuciones angulares, la distribución elipsoidal de Campbell (1986) es suficientemente general para ser usada en la práctica. La formulación Campbell y Norman (1989) de la distribución elipsoidal está dada por:

$$g(\theta_l) = \frac{2x^2 |\sin \theta_l|}{A(\cos^2 \theta_l + x_2 \sin^2 \theta_l)^2}$$

$$x = \frac{b}{a}$$

$$x > 1 \Rightarrow A = 1 + \frac{\ln[(1 + \varepsilon_1)/(1 - \varepsilon_1)]}{2\varepsilon_1 x^2}, \quad \varepsilon_1 = (1 - x^{-2})^{1/2}$$

To evaluate the coefficient of extinction K_{dir} , it is necessary to determine the leaf angle distribution probability (Ross, 1981):

$$K_{dir} = \frac{G(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \quad (2)$$

where θ_s is the zenith angle of illumination and $G(\theta_s)$ is the projection of leaf area in direction θ_s .

Using the model of diffuse radiation of “standard overcast sky” (Mood and Spencer, 1942), Sinoquet *et al.* (2000) used data obtained by Bonhomme and Varlet-Grancher (1977) to generate the relationship:

$$K_{dif} = 0.988 \cos\left(\frac{\bar{\theta}_l}{2}\right)^{2.4} \quad (3)$$

where $\bar{\theta}_l$ is the average leaf angle. Goudriaan (1977) and Ross (1981) proposed a series of simplifications to estimate infinite reflectance for horizontal leaves. Thus, for horizontal and bi-Lambertian (reflectance equal to transmittance) leaves, infinite reflectance is given by:

$$R_{\infty, h} = \frac{1 - [1 - \omega]^{1/2}}{1 + [1 - \omega]^{1/2}} \quad (4)$$

Once the coefficients of extinction are known, we can invert relationships (1) and (4) to obtain leaf albedo, infinite reflectance known, as:

$$\omega = 1 - \left[\frac{q - R_{\infty}}{q + R_{\infty}} \right]^2 \quad (5)$$

Although there are different proposals of angle distributions, Campbell's (1986) ellipsoidal distribution is sufficiently general for practical use. The Campbell and Norman (1989) formulation of ellipsoidal distribution is given by:

$$g(\theta_l) = \frac{2x^2 |\sin \theta_l|}{A(\cos^2 \theta_l + x_2 \sin^2 \theta_l)^2}$$

$$x = \frac{b}{a}$$

$$x > 1 \Rightarrow A = 1 + \frac{\ln[(1 + \varepsilon_1)/(1 - \varepsilon_1)]}{2\varepsilon_1 x^2}, \quad \varepsilon_1 = (1 - x^{-2})^{1/2}$$

$$x < 1 \Rightarrow A = 1 + \frac{\sin^{-1} \varepsilon_2}{x \varepsilon_2}, \quad \varepsilon_2 = (1 - x^2)^{1/2} \quad (6)$$

donde, θ_l es el ángulo normal a las hojas, a es el semieje vertical del elipsoide y b el semieje horizontal.

La distribución elipsoidal es una generalización de la distribución esférica, donde las hojas están distribuidas sobre el hemisferio superior de una esfera. Para $x < 1$, el esferoide es prolato ($b < a$) y para $x > 1$ el esferoide es oblato ($b > a$).

El coeficiente de extinción K_{dir} y la función G de la distribución elipsoidal están dados por (Campbell y Norman, 1989):

$$\begin{aligned} K_{dir} &= \frac{(x^2 + \tan^2 \theta_s)^{1/2}}{Ax} \\ G(\theta_s) &= \frac{(x^2 \cos^2 \theta_s + \sin^2 \theta_s)^{1/2}}{Ax} \\ A &= \frac{x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733}}{x} \end{aligned} \quad (7)$$

La ventaja de la distribución elipsoidal es que sólo depende de la variable x . La razón x puede ser relacionada con el promedio de la distribución angular de las hojas (Wang y Jarvis, 1988):

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_l &= \frac{1}{0.0066x + 0.0107}, \quad x \leq 1 \\ \bar{\theta}_l &= \frac{1}{0.0103x + 0.0053}, \quad x > 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Para estimar ω usando la relación (5) es necesario conocer el valor de q , el cual es dependiente de θ_s y $\bar{\theta}_l$. Para evitar este problema se puede usar la propiedad de invarianza de las distribuciones de probabilidad angulares de las hojas que tienen un valor aproximado de $G(\theta_s) = 0.5$ cuando $\theta_s \approx 57^\circ$ (Ross, 1981). Así, bajo esta condición y de las ecuaciones (2), (8) con $x = 1$ y (3), se obtiene el valor $q = 1.046$.

