

DISEÑO DE UN ÍNDICE ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN DESDE UNA PERSPECTIVA CONJUNTA DE LOS PATRONES EXPONENCIALES Y LINEALES DEL CRECIMIENTO

DESIGN OF A SPECTRAL VEGETATION INDEX UNDER THE JOINT PERSPECTIVE OF EXPONENTIAL AND LINEAR GROWTH PATTERNS

Enrique Romero-Sánchez, Fernando Paz-Pellat*, Enrique Palacios-Vélez,
Martín Bolaños-González, René Valdez-Lazalde, Arnulfo Aldrete

Grupo de Gestión de Riesgos y Recursos Naturales Asistida por Sensores Remotos, Campus
Córdoba y Montecillo, Colegio de Postgraduados, Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, 56230.
Montecillo, Estado de México (pellat@colpos.mx).

RESUMEN

En este trabajo se analizan diferentes experimentos con mediciones de reflectancia para revisar los patrones de las primeras dos constantes de los modelos de interacciones radiativas en el espacio del rojo (*R*) e infrarrojo cercano (*IRC*), concluyéndose de la evidencia experimental que el modelo de interacciones de orden uno es suficiente para este fin. En segundo lugar se desarrolla el algoritmo del índice espectral *IV_CIMAS* y se aplica a experimentos de cultivos, concluyéndose que este índice sólo tiene una relativa mejoría en relación con el índice *NDVI_{cp}*, y que ambos describen bien la fase expo-lineal de la etapa vegetativa de la vegetación. La fase reproductiva no es modelada en forma adecuada por ninguno de los índices espectrales. Finalmente, se revisan los modelos de la geometría sol-sensor propuestos, y se concluye que éstos tienen buenos ajustes experimentales, permitiendo estandarizar esta geometría. La modelación de los patrones asociados a las constantes de las curvas espectrales de igual vegetación es muy difícil de realizar por las propiedades de los espacios usados. El problema del diseño de índices de vegetación es todavía un problema abierto.

Palabras clave: *IV_CIMAS*, índices de vegetación, reflectancias experimentales.

INTRODUCCIÓN

El uso de índices de vegetación (*IV*) espectrales en las aplicaciones de la tecnología de los sensores remotos es muy común. Los *IV* intentan aproximar relaciones entre los datos espectrales capturados por sensores remotos y variables biofísicas, como el índice de área foliar (*IAF*), la biomasa o la cobertura aérea. El alto contraste entre las bandas del rojo (*R*) y del infrarrojo cercano (*IRC*) (Tucker, 1979) se usa para diseñar un gran número de *IV*, la mayoría basados en relaciones empíricas.

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

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

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 291-307. 2009.

ABSTRACT

This study analyzes different experiments with reflectance measurements to review the patterns of the first two constants of the models of radiative interaction in the red (*R*) and near infrared (*NIR*) space. From experimental evidence, it is concluded that the first order model of interactions is sufficient for this aim. Secondly, the algorithm of the spectral index *IV_CIMAS* is developed and applied to crop experiments, concluding that this index is only a relative improvement over the *NDVI_{cp}* index and that the expo-linear phase of the vegetative growth stage of the vegetation are well-described by both. The reproductive phase is not adequately modeled by either of the spectral indexes. Finally, the models of sun-sensor geometry proposed are reviewed, and it is concluded that these have good experimental fit, allowing this geometry to be standardized. Modeling of the associated patterns to the spectral curve constants of equal vegetation is very difficult to do because of properties of the spaces used. The problem of designing vegetation indexes is still open.

Key words: *IV_CIMAS*, vegetation indexes, experimental reflectances.

INTRODUCTION

The use of spectral vegetation indexes (*VI*) applications of remote sensing technology is very common. The purpose of *VI* is to approximate relationships between spectral data captured by remote sensors and biophysical variables such as the leaf area index (*LAI*), biomass or aerial cover. The strong contrast between the red (*R*) and near-infrared (*NIR*) bands (Tucker, 1979) is used to design a large number of *VI*, most based on empirical relationships.

This study analyzes the experimental evidence to understand the intrinsic limitations of most of the published *VI* (Paz *et al.*, 2009a)^[1]. The mathematical structure of the spectral dynamics of vegetation is defined by approximations of first and second order

En este trabajo se analiza la evidencia experimental para entender las limitaciones intrínsecas de la mayoría de los *IV* publicados (Paz *et al.*, 2009)^[1]. La estructura matemática de la dinámica espectral de la vegetación se define mediante aproximaciones de interacciones de primer y segundo orden de la transferencia radiativa en el suelo-vegetación, para el caso homogéneo (medio turbio) y heterogéneo (medio tri-dimensional). Las consideraciones de efectos atmosféricos y de la geometría sol-sensor se analizaron y se concluyó que estos efectos no modifican los argumentos de los patrones estructurales esperados de la mezcla suelo-vegetación. Adicionalmente, se revisaron la mayoría de los índices de vegetación y se concluyó que ninguno de los *IV* analizados modela en forma correcta la dinámica del crecimiento de la vegetación en la etapa vegetativa Paz *et al.* (2008a)^[2]. Sólo los *IV NDVIcp* (Paz *et al.*, 2007) y *MSAVI₂* (Qi *et al.*, 1994) aproximan correctamente la dinámica inicial de las constantes asociadas a los patrones lineales de curvas de vegetación similar (iso-IAF). Para la parte final de esta dinámica, se propuso el uso del índice β (Paz *et al.*, 2005, 2006) para el desarrollo del índice *IV_CIMAS* (*KIMO_SAVI*) o Índice de Vegetación Cinemáticamente Modificado y Ajustado por Suelo, que considera las dos partes de la dinámica espectral del crecimiento de la vegetación en la etapa vegetativa o reproductiva).

En este trabajo se analizan los patrones espectrales y su estructura dinámica en dos experimentos de cultivos agrícolas contrastantes. La propuesta del índice *IV_CIMAS* y su desarrollo operativo es explorada con detalle. La modelación de la geometría sol-sensor es analizada para su estandarización, para que los efectos bidireccionales de la reflectancia permanezcan fijos y no incidan en los *IV*. Finalmente, se analizan los resultados de un experimento de sistemas arbolados, geometría sol-sensor variable, para caracterizar los efectos de la densidad del follaje de la vegetación en los *IV*.

Índices de vegetación y su estructura: evidencia experimental

Las argumentaciones teóricas para el establecimiento de un marco de referencia para el análisis de los *IV* parten de los patrones espectrales de vegetación similar (iso-IAF) en el espacio del *R-IRC*, Figura 1.

La Figura 1 fue generada usando simulaciones radiativas tipo medio turbio unidimensional, donde el

interacciones of the radiative transfer in soil-vegetation for the homogeneous case (turbid medium) and the heterogeneous case (tri-dimensional medium). Considerations of atmospheric effects and of sun-sensor geometry are analyzed; it was concluded that these effects do not modify the arguments of the expected structural patterns of the soil-vegetation mixture. In addition, most of the vegetation indexes were reviewed, and it was concluded that none of the analyzed *VI* correctly models the dynamics of vegetation growth in the vegetative stage (Paz *et al.*, 2009b)^[2]. Only the *IV NDVIcp* (Paz *et al.*, 2007) and *MSAVI₂* (Qi *et al.*, 1994) correctly approximate the initial dynamics of the constants associated with linear patterns of similar vegetation curves (iso-LAI). For the final part of this dynamic, use of the β index was proposed (Paz *et al.*, 2005, 2006) to develop the *IV_CIMAS* (*KIMO_SAVI*), or Vegetation Index Cinematically Modified and Adjusted for Soil, which considers the two parts of the spectral dynamics of vegetation growth in the vegetative or reproductive stage.

In our study, spectral patterns and their dynamic structure are analyzed in two experiments with two contrasting agricultural crops. The proposal of the *IV_CIMAS* index and its operational development is explored in detail. Modeling of the sun-sensor geometry is analyzed for its standardization so that the bi-directional effects of reflectance remain fixed and do not intervene in the *VI*s. Finally, we analyze the results of an experiment in tree systems, sun-sensor geometry variable, to characterize the effects of foliage density of the vegetation on *VI*s.

Vegetation indexes and their structure: experimental evidence

The theoretical arguments for establishing a framework for the analysis of *VI*s begin with spectral patterns of similar vegetation (iso-LAI) in the *R-NIR* space (Figure 1).

Figure 1 was generated using radiative simulations of a one-dimensional turbid medium type, in which we modeled a maize crop using different types of soil (S2 to S12, from the darkest to the lightest). Paz *et al.* (2005) detail these simulations and their analysis for changes in optical and angular properties of the leaves, as well as the effect of sun-sensor geometry. The radiative simulations (Figure 1) are based on the following assumptions: 1) the optical and angular properties of the crop do not change during

¹ Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Mitos y falacias de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. Enviado a Ingeniería Hidráulica en México.

² Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2008a. Mitos y falacias de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices actuales de banda ancha. Enviado a Ingeniería Hidráulica en México.

cultivo de maíz fue modelado usando diferentes tipos de suelo (S2 a S12, del más oscuro al más claro). Paz *et al.* (2005) detallan estas simulaciones y su análisis para cambios en las propiedades ópticas y angulares de las hojas, así como el efecto de la geometría sol-sensor. Las simulaciones radiativas (Figura 1) se basan en los supuestos: 1) las propiedades ópticas y angulares del cultivo no cambian durante la etapa de crecimiento vegetativa; 2) el cambio de las propiedades ópticas del suelo (rugosidad y humedad) no cambia los patrones de crecimiento del cultivo y fertilidad del suelo; el medio físico es homogéneo (medio turbio en términos radiativos) y siempre cubre totalmente al suelo, independientemente del valor del IAF; la geometría sol-sensor y condiciones atmosféricas se mantienen constantes durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo. Aunque se pueden objetar estos supuestos, los resultados de las simulaciones conservan los patrones espectrales asociados al caso tridimensional general (Gao *et al.*, 2000).

