

LIMITACIONES EN LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES BIOFÍSICAS EN CULTIVOS USANDO ÍNDICES DE VEGETACIÓN ESPECTRALES: EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FOLLAJE

LIMITATIONS IN THE ESTIMATION OF BIOPHYSICAL VARIABLES IN CROPS USING SPECTRAL VEGETATION INDEXES: FOLIAGE DENSITY EFFECT

Magali Odi-Lara¹, Fernando Paz-Pellat^{1*}, Ramón López-Urrea², José González-Piqueras³

¹Colegio de Postgraduados. 56230. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México. (pellat@colpos.mx) (olmaria@colpos.mx). ²Instituto Técnico Agronómico Provincial. 02006. Avenida Gregorio Arcos s/n. Albacete, España (rlu.itap@dipualba.es). ³Instituto de Desarrollo Regional, Universidad Castilla La Mancha. 02071. Campus universitario s/n, Albacete, España (jose.gonzalez@uclm.es).

RESUMEN

En cultivos con una densidad alta del follaje, se produce la saturación rápida de la banda del rojo y la reducción de las variaciones en las pendientes de las curvas de igual vegetación (iso-IAF), en las que están basados muchos índices de vegetación (IV). Por ello, es importante el desarrollo de índices alternativos que no presenten problemas de saturación y sean fácilmente parametrizados con información de campo. Con este fin se evalúan los patrones temporales (modelo expo-lineal como referencia) de índices espectrales basados en las pendientes de las líneas iso-IAF, así como los de variables biofísicas: biomasa aérea (Bm), cobertura aérea (fv) y altura (h) de dos cultivos con diferente densidad del follaje, alta (sorgo) y media (algodón). Al aplicar un modelo expo-lineal se espera que presenten un patrón bilineal siempre que exista coincidencia de las variables en las fases de inicio y final. En general, las fases exponencial y lineal de la Bm no coinciden con las de fv y h, mostrando diferencias entre las características estructurales y de distribución espacial de la vegetación (fv y h) y la función fotosintética (follaje y biomasa). El cultivo de densidad media presenta patrones bilineales bien caracterizados; en cambio, el de alta densidad muestra una rápida saturación en la fase exponencial de la Bm. Para reducir el problema de saturación, se exploró el uso de la constante aditiva a_0 como alternativa de los índices basados en la pendiente. La relación entre la constante aditiva y Bm presentó patrones de tipo expo-lineal doble con problemas en la definición de sus transiciones; las relaciones con la variable fv fueron bilineales, tanto para el cultivo de densidad media como para el de densidad alta, permitiendo una parametrización fácil en

ABSTRACT

High density foliage crops produce the rapid saturation of the red band and reduction of variations in curve slopes of the same vegetation (iso-LAI), on which many vegetation indexes (VI) are based. For this reason, it is important to develop alternative indexes that do not become saturated and that are easily parameterized with information from the field. To this end, temporal patterns of spectral indexes (expo-linear model as reference) were evaluated based on the slopes of the iso-LAI lines, as well as the biophysical variables aerial biomass (Bm), aerial cover (fv) and height (h) of two crops with different foliage density: high (sorghum) and medium (cotton). When an expo-linear model is applied, it is expected that it would have a bi-linear pattern, as long as the variables coincide in their initial and end phases. In general, the Bm exponential and linear phases do not coincide with those of fv and h; this shows that there are differences among the structural characteristics, those of spatial vegetation distribution (fv and h), and photosynthetic function (foliage and biomass). The medium density crop exhibited well-characterized bilinear patterns. In contrast, the high density crop saturated rapidly in the exponential phase of Bm. To reduce the problem of saturation, the use of the additive constant a_0 was explored as an alternative to the indexes based on slope. The relationship between the additive constant and Bm exhibited patterns of the double expo-linear type with problems in the definition of its transitions; the relationship with the variable fv were bi-linear, both for the medium density crop and for the high density crop, thus facilitating parameterization the vegetation indexes (use of fv) in the field; with height, the relationship was linear-exponential.