Para mediciones con ángulos de visión a nadir y con ángulos cenitales diferentes de 57° , las reflectancias a $\theta_s = 57^\circ$ se pueden estimar con el modelo de Paz (2006)^[2]:

$$R \cos \{90 - (57 - \theta_{sx})\} = \quad (9)$$

$$x < 1 \Rightarrow A = 1 + \frac{\sin^{-1} \varepsilon_2}{x \varepsilon_2}, \quad \varepsilon_2 = (1 - x^2)^{1/2} \quad (6)$$

where θ_l is the normal angle of the leaves, a is the vertical semi-axis of the ellipsoid and b is the horizontal semi-axis.

Ellipsoidal distribution is a generalization of spherical distribution, where the leaves are distributed over the upper hemisphere of a sphere. For $x < 1$, the spheroid is prolato ($b < a$), and for $x > 1$, the spheroid is oblate ($b > a$).

The coefficient of extinction K_{dir} and the function G of the ellipsoidal distribution are given by (Campbell and Norman, 1989):

$$\begin{aligned} K_{dir} &= \frac{(x^2 + \tan^2 \theta_s)^{1/2}}{Ax} \\ G(\theta_s) &= \frac{(x^2 \cos^2 \theta_s + \sin^2 \theta_s)^{1/2}}{Ax} \\ A &= \frac{x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733}}{x} \end{aligned} \quad (7)$$

The advantage of ellipsoidal distribution is that it depends only on the variable x . The ratio x can be related with the average leaf angle distribution (Wang and Jarvis, 1988):

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_l &= \frac{1}{0.0066x + 0.0107}, \quad x \leq 1 \\ \bar{\theta}_l &= \frac{1}{0.0103x + 0.0053}, \quad x > 1 \end{aligned} \quad (8)$$

To estimate ω using relationship (5), it is necessary to determine the value of q , which is dependent on θ_s and $\bar{\theta}_l$. To avoid this problem, we can use the property of invariance of the leaf angle probability distributions that have an approximate value of $G(\theta_s) = 0.5$ when $\theta_s \approx 57^\circ$ (Ross, 1981). Thus, under this condition and from equations (2), (8) with $x = 1$, and (3), we obtain $q = 1.046$.

For measurements with nadir angles of vision and with zenith angles different from 57° , reflectances at $\theta_s = 57^\circ$, can be estimated with the Paz model (2006)^[2]:

$$R \cos \{90 - (57 - \theta_{sx})\} = \quad (9)$$

² Paz, F. 2006. Modelo generalizado de la BRDF: efecto del acimut relativo. Reporte Agosto para AGROASEMEX. 18 p.

$$\frac{R \cos \{90 - (\theta_s - \theta_{sx})\} [57 - \theta_{sx}]}{[\theta_s - \theta_{sx}]}$$

donde R puede ser la banda del R o del IRC y θ_{sx} es el ángulo cenital mínimo en el día de medición.

El procedimiento para estimar de las propiedades geométricas y ópticas de la vegetación es el siguiente:

- Para $\theta_s \neq 57^\circ$, estimar los valores de R e IRC para $\theta_s = 57^\circ$ usando la relación (9). Si $\theta_s = 57^\circ$ usar los valores de R e IRC medidos.
- Estimar el valor de R_∞ a partir del espacio $IVPP-R$ o $dIRC-R$ usando la intersección de las líneas iso-suelo (Figura 2).
- Estimar ω usando $q = 1.046$ en la relación (5).
- Para $\theta_s \neq 57^\circ$ usar los valores R e IRC medidos para estimar R_∞ , como se definió en el inciso b. Si $\theta_s = 57^\circ$ en las mediciones, usar la relación (9) sustituyendo el ángulo 57 por el ángulo 30; por ejemplo, para estimar R e IRC al nuevo valor de θ_s y usar estos valores para estimar R_∞ de acuerdo al paso b.
- Con los valores de R_∞ ($\theta_s \neq 57^\circ$) y ω usar la relación (5) para estimar el valor de q .
- Con el valor de q estimado, usar la relación (1) de q en función de K_{dir} y K_{dif} para resolverla numéricamente en función de x . El K_{dir} en función de x es estimado de la relación (7) y el K_{dif} en función de x está definido por la relación (3) y (8). El valor de x requiere ser estimado por métodos numéricos.
- Estimado el valor de x , entonces la distribución de probabilidad angular de las hojas es estimada de las relaciones (6), el coeficiente de extinción de la radianza directa y la función G de las relaciones (7), el promedio de la distribución angular de las hojas de las relaciones (8) y el coeficiente de extinción de la radianza difusa de la relación (3).