Para interacciones de orden uno (los fotones que atraviesan la vegetación solo tocan al suelo una vez) en las bandas del R e IRC (sistemas suelo-vegetación) (modelo 11 - interacciones de orden uno en la banda del R y de orden uno en el IRC), la relación entre éstas estará definida por:

$$IRC = a_0 + b_0 R \quad (1)$$

donde, a_0 y b_0 son constantes que dependen de las propiedades ópticas y geométricas del sistema analizado. Para el caso de interacciones de orden uno en la banda del R , e interacciones de orden dos (los fotones tocan el suelo dos veces) en la banda del IRC (modelo 12), la relación estará dada por:

$$IRC = a_0 + b_0 R + c_0 R^2 \quad (2)$$

Al igual que para el caso de interacciones de orden uno, las constantes a_0 , b_0 y c_0 son función de las propiedades y geometría del sistema.

Los casos más complejos que los dos modelos de interacciones (modelo 22) no se analizarán en este trabajo, porque no aportan información adicional y son complejos para su uso.

Los patrones entre las dos primeras constantes a_0 y b_0 de los dos modelos (11 y 12), de la Figura 1, se ilustran en la Figura 2. Las constantes de los modelos 11 y 12 fueron estimadas por regresión de los datos simulados de la Figura 1, incluyendo otros valores del IAF. Una forma alternativa de visualizar los patrones de la Figura 2 es usar el espacio transformado $a_0 - 1/b_0$ (Paz *et al.*, 2007) (Figura 3).

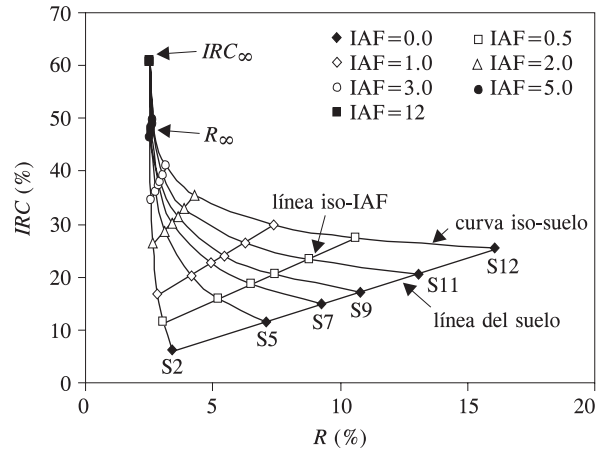


Figura 1. Patrones espectrales iso-IAF en el espacio del R - IRC .
Figure 1. Iso-LAI spectral patterns in the R - NIR space.

the vegetative growth stage, 2) the change in optical properties of the soil (roughness and moisture) do not change the growth patterns of the crop or soil fertility; the physical medium is homogeneous (turbid medium in radiative terms) and always totally covers the soil, regardless of the LAI value; the sun-sensor geometry and atmospheric conditions remain constant during the entire crop growth cycle. Although these assumptions may be objected, the results of the simulations conserve the spectral patterns associated with the general three-dimensional case (Gao *et al.*, 2000).

For first order interactions (photons that go through the vegetation touch soil only once) in R and NIR bands (soil-vegetation systems) (model 11 - first order interactions in the R band and first order interactions in the NIR band), the relationship between these will be defined by

$$NIR = a_0 + b_0 R \quad (1)$$

where a_0 and b_0 are constants that depend on the optical and geometric properties of the analyzed system. For the case of first order interactions in the R band and second order interactions (photons touch soil twice) in the NIR band (model 12), the relationship will be given by

$$NIR = a_0 + b_0 R + c_0 R^2 \quad (2)$$

Like the case of first order interactions, the constants a_0 , b_0 and c_0 are in function of the properties and geometry of the system.

More complex cases than the two models of interactions (model 22) will not be analyzed in the present study since they do not contribute additional information and their use is complex.

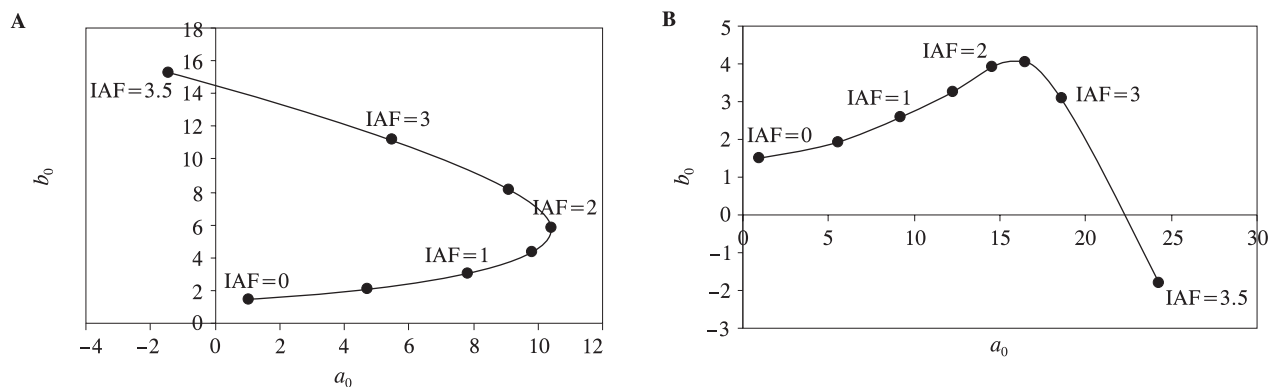


Figura 2. (A) Espacios paramétricos a_0 - b_0 del modelo 11 y (B) a_0 - b_0 del modelo 12.
Figure 2. (A) a_0 - b_0 parametric spaces of model 11 and (B) a_0 - b_0 of model 12.

Los patrones de los modelos 11 y 12 son similares en la fase inicial del crecimiento ($IAF < 2.5$), algo curva (aproximada en forma lineal en el cambio de b_0 por $1/b_0$), y después de la transición hay un cambio de pendiente (signo contrario); los patrones de 11 y 12 son diferentes en sus tendencias, pero no en sus patrones que pueden aproximarse en forma lineal. El modelo 12, asociado a un polinomio de segundo grado, (Figura 3b) muestra el problema de ajustar polinomios a patrones lineales (Figura 1), donde las constantes estimadas por regresión se comportan en forma inestable.

Para entender la problemática asociada a la modelación a través de índices de vegetación, es conveniente analizar dos *IV*: El *NDVI_c* (Paz *et al.*, 2007) y el β (Paz *et al.*, 2005 y 2006) (Figuras 2 y 3). El *NDVI_c* aproxima muy bien la primera fase de la Figura 2 ($IAF < 2.5$, caso de la Figura 1) y el β lo aproxima muy bien la segunda fase (desde IAF grandes hasta un IAF cercano a 1.0, caso de la Figura 1). La fusión de los dos índices puede ser realizada para el desarrollo del índice *IV_CIMAS* (*KIMO_SAVI*).

The patterns between the first two constants a_0 and b_0 of the two models (11 and 12) of Figure 1 are illustrated in Figure 2. The constants of models 11 and 12 were estimated by regression of the simulated data from Figure 1, including other LAI values. An alternative way to visualize the patterns in Figure 2 is to use the transformed space $a_0 - 1/b_0$ (Paz *et al.*, 2007) (Figure 3).

The patterns of models 11 and 12 are similar in the initial growth phase ($LAI < 2.5$), somewhat curved (approximated in linear form in the change from b_0 to $1/b_0$), and after the transition there is a change of slope (opposite sign). The patterns of 11 and 12 are different in their trends, but not in their patterns, which can come together in linear form. Model 12, associated with a second degree polynomial (Figure 3b) shows the problem of adjusting polynomials to linear patterns (Figure 1), where the constants estimated by regression are unstable. To understand the problem associated with modeling using vegetation indexes, it is recommendable to analyze two *VI*. *NDVI_c* (Paz *et al.*, 2007) and β (Paz *et al.*, 2005, 2006) (Figures 2 and 3). *NDVI_c* approximates the first phase of

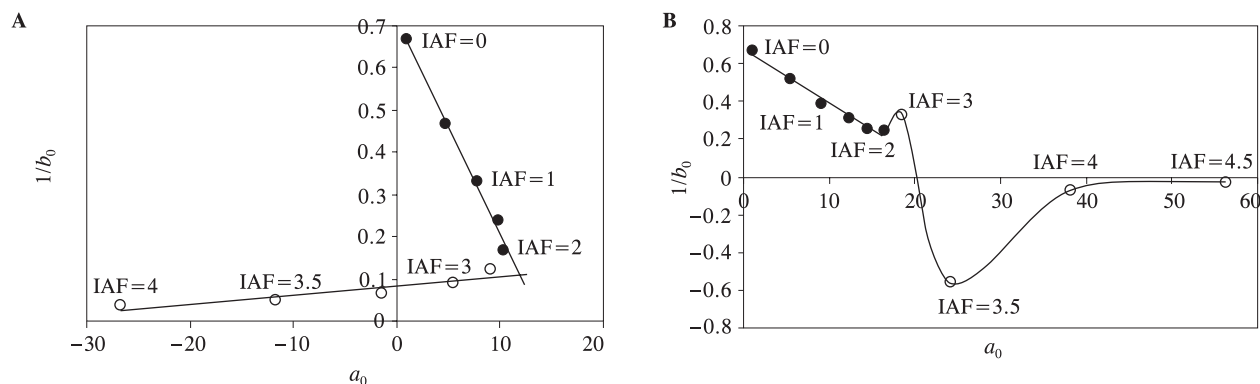


Figura 3. (A) Espacios paramétricos a_0 - $1/b_0$ del modelo 11 y (B) a_0 - $1/b_0$ del modelo 12.
Figure 3. (A) a_0 - $1/b_0$ parametric spaces of model 11 and (B) a_0 - $1/b_0$ of model 12.

El índice $NDVI_{cp}$ está definido por (Paz *et al.*, 2007):

$$NDVI_{cp} = \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1}$$

$$\frac{1}{b_0} = c + da_0 \quad (3)$$

donde, c y d son dos constantes empíricas; a_0 y b_0 fueron definidas con anterioridad.

Para la determinación del índice β se requiere una transformación del espacio $R-IRC$ al espacio $dIRC-IRC$, con $dIRC = IRC - (a_S + b_S R)$; donde a_S y b_S son las constantes de la línea del suelo (Figura 1). Así, las relaciones de la transformación de espacios y la definición del índice β están dadas por (Paz *et al.*, 2005 y 2006):

$$\beta = \frac{90 - \arctan(b_1)}{45}$$

$$b_1 = \frac{b_0}{b_0 - b_S}$$

$$a_1 = a_0(1 - b_1) + a_S b_1 \quad (4)$$

De estas relaciones, se establece ($b_S = 1$):

$$b_0 = \frac{\tan(90 - 45\beta)}{\tan(90 - 45\beta) - 1} \quad (5)$$

De la ecuación 5 y 3 se genera la relación entre el $NDVI_{cp}$ y β , usando $c = 1$ (Paz *et al.*, 2007) lo que puede asociarse con $a_S = 0$ y $b_S = 1$. Para reducir la complejidad de esta relación, se usa un polinomio de cuarto grado para una aproximación (Figura 4).