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2009. Aprobado: Julio, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 807-819. 2010.

Key words: vegetation indexes, foliage density, iso-vegetation lines, sorghum.

campo de los índices de vegetación (uso de fv); con la altura la relación fue lineal-exponencial.

Palabras clave: índices de vegetación, densidad foliar, líneas iso-vegetación, sorgo.

INTRODUCCIÓN

La biomasa para energía se obtiene de cultivos energéticos (alta densidad de siembra), cuya ventaja fundamental es el control de la disponibilidad y acopio. En consecuencia, es necesaria una herramienta operativa para monitorear los cultivos energéticos y evaluar variables biofísicas como la biomasa aérea seca (Bm), el índice de área foliar (IAF), altura (h) y cobertura de la vegetación (fv) que permitan su manejo estratégico.

La tecnología de los sensores remotos permite el seguimiento del crecimiento y desarrollo de la vegetación, mediante relaciones empíricas calculadas entre las variables biofísicas de los cultivos y los índices de vegetación espectrales (IV) (Verstraete y Pinty, 1996). La mayoría de los IV están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación (Tucker, 1979). Los índices de vegetación están influenciados principalmente por los efectos atmosféricos, la geometría sol-sensor y la mezcla suelo-vegetación. En particular, la variación en el brillo y color del suelo de fondo es muy importante para determinar variables biofísicas. Para reducir el efecto se han diseñado diferentes IV que minimizan la respuesta del índice a una misma cantidad de cubierta vegetal variando las condiciones del suelo de fondo, como los índices GESAVI (Gilbert *et al.*, 2002) y el NDVIcp (Paz *et al.*, 2007), cuyo rango de validez está limitado hasta una primera fase exponencial de los patrones (geometría o funciones) espectrales asociados al crecimiento de la vegetación (curvas iso-IAF). Romero *et al.* (2009) generalizan el NDVIcp para el caso de las fases exponencial y lineal (hasta el IAF máximo) usando el índice IV_CIMAS. Los índices NDVIcp e IV_CIMAS están diseñados en función de los patrones espectrales de las líneas iso-IAF y son versiones mejoradas de otros índices publicados (Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), bajo el mismo esquema de modelación.

En el caso de cultivos energéticos la densidad del follaje de la vegetación es muy alta, provocando la saturación rápida de la banda del R, así como un efecto

INTRODUCTION

Biomass for the production of energy is obtained from energy crops (high sowing density), whose primary advantage is control of availability and stocks. Consequently, an operational tool is necessary to monitor energy crops and evaluate biophysical variables such as dry aerial biomass (Bm), leaf area index (LAI), height (h) and plant cover (fv) that permits their strategic management.

Remote sensing technology can monitor growth and development of vegetation using calculated empirical relationships between crop biophysical variables and spectral vegetation indexes (VI) (Verstraete and Pinty, 1996). Most of the VI are based on high contrast between the red band (R) and the near infrared band (NIR) for vegetation (Tucker, 1979). Vegetation indexes are affected principally by atmospheric effects, sun-sensor geometry, and the soil-vegetation mixture. Variation in brilliance and background soil color is particularly important in determining biophysical variables. To reduce the effect, different IV have been designed to minimize the response of the index to a single amount of plant cover, varying the conditions of the background soil, such as the indexes GESAVI (Gilbert *et al.*, 2002) and NDVIcp (Paz *et al.*, 2007), whose validity range is limited up to a first exponential phase of the spectral patterns (geometry or functions) associated with vegetation growth (iso-LAI curves). Romero *et al.* (2009) generalize NDVIcp for the case of the exponential and linear phases (up to the maximum LAI) using the index IV_CIMAS. The indexes NDVIcp and IV_CIMAS are designed in function of the spectral patterns of the iso-LAI lines and are improved versions of other published indexes (Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), under the same modeling scheme.