MÉTODOS RÁPIDOS DE ESTIMACIÓN DE R_∞ Y EVIDENCIA EXPERIMENTAL

En la Figura 3 se muestran los espacios transformados $IVPP-R$ y $dIRC-IRC$ de un experimento de maíz, *Zea mays* L. (Bausch, 1993) y algodón, *Gossypium hirsutum* (Huete *et al.*, 1985), discutidos en Paz *et al.* (2007). En esta Figura se observa que los datos experimentales concuerdan con el modelo definido en la Figura 2 para estimar R_∞ . En el caso del espacio transformado $IVPP-R$, el uso de los

$$\frac{R \cos \{90 - (\theta_s - \theta_{sx})\} [57 - \theta_{sx}]}{[\theta_s - \theta_{sx}]}$$

where R can be the R or NIR band, and θ_{sx} is the minimum zenith angle on the measuring day.

The procedure for estimating geometric and optical properties of vegetation is the following:

- For $\theta_s \neq 57^\circ$, estimate the values of R and NIR for $\theta_s = 57^\circ$ using relationship (9). If $\theta_s = 57^\circ$ use the measured R and NIR values.
- Estimate the R_∞ value from the $IVPP-R$ or $dNIR-R$ space using the intercept of the iso-soil lines (Figure 2).
- Estimate ω using $q = 1.046$ in relationship (5).
- For $\theta_s \neq 57^\circ$, use the measured R and NIR values to estimate R_∞ , as was defined in b. If $\theta_s = 57^\circ$ in the measurements, use relationship (9) substituting angle 57 for angle 30; for example, to estimate R and NIR at the new value of θ_s and to use these values to estimate R_∞ , following step b.
- With the R_∞ values ($\theta_s \neq 57^\circ$) and ω , use relationship (5) to estimate the value of q .
- With the estimated value of q , use relationship (1) of q in function of K_{dir} and K_{dif} to solve it numerically in function of x . K_{dir} in function of x is estimated from relationship (7) and K_{dif} in function of x is defined by relationships (3) and (8). The value of x requires estimation by numerical methods.
- Once the value of x is estimated, the leaf angle probability distribution is estimated from relationships (6), the extinction coefficient of direct radiance, and function G from relationships (7), the average leaf angle distribution from relationships (8), and the extinction coefficient of the diffuse radiance from relationship (3).

RAPID METHODS OF ESTIMATION R_∞ AND EXPERIMENTAL EVIDENCE

In Figure 3 it is shown the $IVPP-R$ and $dNIR-NIR$ spaces of experiments with maize, *Zea mays* L. (Bausch, 1993), and cotton, *Gossypium hirsutum* (Huete *et al.*, 1985), discussed in Paz *et al.* (2007). In this Figure it can be observed that the experimental data agree with the model defined in Figure 2 to estimate R_∞ . In the case of the transformed $IVPP-R$ space, the use of the values corresponding to the curve (not the straight line) of the soil produces errors associated to the estimation of the soil line constants (the R values are small, and so errors in this estimation are more important than in the case of NIR).