Al igual que el caso entre a_0 y $1/b_0$ de la relación (3), se ha propuesto una relación lineal entre a_1 y β (Paz *et al.*, 2005 y 2006):

$$b = q + ra_1 \quad (6)$$

donde, q y r son constantes empíricas.

Para el caso del $NDVI_{cp}$, usando $c = 1$, de las relaciones (3) y (4) se establece:

$$\beta = 2 - \frac{1}{45} \arctan\left(\frac{1}{1 - da_1}\right) \quad (7)$$

Finalmente, para el caso de índice β se usan las relaciones (3) y (4) para establecer:

Figure 2 ($LAI < 2.5$, case of Figure 1) very well, and β does so in the second phase (from large LAIs to an LAI close to 1.0, case of Figure 1). The fusion of the two indexes can be done to develop the IV_CIMAS ($KIMO_SAVI$) index.

The $NDVI_{cp}$ index is defined by Paz *et al.* (2007) as:

$$NDVI_{cp} = \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1}$$

$$\frac{1}{b_0} = c + da_0 \quad (3)$$

where c and d are two empirical constants; a_0 and b_0 were defined previously.

To determine the β index, a transformation of the $R-NIR$ space to $dNIR-NIR$ is required, with $dNIR = NIR - (a_S + b_S R)$, where a_S and b_S are constants of the soil line (Figure 1). Thus, the relationships of space transformation and the definition of the β index given by Paz *et al.* (2005 and 2006) as:

$$\beta = \frac{90 - \arctan(b_1)}{45}$$

$$b_1 = \frac{b_0}{b_0 - b_S}$$

$$a_1 = a_0(1 - b_1) + a_S b_1 \quad (4)$$

From these relationships, ($b_S = 1$) is established:

$$b_0 = \frac{\tan(90 - 45\beta)}{\tan(90 - 45\beta) - 1} \quad (5)$$

From equations 5 and 3, the relationship between $NDVI_{cp}$ and β is generated using $c = 1$ (Paz *et al.*,

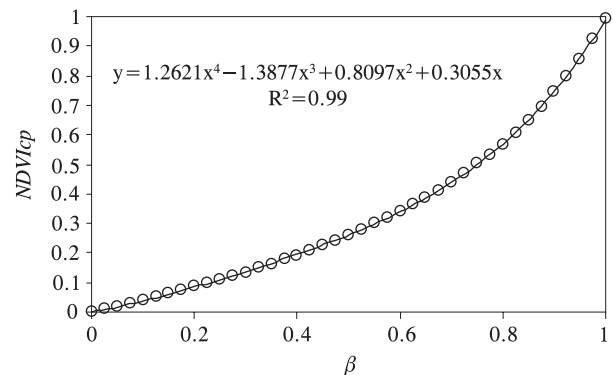


Figura 4. Aproximación a la relación entre $NDVI_{cp}$ y β .
Figure 4. Approximation to the relationship between $NDVI_{cp}$ and β .

$$a_0 = \frac{(1-b_0)}{r}(2-q) + \frac{(b_0-1)}{45q} \arctan\left(\frac{b_0}{b_0-1}\right) \quad (8)$$

El índice *IV_CIMAS* (*KIMO_SAVI*) está definido por:

$$\begin{aligned} IV_CIMAS &= NDVI_{cp}, & \text{si } \beta \leq \beta_c \\ IV - CIMAS &= NDVI_{cp}(\beta), & \text{si } \beta > \beta_c \end{aligned} \quad (9)$$

donde, $NDVI_{cp}(\beta)$ es estimado de la relación (5) para b_0 y su substitución en la relación (3) del $NDVI_{cp}$. La constante β_c es un valor umbral de β donde la relación (6) se hace inestable.

En los análisis para determinar cuales *IV* son mejores se utilizan formulaciones estadísticas asociadas a los errores de variación de la modelación (Baret y Guyot, 1991; Leprieur *et al.*, 1994; Huete *et al.*, 1994), donde una menor variación se considera óptimo. Este tipo de análisis parte del desconocimiento de la estructura de los patrones espectrales asociados al crecimiento de la vegetación, por lo que resulta muy difícil obtener conclusiones relevantes. En Paz *et al.* (2007) se usaron los patrones espectrales reales de las curvas iso-IAF para analizar varios *IV*, para visualizar las hipótesis intrínsecas. Este tipo de análisis será usado en lo siguiente, a partir de regresiones estadísticas aplicadas a las curvas iso-IAF.

Para analizar la estructura de los patrones de las curvas iso-IAF discutidos, en lo siguiente se analizan dos experimentos de campo con cultivos contrastantes: Maíz (*Zea mays* L.) (Bausch, 1993) y algodón (*Gossypium* spp.) (Huete *et al.*, 1985). En estos experimentos se realizaron mediciones de reflectancia a nadir en cultivos sin estrés, se utilizaron charolas con diferentes suelos debajo de los cultivos. En el experimento de maíz el ángulo cenital solar durante todo el periodo de muestreo varió de 17.2° a 24.2°. En el experimento de algodón, las variaciones fueron de 22.0° a 31.7°. Considerando que las variaciones de la geometría sol-sensor fueron mínimas y la ventana de condiciones de iluminación fueron similares, no se intentó estandarizar la geometría sol-sensor de estos experimentos. Así, se integraron los datos de los dos experimentos, bajo el supuesto de condiciones similares de iluminación solar. Las reflectancias en las bandas del *R* e *IRC* están dadas en proporción 0 a 1.

En la Figura 5 se muestran las curvas iso-IAF, ajustadas a líneas rectas, de los dos experimentos mencionados; se observa que el ajuste del modelo 11 caracteriza en forma adecuada las interacciones radiativas del sistema suelo-vegetación (caso tridimensional).

2007), which can be associated with $a_S = 0$ and $b_S = 1$. To reduce the complexity of this relationship, a fourth degree polynomial is used for an approximation (Figure 4).

Like the case between a_0 and $1/b_0$ of relationship (3), a linear relationship between a_1 and β has been proposed (Paz *et al.*, 2005 and 2006):

$$b = q + ra_1 \quad (6)$$

where q and r are empirical constants.

For the case of $NDVI_{cp}$, using $c = 1$ of the relationships (3) and (4), it is established that:

$$\beta = 2 - \frac{1}{45} \arctan\left(\frac{1}{1-da_1}\right) \quad (7)$$

Finally, for the case of the β index, relationships (3) and (4) are used to establish:

$$a_0 = \frac{(1-b_0)}{r}(2-q) + \frac{(b_0-1)}{45q} \arctan\left(\frac{b_0}{b_0-1}\right) \quad (8)$$

The *IV_CIMAS* (*KIMO_SAVI*) index is defined by:

$$\begin{aligned} IV_CIMAS &= NDVI_{cp}, & \text{if } \beta \leq \beta_c \\ IV - CIMAS &= NDVI_{cp}(\beta), & \text{if } \beta > \beta_c \end{aligned} \quad (9)$$

where $NDVI_{cp}(\beta)$ is estimated from relationship (5) for b_0 and its substitution in relationship (3) of $NDVI_{cp}$. The constant β_c is a threshold value of β where relationship (6) becomes unstable.

In the analyses to determine which *VI* are better, statistical formulations associated with variation errors of the modeling are used (Baret and Guyot, 1991; Leprieur *et al.*, 1994; Huete *et al.*, 1994), where a smaller variation is considered optimal. This type of analysis parts from ignorance of the structure of spectral patterns associated to vegetation growth, making it difficult to obtain relevant conclusions. In Paz *et al.* (2007) real spectral patterns of the iso-LAI curves were used to analyze several *VI*s and to visualize intrinsic hypotheses. This type of analysis will be used in what follows, parting from statistical regressions applied to iso-LAI curves.

To analyze the structure of the patterns of the iso-LAI curves discussed, below we analyze two field experiments with contrasting crops: maize (*Zea mays* L.) (Bausch, 1993) and cotton (*Gossypium* spp.) (Huete

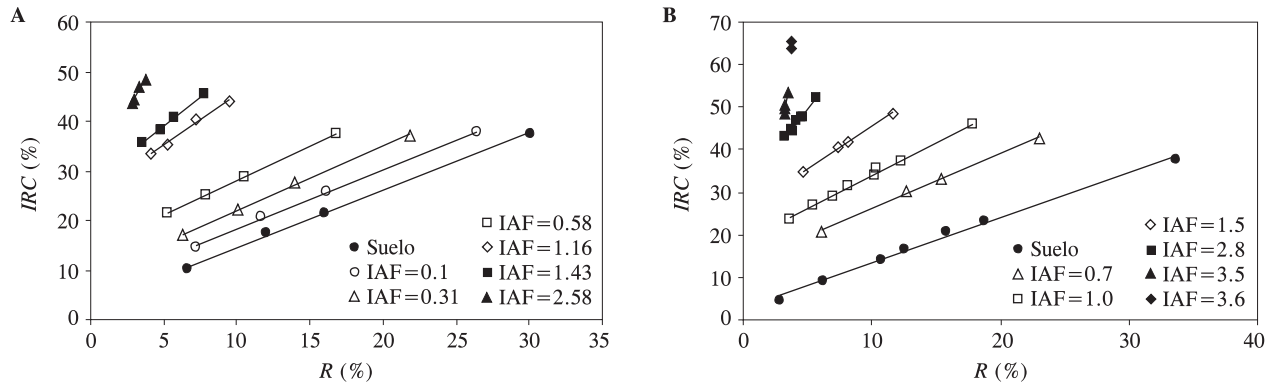


Figura 5. Curvas iso-IAF del experimento de maíz (A) y algodón (B).

Figure 5. Iso-LAI curves of the maize (A) and cotton (B) experiments.