In the case of energy crops, foliage of the vegetation is very dense, causing rapid saturation of the R band, as well as a reduction effect in the variations of the slopes of the iso-LAI curves on which NDVIcp, IV_CIMAS, and many other VI are based. This situation emerged the need for alternative indexes development that do not present the above saturation problems and be parametrized with field information (fv), without recourse to general empirical constants as in the case of NDVIcp and IV_CIMAS.

de reducción de las variaciones en las pendientes de las curvas iso-IAF, en las que está basado el NDVIcp, IV_CIMAS y muchos otros IV. De esta situación emerge la necesidad del desarrollo de índices alternativos que no presenten los problemas de saturación mencionados y puedan ser fácilmente parametrizados con información de campo (fv), sin necesidad de recurrir a constantes empíricas generales como en el caso del NDVIcp e IV_CIMAS.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar las limitaciones de los IV basados en las pendientes de las líneas iso-IAF, en un marco general de comparación usando el modelo expo-lineal del crecimiento de la vegetación, así como proponer un esquema alternativo de IV basados en las constantes aditivas (intersecciones con el eje del IRC) de las líneas iso-IAF. Para esto se analiza un cultivo de densidad de follaje media (algodón) y uno de alta densidad (sorgo).

Modelación de los patrones temporales de las variables biofísicas

La revisión de los patrones temporales de las variables biofísicas y espectrales permite analizar los problemas asociados a la falta de correlación entre ellas (patrones temporales desacoplados).

El modelo expo-lineal de Goudriaan y Van Laar (1994) permite modelar las dos fases (exponencial y lineal) del crecimiento de la vegetación en el tiempo (Bm, IAF, fv, h, representadas en forma general por la variable V).

$$V(t) = \frac{C}{r} \ln \{1 + \exp [r(t - t_L)]\} \quad (1)$$

Con las siguientes características:

$$\begin{aligned} V(t = t_T) &= \frac{C}{r} \\ t_T &= t_L + \frac{0.541}{r} \end{aligned} \quad (2)$$

donde r es la tasa relativa de crecimiento; C es la tasa máxima de crecimiento; t_L es el tiempo cuando $V(t) = 0$ en la fase lineal y t_T es el tiempo donde $rV = C$.

El modelo expo-lineal tiene bases biofísicas para modelar el IAF (aproximación de medio homogéneo

This study was conducted to evaluate the limitation of the VI based on iso-LAI line slopes, within a general framework of comparison using the expo-linear model of vegetation growth, and to propose an alternative scheme of VI based on additive constants (intersections with the NIR axis) of the iso-LAI lines. A medium foliage density crop (cotton) and a high foliage density crop (sorghum) are analyzed.

Modeling the temporal patterns of the biophysical variables

Reviewing the temporal patterns of the biophysical and spectral variables permits analysis of the problems associated with their lack of correlation (non-overlapping temporal patterns).

The expo-linear model of Goudriaan and Van Laar (1994) can model the two vegetation growth phases (exponential and linear) over time (Bm, LAI, fv, h, represented generally by the variable V).

$$V(t) = \frac{C}{r} \ln \{1 + \exp [r(t - t_L)]\} \quad (1)$$

With the following characteristics

$$\begin{aligned} V(t = t_T) &= \frac{C}{r} \\ t_T &= t_L + \frac{0.541}{r} \end{aligned} \quad (2)$$

Where r is the relative growth rate; C is the maximum growth rate; t_L is the time when $V(t) = 0$ in the linear phase; and t_T is the time when $rV = C$.

The expo-linear model has biophysical bases for modeling LAI (approximation of the homogeneous medium in physical terms, and turbid medium in radiative terms) (Ferrandino, 1989). Using a linear relationship between LAI and Bm, this equation has been extended for the case of Bm (Goudriaan and Monteith, 1990).