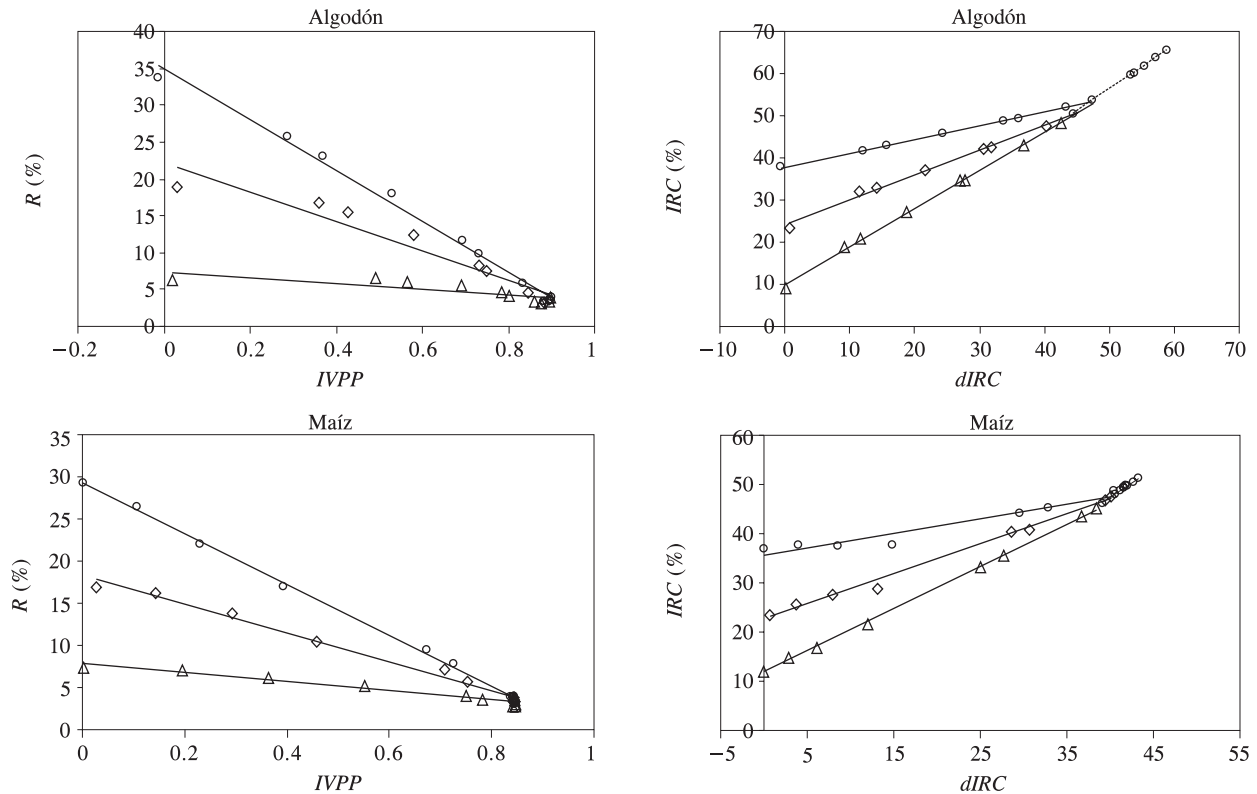


Figura 3. Espacios transformados $IVPP-R$ y $dIRC-IRC$ para un experimento de maíz, *Zea mays* L. (Bausch, 1993) y algodón, *Gossypium hirsutum* (Huete et al., 1985).

Figure 3. Transformed $IVPP-R$ and $dNIR-NIR$ spaces for experiments with maize, *Zea mays* L. (Bausch, 1993), and cotton, *Gossypium hirsutum* (Huete et al., 1985).

valores correspondientes a la curva (no línea recta) del suelo producen errores asociados a la estimación de las constantes de las líneas del suelo (los valores de R son pequeños, por lo que los errores en esa estimación son mas importantes que en el caso del IRC).

En la Figura 3 se mostraron datos experimentales correspondientes a la fase exponencial y lineal de la etapa vegetativa de los cultivos (sin cambio en las propiedades ópticas de las hojas). Por tanto, es necesario medir el sistema suelo-vegetación en el tiempo.

Si se considera que las propiedades ópticas de las hojas son constantes durante la etapa vegetativa, se puede diseñar un experimento en cualquier punto del tiempo en esta etapa, de tal forma que se generan curvas iso-suelo en forma artificial y equivalentes a mediciones multi-temporales. Este esquema de medición está representado en la Figura 4, con base en varios experimentos realizados en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, México.

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos en la generación de curvas iso-suelo artificiales, donde se realizó una secuencia de toma de datos con el suelo seco y otra con suelo húmedo,