En la Figura 6 se muestran los patrones del modelo 11 para el espacio $a_0 - 1/b_0$ y $a_1 - \beta$. En el caso del primer espacio, se muestra un patrón similar al de la Figura 3a ($c = 1$ y $d = 2.24$). Para el patrón del espacio $a_1 - \beta$ ($a_s = 0$ y $b_s = 1$) la relación (6) se cumple bien usando un $\beta c = 0.25$ ($b_0 = 1.25$ y $NDVICp = 0.11$), con $q = 0.96$ y $r = 1.46$.

Para el modelo 12 de interacciones de primer orden de la banda del R e interacciones de segundo orden para la del IRC , en la Figura 7 se muestra el espacio $a_0 - b_0$ para los experimentos del maíz y algodón. Los patrones asociados al espacio $a_1 - \beta$ permanecen inalterados si se usa una línea del suelo virtual ($a_s = 0$ y $b_s = 1$) o la real.

En la primera fase (etapa vegetativa) del crecimiento de los cultivos las constantes del modelo 12, tipo polinomio de segundo grado, tienen un patrón similar al modelo 11, pero con mayor dispersión (Figura 7), asociado al problema de inestabilidad del ajuste del polinomio a un patrón lineal. En la segunda fase del patrón entre a_0 y b_0 , en la Figura 7 el comportamiento

et al., 1985). In these experiments nadir reflectance was measured in unstressed crops using trays with different soils below the crops. In the maize experiment, the solar zenith angle during the entire sampling period varied from 17.2° to 24.2° . In the cotton experiment variations were 22.0° to 31.7° . Considering that the variations of the sun-sensor geometry were minimal and the window of illumination conditions was similar, no attempt was made to standardize the sun-sensor geometry of these experiments. Thus, the data of the two experiments were integrated under the assumption of similar conditions of solar illumination. The reflectances in the R and NIR bands are given in a 0 to 1 proportion.

In Figure 5 the iso-LAI curves, adjusted to straight lines, of the two experiments mentioned are shown. It can be observed that the adjustment of model 11 adequately characterizes the radiative interactions of the soil-vegetation system (three-dimensional case).

Figure 6 shows the model 11 patterns for the space $a_0 - 1/b_0$ and $a_1 - \beta$. In the case of the first space, a pattern similar to that of Figure 3a ($c = 1$ and $d =$

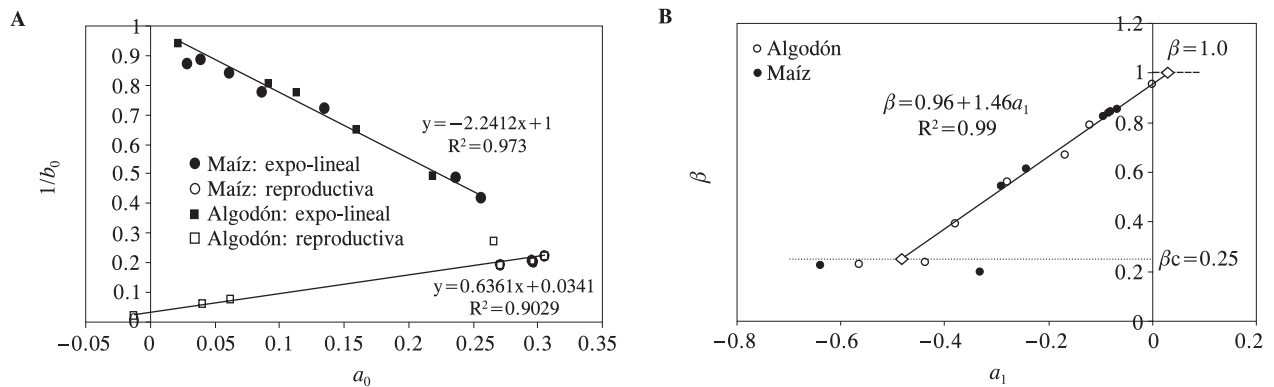


Figura 6. Patrones de las constantes de las curvas iso-IAF para el maíz (A) y algodón (B), para el espacio $a_0 - 1/b_0$ (A) y $a_1 - \beta$ (B) del modelo 11.

Figure 6. Patterns of the constants of the iso-LAI curves for maize (A) and cotton (B), for the $a_0 - 1/b_0$ (A) and $a_1 - \beta$ (B) spaces, model 11.

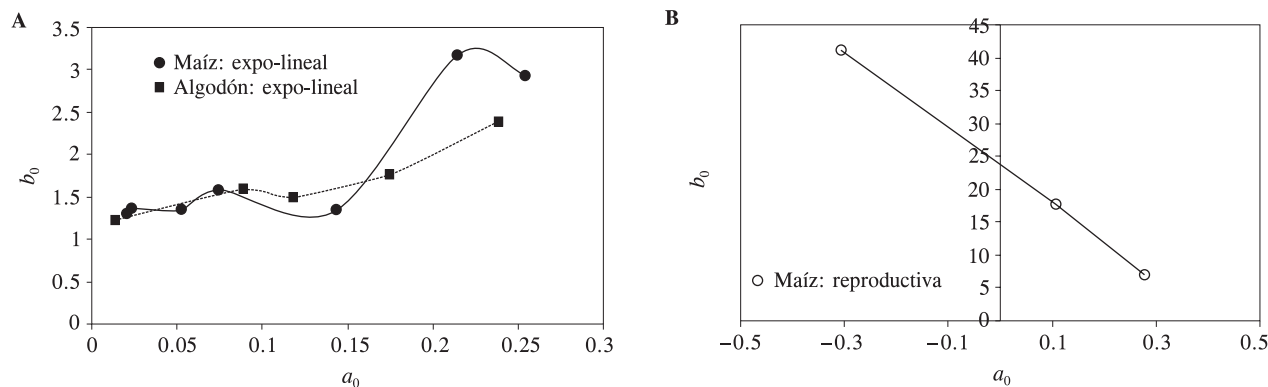


Figura 7. Patrones de las constantes de las curvas iso-LAI para el maíz (A) y algodón (B), para el espacio a_0-b_0 del modelo 12.
Figure 7. Patterns of the constants of the iso-LAI curves for maize (A) and cotton (B) for the a_0-b_0 space, model 12.

es tipo lineal y en sentido contrario al del modelo 12 (Figura 2b). En el caso del experimento con plantas de algodón, los ajustes del polinomio en esta fase fueron muy inestables, por lo que no fueron incluidos en la Figura 7.

De las Figuras 6 y 7, se puede concluir que el modelo 12 resulta en patrones incongruentes (segunda fase) con la evidencia experimental y éstos son resultado de ajustar un polinomio de segundo grado a una línea recta. Así, la complejidad del modelo 12 y modelo 22 no tienen soporte experimental (considerando un número restringido de datos experimentales) pero sí problemas de inestabilidad numérica. La propuesta del *IV_CIMAS* parece estar en el camino correcto, de acuerdo con la evidencia mostrada en la Figura 6.

Para analizar el ajuste del *IV_CIMAS* a los datos experimentales, es necesario la estimación de la pendiente b_0 directamente de las reflectancias asociadas a β , así como se realizó en *NDVICp* (Paz *et al.*, 2007). Así, si sustituimos la relación (8) en la (3) se obtiene:

$$IRC = \frac{1}{r} \{ (2 - q) + (q - 2)b_0 \} + b_0 R + \left(\frac{1}{45r} \right) \left\{ \arctan \left(\frac{b_0}{b_0 - 1} \right) \right\} (b_0 - 1) \quad (10)$$

Usando diferentes valores de R e IRC (en patrones de curvas iso-LAI), la relación (10) fue modelada en forma empírica para establecer una relación entre las reflectancias y b_0 ($R^2 = 0.98$):

$$\frac{1}{b_0} = 0.59 + 10.14R - 56.22R^2 - 6.362IRC^2 + 117.75R^3 + 6.714IRC^3 \quad (11)$$

2.24) is shown. For the pattern of space $a_1 - \beta$ ($a_S = 0$ and $b_S = 1$), relationship (6) is well satisfied using $\beta c = 0.25$ and $NDVICp = 0.11$, with $q = 0.96$ and $r = 1.46$.

For model 12 of first order interactions of the R band and second order interactions for band NIR , Figure 7 shows space $a_0 - b_0$ for the maize and cotton experiments. The patterns associated with space $a_1 - \beta$ remain unaltered whether a virtual ($a_S = 0$ and $b_S = 1$) or real soil line is used.

In the first phase (vegetative stage) of crop growth, the model 12 constants, second degree polynomial type, have a pattern similar to that of model 11 but with greater dispersion (Figure 7), associated with the problem of instability of adjusting the polynomial to a linear pattern. In the second phase of the pattern between a_0 and b_0 in Figure 7, behavior is linear in type and the direction is contrary to that of model 12 (Figure 2b). In the case of the experiment with cotton plants, adjustments of the polynomial in this phase were very unstable and so were not included in Figure 7.

From Figure 6 and 7, it can be concluded that model 12 produces patterns that are incongruent (second phase) with the experimental evidence, resulting from adjusting the second degree polynomial to a straight line. Thus, the complexity of model 12 and model 22 do not have experimental support (considering the limited number of experimental data), but they do have problems of numerical instability. The proposal of *IV_CIMAS* seems to be on the correct road, according to the evidence shown in Figure 6.

To analyze the adjustment of *IV_CIMAS* to the experimental data, it is necessary to estimate the b_0 gradient directly from the reflectances associated with β , as was done in *NDVICp* (Paz *et al.*, 2007). Thus, if we substitute relationship (8) in (3), we obtain:

En la Figura 8 se muestran el espacio $a_1 - \beta$ de las estimaciones del IV_CIMAS donde se uso un $\beta c = 0.5$ ($b_0 = 1.70$ y $NDVI_{cp} = 0.26$), representando valores de $IAF < 1.0$.

Las estimaciones del IV_CIMAS ($c = 1.0$, $d = 2.24$, $q = 0.96$ y $r = 1.46$), mejoran ligeramente las del $NDVI_{cp}$ (Paz *et al.*, 2007), lo cual es explicable si observamos que el uso del $NDVI_{cp}$ en el IV_CIMAS puede ser extendido para valores arriba de βc con buenos resultados (Figura 8).