Modeling the spectral crop growth patterns

The spectral patterns associated with crop growth can be used to develop optimal vegetation

en términos físicos y de medio turbio en términos radiativos) (Ferrandino, 1989). Usando una relación lineal entre el IAF y la Bm, esta ecuación ha sido extendida para el caso de la Bm (Goudriaan y Monteith, 1990).

Modelación de los patrones espectrales del crecimiento de los cultivos

Los patrones espectrales asociados al crecimiento del cultivo pueden ser usados para el desarrollo de índices de vegetación (IV) óptimos (Paz *et al.*, 2007). Paz *et al.* (2005) detallan las simulaciones radiativas asociadas al incrementar el IAF, usando diferentes propiedades ópticas (reflectancias) de los suelos, en el espacio espectral del R-IRC. Para la misma cantidad de vegetación (iso-IAF, iso-Bm, iso-h o iso-fv), con diferentes propiedades del suelo se definen líneas rectas con parámetros a_0 y b_0 (constante aditiva y multiplicativa, respectivamente). El patrón asociado a la relación entre los parámetros a_0 - b_0 es de tipo exponencial para valores del IAF menores a 1-2 (dependientes de la densidad de siembra y arquetipo del cultivo), seguido por un cambio de pendiente donde la relación es de tipo lineal (IAF > 2.5). El diseño de IV se ha enfocado en aproximar b_0 debido a que presenta un patrón creciente respecto al IAF.

Paz *et al.* (2005 y 2007) proponen los índices β y NDVI_{cp} como una aproximación a los cambios de las variables biofísicas asociados a cambios en la pendiente de las líneas de igual vegetación. El NDVI_{cp} está definido por:

$$\begin{aligned} NDVI_{cp} &= \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \\ \frac{1}{b_0} &= c + da_0 \end{aligned} \quad (3)$$

donde c y d son constantes empíricas, aproxima bien la fase exponencial de la relación a_0 - b_0 . El índice β aproxima bien la segunda fase (IAF grandes hasta un IAF cercano a 1.0) se define:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{90 - \arctan(b_1)}{45} \\ b_1 &= \frac{b_0}{b_0 - b_s} \\ a_1 &= a_0(1 - b_1) + a_s b_1 \end{aligned} \quad (4)$$

indexes (VI) (Paz *et al.*, 2007). Paz *et al.* (2005) describe in detail the radiative simulations associated when LAI increases using different optical properties (reflectances) of soils in the R-NIR spectral space. For the same quantity of vegetation (iso-LAI, iso-Bm, iso-h, or iso-fv), with different soil properties straight lines are defined with parameters a_0 and b_0 (additive and multiplicative constants, respectively). The pattern associated with the relationship between parameters a_0 and b_0 is of exponential type for LAI values below 1-2 (depending on sowing density and crop archetype), followed by a change in slope in which the relationship is of a linear type (LAI > 2.5). The VI design has focused in approximating b_0 since it has an upward pattern, relative to the LAI.

Paz *et al.* (2005; 2007) propose the β and NDVI_{cp} indexes as an approximation to the changes in biophysical variables associated with changes in the slopes of lines of equal vegetation. NDVI_{cp} is defined by

$$\begin{aligned} NDVI_{cp} &= \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \\ \frac{1}{b_0} &= c + da_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Where c and d are empirical constants, it approximates well the exponential phase of the relationship a_0 - b_0 . The β index well approximates the second phase (large LAI up to nearly 1.0) is defined by:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{90 - \arctan(b_1)}{45} \\ b_1 &= \frac{b_0}{b_0 - b_s} \\ a_1 &= a_0(1 - b_1) + a_s b_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Where a_s and b_s correspond to the soil line parameters and a_1 and b_1 are the intersection and slope of the iso-LAI lines in the dNIR-NIR, where dNIR = NIR - ($a_s + b_s R$).