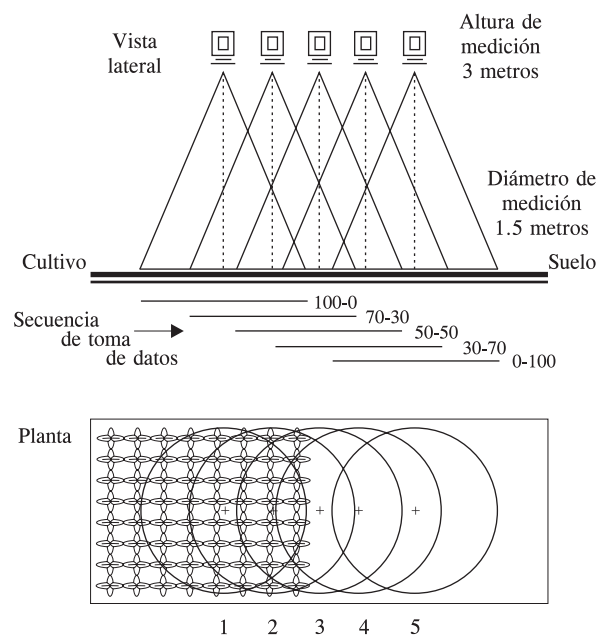


Figura 4. Esquema de medición para generar artificialmente curvas iso-suelo, tiempo fijo.

Figure 4. Measurement scheme for artificially generating iso-soil curves, fixed time.

para los cultivos de amaranto (*Amaranthus* spp.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Aunque los cultivos no tenían una cobertura completa del suelo (medio ópticamente denso), usando la Figura 3 se puede estimar los valores de R_{∞} .

Los errores de modelación mostrados en la Figura 5, particularmente para la banda del R , caso de suelo seco, son debido a variaciones en las condiciones de iluminación durante la toma de datos y por diferencias en el posicionamiento geométrico del radiómetro espectral, para reproducir exactamente las mismas fracciones de suelo y vegetación en la condición de suelo seco y húmedo.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo define una estrategia de muestreo simple y eficiente para estimar las propiedades geométricas y ópticas de las hojas en las especies estudiadas. Esto permite obtener parámetros relevantes de experimentos agronómicos o de la vegetación natural, en forma rápida y confiable, evitando tiempos excesivos de muestreos.

In Figure 3 it is shown experimental data corresponding to the exponential and linear phase of the crop vegetative stage (with no change in the optical properties of the leaves). It is thus necessary to measure the soil-vegetation system over time.

Under the consideration that leaf optical properties remain constant during the vegetative stage, we can design an experiment at any point in time during this stage, in such a way that we can generate iso-soil curves artificially to be equivalent to multi-temporal measurements. This scheme of measurement is represented in Figure 4, on the basis of several experiments conducted at the Montecillo Campus of the Colegio de Postgraduados, México.

In Figure 5 are shown the results obtained in the generation of artificial iso-soil curves in which data was taken sequentially with dry soil, and then with moist soil, for amaranth (*Amaranthus* spp.) and beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Although the crops did not completely cover the soil (optically dense medium), using Figure 3 we can estimate R_{∞} values.

The modeling errors shown in Figure 5, particularly for the R band, in the case of dry soil, are due to the variations in illumination during data gathering and