Para poder ubicar en contexto las limitaciones del $NDVI_{cp}$ e IV_CIMAS y entender los resultados mostrados en la Figura 9, es necesario revisar las diferencias entre modelos radiativos homogéneos (medios turbios) y heterogéneos (medios tridimensionales). En los medios turbios, el patrón entre a_0 y b_0 supone dos fases de crecimiento vegetativo: una exponencial y otra lineal (Figura 2a). En el tiempo, el crecimiento del IAF puede ser ajustado por un modelo expo-lineal (Goudriaan y Monteith, 1990). Esta modelación usa la hipótesis de un medio homogéneo para su desarrollo, por lo que para el caso de medios heterogéneos las fases del crecimiento deben ser reconsideradas. En la Figura 10 se muestran los patrones del crecimiento asociados al IAF de los experimentos de maíz y algodón analizados.

El término fase reproductiva es usado para denotar un cambio en las propiedades ópticas o angulares de las hojas o la emergencia de órganos reproductivos con propiedades ópticas diferentes a las hojas. En el caso de cultivos reales (caso tridimensional de la transferencia radiativa) es claro que la modelación de la etapa vegetativa completa (fase exponencial y lineal) puede ser realizada por el $NDVI_{cp}$ e IV_CIMAS (Figura 10). El crecimiento de la vegetación y el IAF máximo requiere de la extensión de los IV para la modelación de las dos fases de los patrones entre a_0 y b_0 (Figura 6).

$$NIR = \frac{1}{r} \{ (2 - q) + (q - 2) b_0 \} + b_0 R + \left(\frac{1}{45r} \right) \left\{ \arctan \left(\frac{b_0}{b_0 - 1} \right) \right\} (b_0 - 1) \quad (10)$$

Using different values of R and NIR (in iso-LAI curve patterns), relationship (10) was modeled empirically to establish a relationship between the reflectances and b_0 ($R^2 = 0.98$):

$$\frac{1}{b_0} = 0.59 + 10.14R - 56.22R^2 - 6.362NIR^2 + 117.75R^3 + 6.714NIR^3 \quad (11)$$

Figure 8 shows space $a_1 - \beta$ of the IV_CIMAS estimations where $\beta c = 0.5$ ($b_0 = 1.70$ and $NDVI_{cp} = 0.26$) was used, representing values of $LAI < 1.0$.

The IV_CIMAS ($c = 1.0$, $d = 2.24$, $q = 0.96$, and $r = 1.46$), slightly improve those of $NDVI_{cp}$ (Paz *et al.*, 2007). This can be explained if we observe that the use of $NDVI_{cp}$ in IV_CIMAS can be extended for values above βc with good results (Figure 8).

To give context for the limitations of $NDVI_{cp}$ and IV_CIMAS and to understand the results shown in Figure 9, it is necessary to review the differences among homogeneous (turbid media) and heterogeneous (three-dimensional media) radiative models. In turbid media, the pattern between a_0 and b_0 supposes two phases of vegetative growth: one exponential and the other linear (Figure 2a). Over time, growth of LAI can be adjusted by an expo-linear model (Goudriaan and Monteith, 1990). This modeling uses the hypothesis of a homogeneous medium for its development, so that for the case of heterogeneous media the growth phases must be reconsidered. Figure 10 shows the growth

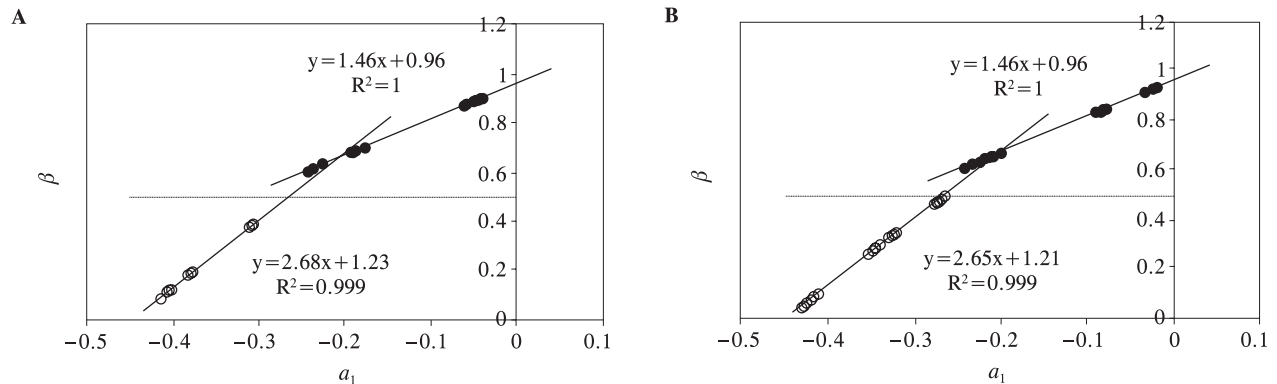


Figura 8. Patrones del espacio $a_1 - \beta$ de las reflectancias del maíz (A) y algodón (B) para el IV_CIMAS .
Figure 8. Patterns of the $a_1 - \beta$ space of the reflectance from maize (A) and cotton (B) for IV_CIMAS .

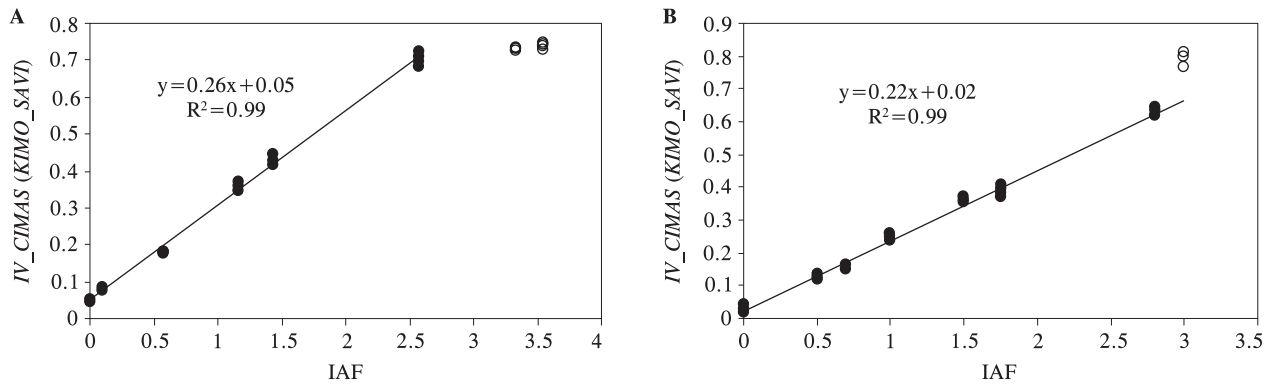


Figura 9. Relación entre el IV_CIMAS y el IAF para los experimentos de maíz (A) y algodón (B).

Figure 9. Relationship between IV_CIMAS and LAI for the experiments with maize (A) and cotton (B).

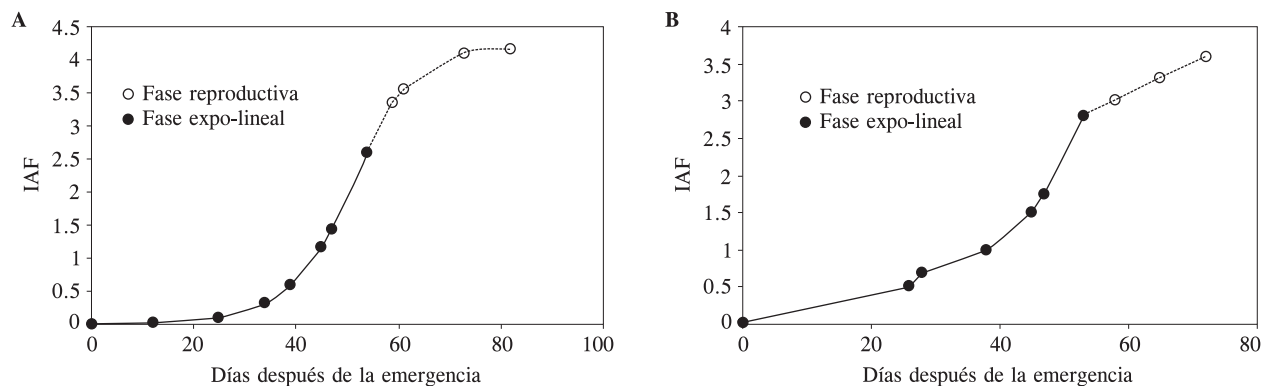


Figura 10. Patrones temporales del IAF para los experimentos de maíz (A) y algodón (B).

Figure 10. Temporal LAI patterns for the maize (A) and cotton (B) experiments.

La discusión previa pone en contexto el problema del desarrollo de los IV : aun cuando sea posible diseñar un IV que tome en cuenta, las dos fases de los patrones entre a_0 y b_0 , su construcción deberá considerar cambios en las propiedades ópticas o angulares de los elementos de la vegetación. Esto implica que la relación entre el IAF, u otra variable biofísica, y el IV será al menos bi-lineal, por lo que ningún IV de enfoque clásico puede considerarse como óptimo en el sentido generalizado que se ha definido.

Estandarización de la geometría sol-sensor

Para evitar la consideración de los efectos bidireccionales de la reflectancia, es posible estandarizar la geometría sol-sensor para dejar éstos fuera de la discusión del análisis de los IV . El modelo de Bolaños y Paz (2007)^[3], adaptado del de Bolaños *et al.* (2007), fue propuesto para tal fin y está definido por:

patterns associated with LAI of the maize and cotton experiments analyzed.

The term reproductive phase is used to denote a change in optical or angular properties of the leaves or the emergence of reproductive organs with optical properties that are different from those of leaves. In the case of real crops (three-dimensional case of radiative transfer), it is clear that modeling the complete vegetative stage (exponential and linear phases) can be done by $NDVI_{cp}$ and IV_CIMAS (Figure 10). Vegetative growth and maximum LAI require extension of the VI for modeling the two phases of the patterns between a_0 and b_0 (Figure 6).

The above discussion provides context for the problem of development of the VI , even when it is possible to design a VI that takes into account the two phases of the patterns between a_0 and b_0 , its construction should consider changes in the optical or angular properties of the elements of the vegetation.

³ Bolaños, M., y F. Paz. 2007. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. Enviado a Técnica Pecuaria en México.

$$\begin{aligned}\chi &= (90 - \theta v) + \theta s \\ \chi &= (90 + gRn)\end{aligned}\quad (12)$$

donde, θ es un ángulo cenital, v se refiere a visión y s a solar; Rn representa una reflectancia, R o IRC , normalizada [multiplicada por $\cos(\chi)$] y χ es una variable angular de posición que reduce la complejidad de la geometría sol-sensor al usar simetrías angulares. La ventaja de la relación del modelo (12) es que solo requiere un dato, entonces la constante g puede ser estimada de la reflectancia medida.