Based on these relationships, Romero *et al.* (2009) propose the fusion of the two indexes to approximate the complete pattern in the parametric space a_0 - b_0 (slopes b_0 and β), generating the IV-CIMAS index.

donde, a_S y b_S corresponden a los parámetros de la línea del suelo y a_1 y b_1 son la intersección y pendiente de las líneas iso-IAF en el espacio dIRC-IRC, donde $dIRC = IRC - (a_S + b_S R)$.

A partir de estas relaciones, Romero *et al.* (2009) proponen la fusión de los dos índices, para aproximar el patrón completo en el espacio paramétrico a_0 - b_0 (pendientes b_0 y β), generando el índice IV_CIMAS:

$$\begin{aligned} IV_CIMAS &= NDVI_{cp}(b_0), \text{ si } \beta \leq \beta_c \\ IV_CIMAS &= NDVI_{cp}(\beta), \text{ si } \beta > \beta_c \end{aligned} \quad (5)$$

donde, β_c es un valor umbral (generalmente $\beta_c = 0.25$). El $NDVI_{cp}(\beta)$ se estima desde la perspectiva del comportamiento lineal del patrón a_0 - b_0 , usando la pendiente β (Romero *et al.*, 2009).

MATERIALES Y MÉTODOS

En el caso de densidad media del follaje se analizó un cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum* L.). Se tomaron medidas espectrales con diferentes suelos debajo del cultivo, Bm, IAF, h y fv. Los detalles del experimento están en Huete *et al.* (1985).

Experimento del cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. 'H-133') de alta densidad del follaje

El experimento se efectuó en la finca experimental Las Tiesas del Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, España (39° 14' N, 2° 5' O; 695 m). El clima es semiárido, continental, con una precipitación media anual de 320 mm. Las temperaturas media, máxima y mínima son 13.7, 24 y 4.5 °C. La profundidad media del suelo de la parcela del experimento fue 40 cm, limitado por un horizonte petrocálcico que se encuentra más o menos fragmentado. La textura es franco-arcillo-limosa (13.42 % arena, 48.89 % limo y 37.69 % arcilla) y el pH es básico. El suelo es pobre en materia orgánica y en nitrógeno total, con un alto contenido en caliza activa y potasio.

Las medidas se hicieron en un lisímetro de pesada continua usado para la rotación de cultivos estacionales (López-Urrea *et al.*, 2009), ubicado dentro de una parcela de protección de 10 000 m² donde el cultivo en estudio crece en condiciones óptimas, sin restricciones de agua y nutrientes. El sistema automatizado de riego es por aspersión.

El sorgo se sembró el 23 de mayo y se cosechó el 8 de octubre de 2007. El marco de siembra fue 50×10 cm. La densidad final de plantas fue 115 000 plantas ha⁻¹ aproximadamente. La altura

$$\begin{aligned} IV_CIMAS &= NDVI_{cp}(b_0), \text{ if } \beta \leq \beta_c \\ IV_CIMAS &= NDVI_{cp}(\beta), \text{ if } \beta > \beta_c \end{aligned} \quad (5)$$

Where β_c is a threshold value (generally $\beta_c = 0.25$). $NDVI_{cp}(\beta)$ is estimated from the perspective of the linear behavior of the pattern a_0 - b_0 , using the β slope (Romero *et al.*, 2009).

MATERIALS AND METHODS

For the case of medium foliage density, a cotton (*Gossypium hirsutum* L.) crop was analyzed. Spectral measurements were taken with different soils under the crop: Bm, LAI, h and fv. Details of the experiment are given in Huete *et al.* (1985).

Experiment with high foliage density sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv 'H-133')

The experiment was conducted on the experimental farm Las Tiesas of the Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, España (39° 14' N, 2° 5' W; 695 m). The climate is semi-arid, continental, with mean annual precipitation of 320 mm. The mean, maximum and minimum temperatures are 13.7, 24, and 4.5 °C. Mean soil depth of the experimental plot was 40 cm, limited by a petrocalcic horizon that is more or less fragmented. Texture is loam-clay-silt (13.42 % sand, 48.89 % silt and 37.69 % clay) and pH is alkaline. The soil is poor in organic matter and total nitrogen, with a high content of active limestone and potassium.