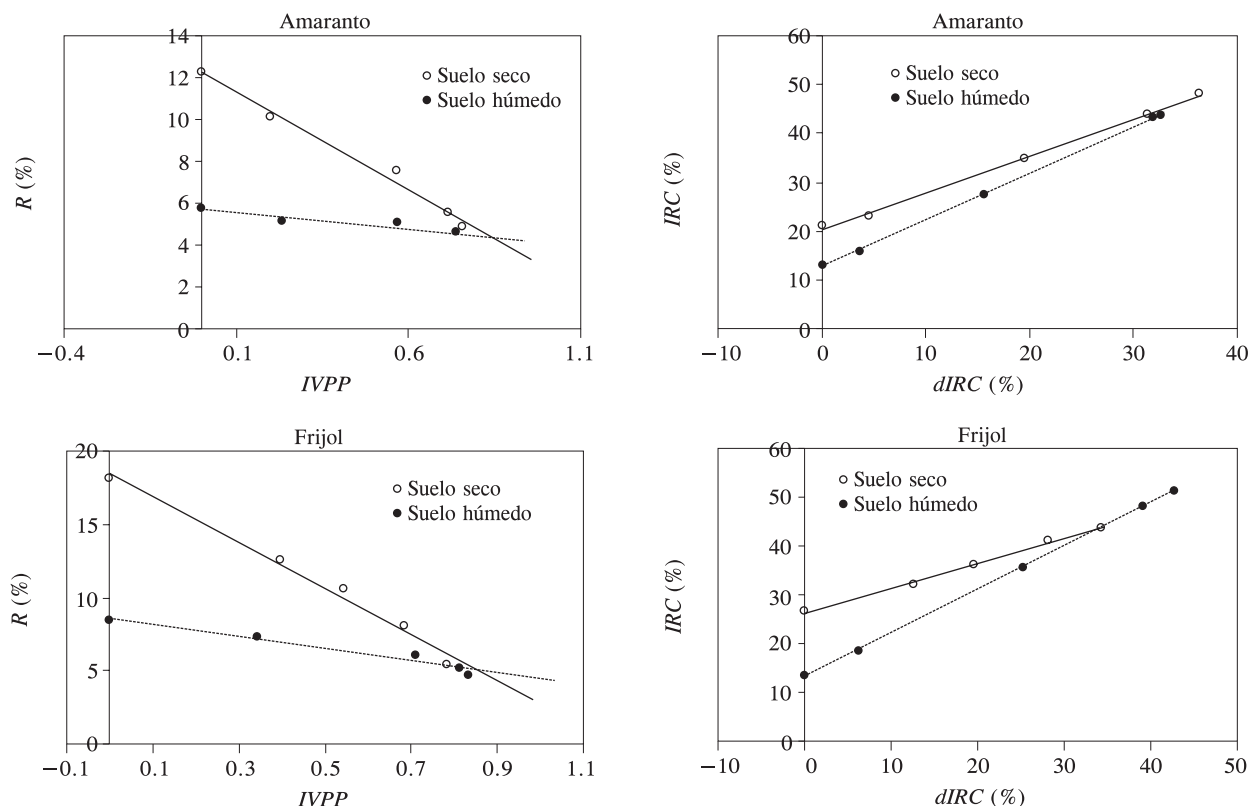


Figura 5. Resultados de la generación artificial de curvas iso-suelo para los cultivos de amaranto (*Amaranthus* spp.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

Figure 5. Results of artificially generating iso-soil curves for amaranth (*Amaranthus* spp.) and beans (*Phaseolus vulgaris* L.).

LITERATURA CITADA

- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46: 213-222.
- Bonhomme, R., and C. Varlet-Grancher. 1977. Application aux couverts végétaux de lois rayonnement en milieu diffusant. I. Etablissement des lois et vérifications expérimentales. *Ann. Agronomie.* 28: 567-582.
- Campbell, G. S. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using a ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.* 36: 317-321.
- Campbell, G. S., and J. M. Norman. 1989. The description and measurement of plant canopy structure. In: G. Russell, B. Marshall, and P. G. Jarvis (eds). *Plant canopies: their growth, form and function.* Cambridge University Press, Cambridge. pp: 1-19.
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology. A simulation study. *Simulation Monographs.* PUDOC. Wageningen, The Netherlands 259 p.
- Goudriaan, J., and H. M. van Laar. 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes.* Textbook with exercises. Current Issues in Production Ecology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 238 p.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.* 17: 35-53.
- Jacquemoud, S., and F. Baret. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34: 75-91.
- Jacquemoud, S., F. Baret, B. Andrieu, F.M. Danson, and K. Jaggard. 1995. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data: application to TM y AVIRIS data. *Remote Sens. Environ.* 52: 163-172.
- Moon, P., and D. E. Spencer. 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Trans. Illumination Eng. Soc.* 37: 707-726.
- Myneni, R. B., and D. L. Williams. 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.* 49: 200-211.
- Paz, F., L. A. Palacios, E. Palacios, M. Martínez, y E. Mejía. 2003. Un índice de vegetación sin efecto atmosférico: IVPP. In: de Alba, A., L. Reyes, y M. Tiscareño (eds). *Memoria del Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos en*

to differences in geometric positioning of the spectral radiometer, to reproduce exactly the same fractions of soil and vegetation in the conditions of dry and moist soil.

CONCLUSIONS

The methodology proposed in this paper defines a strategy of simple, efficient sampling for estimating geometric and optical properties of leaves of the species studied. With this procedure relevant parameters can be obtained from agronomic experiments or from natural vegetation, rapidly and reliably, avoiding excessive sampling time.

—End of the English version—



- Agricultura México-USA. INIFAP-SAGARPA. Aguascalientes, México. pp: 46-51.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia.* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L. A. Palacios. 2006. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. *Agrociencia.* 40: 99-108.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L. A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia.* 41: 539-554.
- Ross, J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands.* W. Junk, Norwell, MA. 391 p.
- Sinoquet, H., M. Rakocevic, and C. Varlet-Grancher. 2000. Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies. *Agric. For. Meteorol.* 101: 251-263.
- Wang, Y. P., and P. G. Jarvis. 1988. Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.* 43: 319-321.