En la Figura 11 se muestra el ajuste del modelo de la relación (12) a pastizales naturales medidos en campo en Arizona, EE.UU., Mongolia, China y Durango-Chihuahua en México (discutidas en Paz y Bolaños, 2008)^[2,3].

Se deduce de la Figura 11 que el modelo propuesto se ajusta bien a las mediciones de campo, con algunos puntos problemáticos asociados a ángulos grandes de visión o solares que son difíciles de diferenciar cuando son debidos a errores de muestreo.

Las relaciones del modelo (12) permiten estandarizar a un ángulo de visión a nadir cualquier medición hecha a otro ángulo, por lo que la discusión de la sección anterior puede ser generalizada a cualquier ángulo de visión. En relación a la estandarización del ángulo cenital solar, para ángulos de visión a nadir, se puede utilizar el modelo de Paz (2006b)^[4] para este fin:

$$\begin{aligned}R(\theta s - \theta_{sx})n, n &= R \cos\{90 - (\theta s - \theta_{sx})\} \\ &= Ps(\theta s - \theta_{sx})\end{aligned}\quad (13)$$

donde, Ps es una constante; y n, n significa reflectancias normalizadas a nadir (R e IRC); θ_{sx} el ángulo

This implies that the relationship between LAI, or other biophysical variable, and the VI will be at least bi-linear, so that no classical-approach VI can be considered optimal in the general sense in which it has been defined.

Standardization of the sun-sensor geometry

To avoid considering the bi-directional effects of reflectance, it is possible to standardize the sun-sensor geometry and leave these effects out of the discussion of the analyses of VI . To this end, the model of Bolaños and Paz (2007)^[3], adapted from that of Bolaños *et al.* (2007), was proposed and is defined by:

$$\begin{aligned}\chi &= (90 - \theta v) + \theta s \\ \chi &= (90 + gRn)\end{aligned}\quad (12)$$

where θ is a zenith angle, v refers to vision and s to solar; Rn represents a reflectance, R or NIR , normalized [multiplied by $\cos(\chi)$] and χ is an angular position variable that reduces the complexity of the sun-sensor geometry using angular symmetries. The advantage of the relationship of model (12) is that it requires only one datum, so the constant g can be estimated from measured reflectance.

Figure 11 shows the adjustment of the relationship (12) model to natural grassland measured in fields in Arizona, USA; Mongolia, China; and Durango-Chihuahua, México (discussed in Paz and Bolaños, 2008)^[2,3].

It is deduced from Figure 11 that the proposed model adjusted well to field measurements, with some problem points associated with large angles of vision or solar angles, which are difficult to differentiate when they are due to errors in sampling.

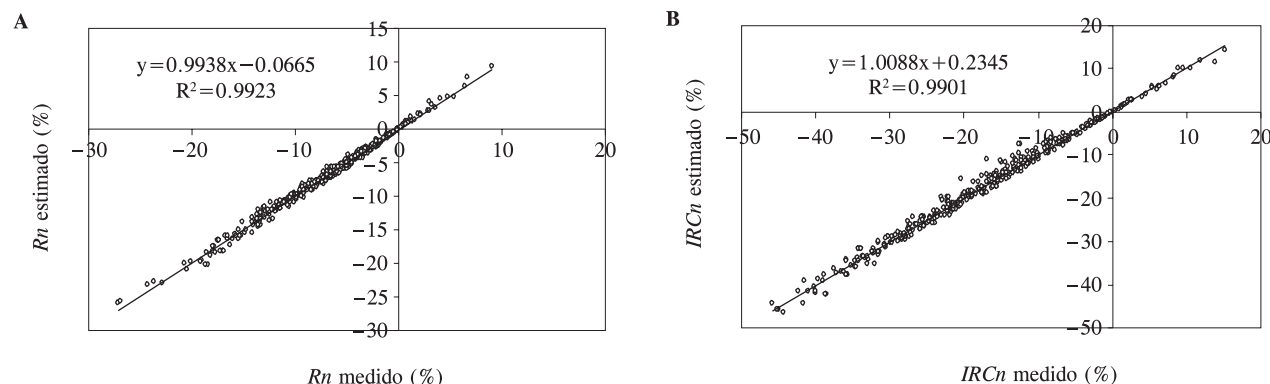


Figura 11. Ajuste del modelo de la geometría sol-sensor a pastizales de EE.UU., México y China ($n = 420$).

Figure 11. Sun-sensor geometry model fit to grasslands of the USA, México, and China ($n = 420$).

⁴ Paz, F. 2006b. Modelo generalizado de la BRDF: efecto del acimut relativo. Reporte Agosto para AGROASEMEX. 18 p.

cenital solar mínimo en el día de medición. La relación (13) asegura que $R(\theta_s - \theta_{sx})n, n = 0$ cuando $(\theta_s - \theta_{sx}) = 0$. La relación (13) fue analizada usando una base de datos del cultivo soya (*Glycine max*) (Ranson *et al.*, 1984a y b). Los ajustes experimentales al modelo son bastantes buenos en el caso de IAF=2.9 y suelo desnudo (Figuras 12 y 13).

Con la evidencia experimental se puede concluir que los efectos de la geometría sol-sensor en los IV se pueden estandarizar, de tal forma que los resultados obtenidos para un ángulo de visión a nadir y cualquier ángulo cenital de iluminación puedan ser generalizados a cualquier otra geometría sol-sensor.

Caso general de la aplicación de los índices de vegetación

Para usar los índices de vegetación para densidades del follaje (dejando fija la geometría y propiedades ópticas de las plantas), se diseñó un experimento tipo maqueta en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, en

The relationships of model (12) allow standardizing any measurement made at another angle to an angle of vision at nadir; thus the discussion of the above section can be generalized to any angle of vision. Regarding standardization of the solar zenith angle, the model of Paz (2006b)^[4] can be used for angles of vision at nadir:

$$R(\theta_s - \theta_{sx})n, n = R \cos \{90 - (\theta_s - \theta_{sx})\} = P_s(\theta_s - \theta_{sx}) \quad (13)$$

where P_s is a constant; n, n are normalized nadir reflectances (R and NIR); θ_{sx} is the minimum solar zenith angle on the measurement day. Relationship (13) assures that $R(\theta_s - \theta_{sx})n, n = 0$ when $(\theta_s - \theta_{sx}) = 0$. Relationship (13) was analyzed using a database of a soybean crop (*Glycine max*) (Ranson *et al.*, 1984a and b). Experimental adjustments to the model are very good in the case of LAI=2.9 and bare soil (Figures 12 and 13).

With the experimental evidence, it can be concluded that the effects of sun-sensor geometry in VIs can be

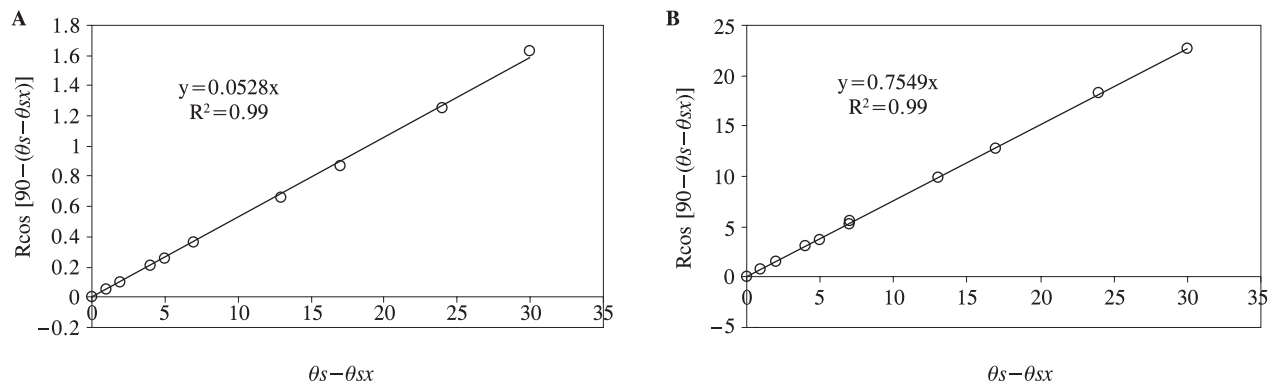


Figura 12. Ajuste del modelo de estandarización de θ_s para soya (IAF = 2.9).

Figure 12. Adjustment of the θ_s standardization model for soybeans (IAF = 2.9).

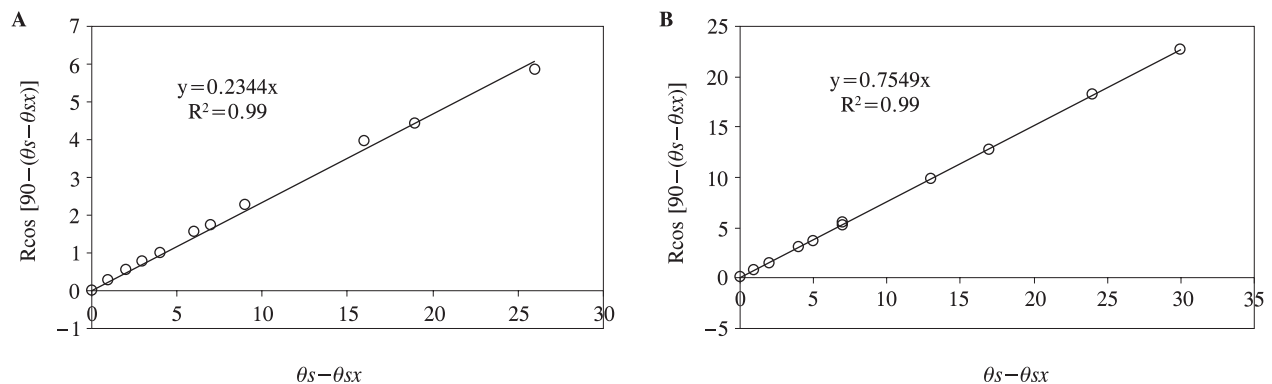


Figura 13. Ajuste del modelo de estandarización de θ_s para soya (suelo desnudo).

Figure 13. Adjustment of the θ_s standardization model for soybeans (bare soil).

septiembre de 2006. Se usaron cinco especies forestales, descritas en el Cuadro 1.