The measurements were done in a continuous weighing lysimeter used for seasonal crop rotation (López-Urrea *et al.*, 2009), located inside a protected plot 10 000 m², where the crop under study grew in optimal conditions with no restrictions of water or nutrients. Automated irrigation is applied with a sprinkler system.

The sorghum was planted on May 23 and harvested October 8, 2007. The planting frame was 50×10 cm, and final plant density was 115 000 plants ha⁻¹, approximately. Average plant height was 4 m. Table 1 shows the phenology of the sorghum crop.

The radiometric measurements were taken with a spectroradiometer, model HR4000 (Ocean Optics™, Florida, USA), with an effective interval of 200 to 1100 nm. In the range of 400-900 nm, the broad band is 0.25-0.26 nm with 1757 channels. Band width is similar for other ranges.

The field of vision of the optical fiber is 10° and the height at which observations were made for sorghum was 4 m above the soil until the crop surpassed 3.5 m; after that, this height was raised up to 5.8 m (observation diameter 0.7 and 1.0 m).

promedio de la planta fue 4 m. En el Cuadro 1 se muestra la fenología del cultivo de sorgo.

Las medidas radiométricas se hicieron con un espectraloradiómetro modelo HR4000 (Ocean Optics^{MR}, Florida, USA), con un intervalo efectivo de 200 a 1100 nm. En el rango 400-900 nm el ancho de banda es 0.25-0.26 nm, con 1757 canales. El ancho de banda es similar para otros rangos.

El campo de visión de la fibra óptica es de 10° y la altura a la que se hicieron las observaciones para el sorgo fue 4 m sobre el suelo hasta que la altura del cultivo superó los 3.5 m; luego esta altura se aumentó hasta 5.8 m (diámetro de observación 0.7 y 1.0 m).

Las medidas espectrales se tomaron manteniendo la observación vertical sobre la cubierta y en horario de máxima elevación solar (Milton, 1987; Jackson *et al.*, 1980). Se midió un transecto (dirección Norte-Sur) de seis puntos para garantizar la representatividad de la cubierta, fuera y dentro del lisímetro. Se tomó una medida del blanco de referencia (Spectralon^{MR}) al inicio de cada transecto (McCoy, 2005). Las medidas hiperespectrales fueron remuestreadas a las bandas del sensor TM5 del satélite LANDSAT.

La cobertura vegetal (fv) fue estimada mediante la técnica de clasificación supervisada de fotografías digitales de la cubierta, distinguiendo entre las componentes de vegetación verde y suelo (Calera *et al.*, 2001). La altura del sorgo se midió en seis plantas elegidas aleatoriamente en el área de protección del lisímetro. La biomasa se midió tomando muestras de 0.5×0.5 m (5 plantas) cada dos o tres semanas. Se registró el peso fresco y luego se secaron en estufa (70-75 °C) hasta peso constante. Se obtuvo un rendimiento final de 22 374 kg ha⁻¹ de biomasa seca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajuste del modelo expo-lineal a las variables biofísicas

El modelo expo-lineal fue ajustado a los datos experimentales usando regresión no lineal, donde la raíz del error cuadrático medio (RECM) fue minimizado, para lo cual se usó la función SOLVER^{MR} de Excel^{MR}. Las Figuras 1, 2 y 3 muestran los resultados obtenidos en el ajuste del modelo expo-lineal a la Bm, fv y h, donde los círculos no rellenos se refieren a valores no de la etapa vegetativa.

Los parámetros del ajuste del modelo expo-lineal se muestran en el Cuadro 2.

La determinación de relaciones lineales, dado un modelo común entre un par de variables (funciones matemáticas similares) depende de que los patrones

Cuadro 1. Fenología del cultivo de sorgo.
Table 1. Phenology of the sorghum crop.