De cada especie forestal se midió su función de distribución de reflectancias bidireccionales (BRDF, por sus siglas en inglés) usando tres configuraciones geométricas (Figura 14).

Para cada especie y configuración geométrica se usaron dos suelos (claro y oscuro) como fondo y se realizaron mediciones a tres o cuatro ángulos cenitales y acimutales de iluminación. Se usó un equipo de BRDF diseñado *ex profeso* para medir ángulos de visión de 0 a 50°, con incrementos de 10°, tanto en la dirección de iluminación solar como en la contraria, obteniéndose 12 mediciones. Los ángulos de nadir se midieron dos veces: iluminación y sombreado. El equipo de BRDF mantiene constante el área de observación, reduciendo la altura de medición, para el ángulo de visión del radiómetro, en función del ángulo de visión. Se usó un radiómetro hiperspectral con rango de 350 a 2500 nm (FR Jr de ASD^{MR}). Para cada medición se tomó fotografías (Cybershot DSC-V1 de Sony^{MR}) de la cobertura de la vegetación. Con estas fotografías se obtuvo la cobertura aérea de la vegetación COB (%) mediante un proceso de clasificación supervisada. Las reflectancias hiperspectrales se convirtieron a bandas espectrales del sensor TM (Landsat 5), usando las funciones de respuesta espectrales correspondientes,

standardized in such a way that the results obtained for an angle of vision at nadir and any zenith angle of illumination can be generalized to any other sun-sensor geometry.

General case of application of vegetation indexes

To use the vegetation indexes for foliage densities (leaving the geometry and optical properties of the plants fixed), a maquette-type experiment was conducted in the installations of the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, State of México, in September 2006. Five forest species, described in Table 1 were used.

On each forest species its bi-directional reflectance distribution function (BRDF) was measured using three geometric configurations (Figure 14).

For each species and geometric configuration two soils (light and dark) were used as background, and three or four zenith and azimuth illumination angles were measured. BRDF equipment, designed specifically to measure angles of vision of 0° to 50°, with increments of 10°, in both the direction of solar illumination and the opposite direction; 12 measurements were obtained. Nadir angles were measured twice: illuminated and shaded. The BRDF equipment maintains the area of observation almost

Cuadro 1. Características de las especies forestales del experimento.

Table 1. Characteristics of the forest species of the experiment.

Nombre común	Nombre científico	Tipo de hoja	Altura [†] (cm)	Diámetro de copa [†] (cm)	Diámetro basal [†] (mm)
Oyamel	<i>Abies religiosa</i>	Acicular	38.1 (9.3)	24.4 (2.7)	5.74 (0.6)
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	Ancha	75.6 (11.5)	37.8 (7.9)	9.7 (1.5)
Encino	<i>Quercus rugosa</i>	Ancha	73.9 (9.7)	21.6 (3.9)	6.92 (0.9)
Pino greggii	<i>Pinus greggii</i>	Acicular	34.2 (3.0)	14.5 (3.1)	4.8 (0.4)
Pino montezumae	<i>Pinus montezumae</i>	Acicular	8.9 (4.1)	41.8 (3.7)	11.34 (1.4)

[†] Los datos entre paréntesis son la desviación estándar.

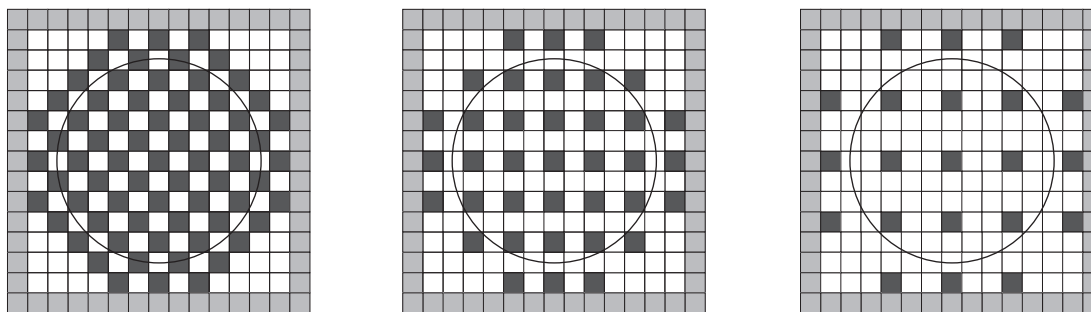


Figura 14. Configuraciones geométricas de los experimentos, donde cada cuadro sombreado representa la posición de una planta y los cuadros con sombreado más claro del perímetro no son usados. El círculo en la figura corresponde al área de medición.

Figure 14. Geometric configurations of the experiments, in which each shaded square represents the position of a plant and the perimeter squares with lighter shading are not used. The circle in the figure delimits the area of measurement.

después de eliminar valores con problemas de vapor de agua atmosférico, aunque en el caso de la banda del *IRC* quedaron algunos ruidos residuales.

Efectos de la geometría sol-sensor y su modelación

En el experimento con sistemas arbolados en condiciones de iluminación natural, las mediciones en la dirección de iluminación solar resultaron muy problemáticas debido a cambios constantes en las condiciones de radiación (componentes directas y difusas). Por lo anterior sólo se presentan los análisis de las mediciones con ángulos de visión en el lado sombreado, donde el efecto de los cambios en la radiación son mínimos.

En la Figura 15a se muestran los resultados de ajustar el modelo de la geometría sol-sensor a todas las bandas (A o azul; V o verde; R o roja; IRC o infrarrojo cercano; IRM1 o infrarrojo medio 1; IRM2 o infrarrojo medio 2) del sensor TM del satélite LANDSAT. En la Figura 15b se muestran los resultados de las estimaciones de la reflectancias normalizadas a nadir (Rn,n) para las bandas del *R* e *IRC*.

Estructura de los patrones espectrales de igual vegetación

Con el supuesto de que las propiedades angulares y ópticas de los elementos de la vegetación son similares (todas las densidades de arbolado), a diferencia de los experimentos de maíz y algodón donde hubo cambios en la fase reproductiva, para un mismo sistema arbolado el cambio en la densidad es equivalente a un crecimiento en el tiempo. Así, se pueden generar curvas iso-vegetación en forma artificial y analizar sus patrones en los espacios espectrales.

constant, reducing height of measurement for the angle of vision of the radiometer, in function of the angle of vision. A hyperspectral radiometer was used with a range of 350 to 2500 nm (FR Jr, ASD^{MR}). For each measurement photographs were taken (Cybershot DSC-V1, Sony^{MR}) of the vegetation cover. With these photographs, aerial vegetation cover, COB (%), was obtained using a supervised classification process. The hyperspectral reflectances were converted to spectral bands of the TM sensor (LANDSAT 5), using the corresponding spectral response functions after eliminating values with problems of atmospheric water vapor, although in the case of the *NIR* band some residual noise remained.

Effects of sun-sensor geometry and its modeling

In the experiment with tree systems under conditions of natural illumination, the measurements in the direction of solar illumination were problematic due to constant changes in conditions of radiation (direct and diffused components). For this reason, we present only the analyses of the measurements with angles of vision on the shaded side, where the effect of changes in radiation is minimal.

Figure 15a shows the results of adjusting the sun-sensor geometry model to all of the bands (blue, green, red, near infrared, infrared medium 1, infrared medium 2) of the LANDSAT satellite TM sensor. Figure 15b shows the results of estimations of normalized nadir reflectance (Rn,n) for the *R* and *NIR* bands.

Structure of spectral patterns of equal vegetation

With the assumption that angular and optical properties of elements of the vegetation are similar

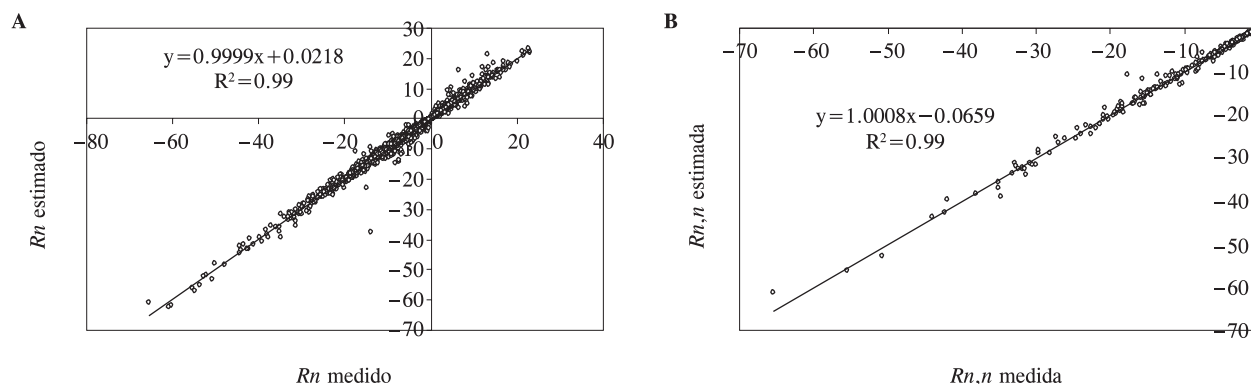


Figura 15. (A) Ajuste del modelo de la geometría sol-sensor para todas las bandas del sensor TM ($n = 4140$) y (B) ajuste para las reflectancias normalizadas a nadir del *R* e *IRC* ($n = 242$).

Figure 15. (A) Adjustment of the sun-sensor geometry model for all the bands of the TM sensor ($n = 4140$) and (B) fit for the normalized nadir reflectance of *R* and *NIR* ($n = 242$).

Considerando que los análisis están orientados a la parte sombreada de la geometría sol-sensor, se puede suponer que los cambios en los ángulos cenitales de iluminación solo provocan cambios en el sombreado de los suelos (cambios mínimos en la vegetación), de tal manera que sus efectos se traducen en desplazamientos sobre la línea de igual vegetación, generando así puntos adicionales para caracterizar las constantes de estas líneas.

En la Figura 16a se muestran las curvas espectrales de igual vegetación (cobertura aérea) para el caso del sistema de *Pinus gregii* (dos suelos de fondo de la vegetación, cuatro ángulos cenitales solares y tres densidades del follaje). Los supuestos discutidos anteriormente se cumplen razonablemente para todos los casos de sistemas arbolados.

En la Figura 16b se muestran los sistemas arbolados donde había puntos en la parte negativa de a_1 , para tener una visión más completa de los patrones estructurales. Los resultados muestran que la relación $a_1 - \beta$ es diferente para cada especie (incluyendo las no mostradas en la Figura 16b); aunque hay cierta similitud entre las constantes de esta relación. Dejando fijas las constantes de la línea del suelo, las constantes de la relación entre $a_1 - \beta$ son fundamentalmente función de las propiedades ópticas y geométricas de las hojas.

La cobertura aérea de la vegetación en la etapa vegetativa del crecimiento es independiente de las propiedades ópticas de las hojas y sólo dependiente de la geometría de las plantas y de su arreglo (follaje) en una parcela, por lo que es esperada una relación lineal entre β y COB. En la Figura 17a se muestran estas relaciones para los sistemas arbolados de la Figura 16b, donde el patrón lineal está bien definido (las constantes son dependientes de las constantes de las líneas del suelo y cuando se usa $a_s = 0$ y $b_s = 1$ el origen es

(all the tree densities), unlike the experiments with maize and cotton where there were changes in the reproductive phase, for a single tree system the change in density is equivalent to growth over time. Thus, iso-vegetation curves can be generated artificially and their patterns in the spectral spaces can be analyzed.

Considering that the analyses are oriented toward the shaded part of the sun-sensor geometry, it can be assumed that the changes in the zenith angles of illumination cause changes only in the shaded part of the soils (minimal changes in vegetation). In this way, the effects are translated into displacements over the line of equal vegetation, thus generating additional points for characterizing the constants of these lines.

Figure 16a shows the spectral curves of equal vegetation (aerial cover) for the case of the *Pinus gregii* system (two background soils, four solar zenith angles and three foliage densities). The assumptions discussed previously are reasonably satisfied for all cases of tree systems.

Figure 16b shows the tree systems where there were points in the negative part of a_1 , for a more complete vision of the structural patterns. The results show that the relationship $a_1 - \beta$ is different for each species (including those not shown in Figure 16b), although there is certain similarity between the constants of this relationship. Leaving the soil line constants fixed, the constants of the relationship between $a_1 - \beta$ are fundamentally in function of the optical and geometric properties of the leaves.

The aerial cover of the vegetation in the vegetative growth stage is independent of the optical properties of the leaves and depends only on plant geometry and on their array (foliage) in a plot; thus a linear relationship between β and COB is expected. Figure 17a shows these relationships for the tree systems of

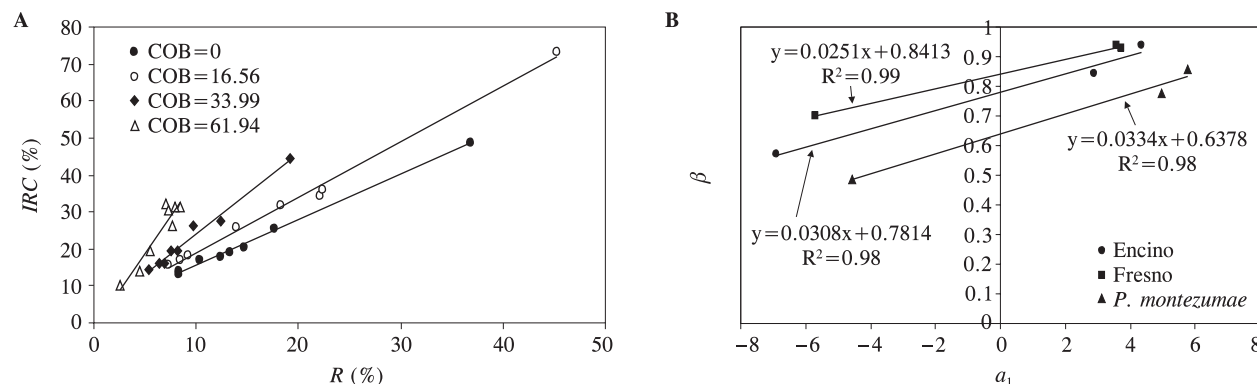


Figura 16. (A) Curvas de igual vegetación en el espacio del R -IRC para *P. gregii* y (B) espacio $a_1 - \beta$ (misma línea del suelo) para los sistemas de encino, fresno y *P. montezumae* (reflectancias en %).

Figure 16. (A) Equal vegetation curves in the R -NIR space for *P. gregii* and (B) $a_1 - \beta$ space (same soil line) for oak, ash, and *P. montezumae* systems (reflectance in %).

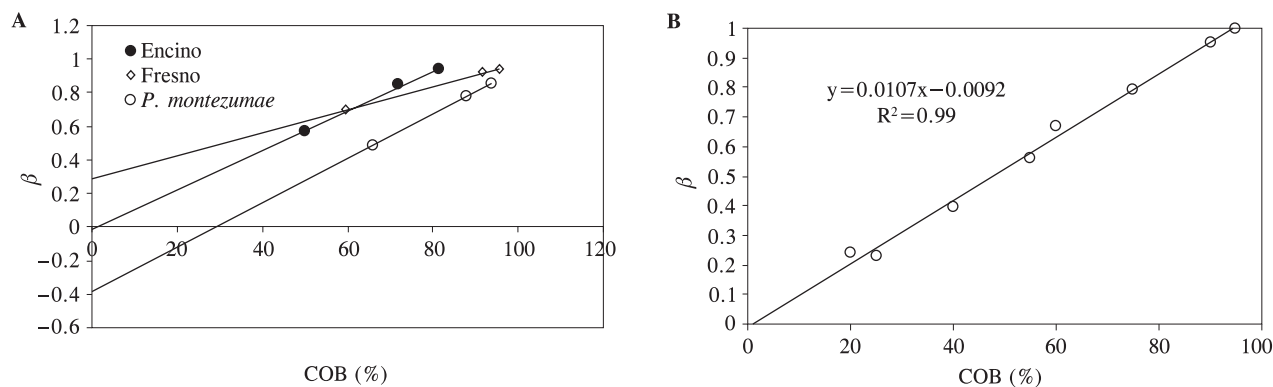


Figura 17. (A) Relación entre COB y β para el sistema arbolado encino, fresno y *P. montezumae* y (B) para el experimento de algodón.

Figure 17. Relationship between COB and β (A) for the tree system of oak, ash, and *P. montezumae* and (B) for the cotton experiment.

diferente de cero — caso actual). Como referencia, en la Figura 17b se muestra la relación entre β y COB para el experimento de algodón (Huete *et al.*, 1985) analizado previamente (constantes medidas de la línea del suelo).

CONCLUSIONES

La modelación y estandarización de la geometría sol-sensor es confiable usando el modelo de Bolaños y Paz, lo que permite el uso robusto de información bi-direccional de diferentes satélites en operación (SPOT, TERRA/AQUA, NOAA).

La evidencia experimental asociada a los patrones espectrales de las curvas de vegetación similar a la natural permite concluir que: a) ningún *IV* modela en forma adecuada las dos fases asociadas a los patrones entre a_0 y b_0 , ya sea que representen una fase exponencial y lineal en la etapa vegetativa o una fase expo-lineal y una reproductiva; b) aun cuando se puede aproximar la estructura de los patrones entre a_0 y b_0 , el parametrizar esta relación conlleva el uso de constantes empíricas que pueden ser diferentes para cada cultivo o tipo de vegetación, lo que hace problemático este enfoque.

El problema asociado a la dificultad del desarrollo de *IV* generales es la estructura del espacio $a_0 - b_0$, y sus transformaciones, aumentando la complejidad de modelación y difícil de realizar. Como consecuencia, es necesario el replanteamiento de los esquemas de generación de índices espectrales de la vegetación más generalizados y no dependiente de constantes empíricas y válidos para algunos cultivos o vegetación natural.

Se puede concluir que el uso de los sensores remotos aún no es confiable y robusto, y constituye, aún una problemática en discusión, independiente de

Figure 16b, where the linear pattern is well defined (the constants are dependent on the constants of the soil lines, and when $a_s = 0$ and $b_s = 1$, the origin is different from zero —present case). As a reference, Figure 17 b shows the relationship between β and COB for the experiment with cotton (Huete *et al.*, 1985) analyzed previously (constants measured from the soil line).

CONCLUSIONS

Modeling and standardization of sun-sensor geometry is reliable using the model of Bolaños and Paz, permitting the robust use of bi-directional information from different satellites in operation (SPOT, TERRA/AQUA, NOAA).

The experimental evidence associated with the spectral patterns of the curves of vegetation similar to natural vegetation allows us to conclude that a) no *VI* adequately models the two phases associated with the patterns between a_0 and b_0 , whether they represent an exponential and linear phase in the vegetative stage or an expo-linear phase and reproductive phase; b) even when the structure of the patterns between a_0 and b_0 can be approximated, parameterization of this relationship leads to the use of empirical constants that can be different for each crop or vegetation type, making this approach problematic.

The problem associated with the difficulty of developing general *VI*s is the structure of the $a_0 - b_0$ space and its transformations, which increase modeling complexity and make it difficult to do. Consequently, it is necessary to revise the schemes in order to generate more generalized spectral vegetation indexes that are not dependent on empirical constants and are valid for some crops or natural vegetation.

la gran cantidad de enfoques empíricos utilizados en el campo de las aplicaciones.

LITERATURA CITADA

- Baret F., and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environ.* 35: 161-173.
- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environ.* 46: 213-222.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Gao, X., A. R. Huete, W. Ni, and T. Miura. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environ.* 74: 609-620.
- Goudriaan, J., and J. L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann. Bot.* 66: 695-701.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environ.* 17: 35-53.
- Leprieur, D., M. M. Verstraete, and B. Pinty. 1994. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve cover from AVHRR data. *Remote Sensing Rev.* 10: 265-284.
- 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

It can be concluded that the use of remote sensors is still not reliable or robust and is still debatable, regardless of the large number of empirical approaches used in the field of applications.

—End of the English version—



- 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.
- Qi J., Chehbouni A., A. R. Huete, Y. H. Kerr, and S. Sorooshian. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environ.* 48: 119-126.
- Ranson, K. J., L. L. Biehl, and M. E. Bauer. 1984a. Variation in spectral response of soybeans with respect to illumination, view and canopy geometry, LARS Technical Report 073184, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. 24 p.
- Ranson, K. J., L. L. Biehl, and M. E. Bauer. 1984b. Soybean canopy reflectance modeling data sets, LARS Technical Report 071584, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. 46 p.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environ.* 8: 127-150.