Fenología	Fecha	Día Juliano	Días después de la emergencia
Siembra	23/05/2007	143	
Emergencia	31/05/2007	150	0
4-5 hojas	18/06/2007	169	19
Inicio floración	10/08/2007	222	72
50 % floración	17/08/2007	229	79
100 % floración	21/08/2007	233	83
Maduración	18/09/2007	261	111
Cosecha	09/10/2007	282	132

Spectral measurements were taken maintaining vertical observation over the cover and at the hour of the sun's zenith (Milton, 1987; Jackson *et al.*, 1980). A six-point transect was measured (north to south) to guarantee that the cover was representative, outside and inside the lysimeter. One measurement of the reference target (SpectralonTM) was taken at the start and end of each transect (McCoy, 2005). The hyperspectral measurements were re-sampled at the bands of the TM5 LANDSAT satellite sensor.

Plant cover (fv) was estimated using the technique of supervised classification of digital photographs of the cover, distinguishing between the components green vegetation and soil (Calera *et al.*, 2001). Sorghum height was measured in six plants selected at random from the protection area of the lysimeter. Biomass was measured in 0.5×0.5 m (5 plants) every two or three weeks. Fresh weight was recorded and later plants were dried in an oven (70-75 °C) until constant weight. Final dry biomass yield of 22.374 kg ha⁻¹ was obtained.

RESULTS AND DISCUSSION

Expo-linear model fit to the biophysical variables

The expo-linear model was fit to the experimental data using non-linear regression, in which the root mean squared error (RMSE) was minimized; for this the function SOLVERTM in ExcelTM was used. Figures 1, 2, and 3 show the results obtained in the expo-linear model fit to Bm, fv and h, where the unfilled circles refer to values not of the vegetative stage.

The fit parameters of the expo-linear model are shown in Table 2.

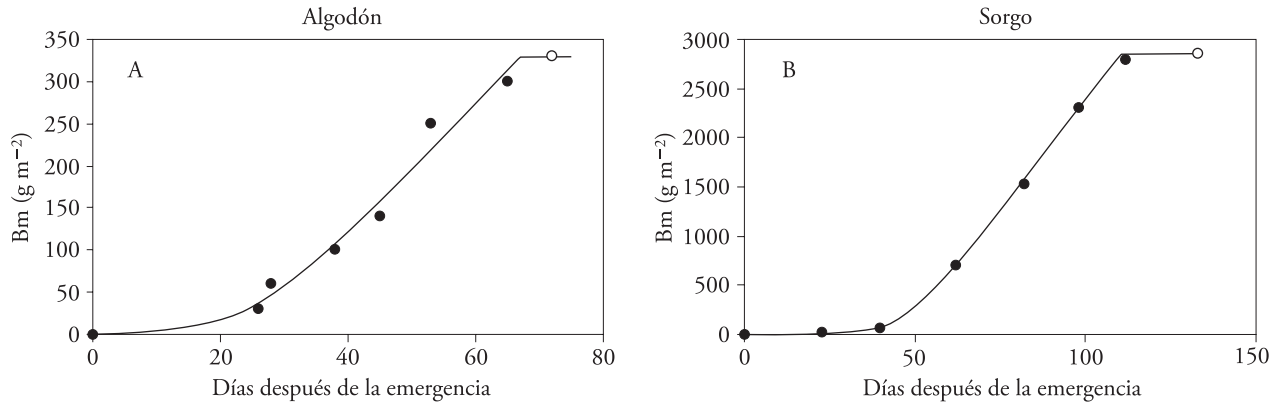


Figura 1. Ajuste de la biomasa (g m^{-2}) de algodón A) y sorgo B) mediante el modelo expo-lineal.
Figure 1. Fit of biomass (g m^{-2}) of cotton A) and sorghum B) using the expo-linear model.

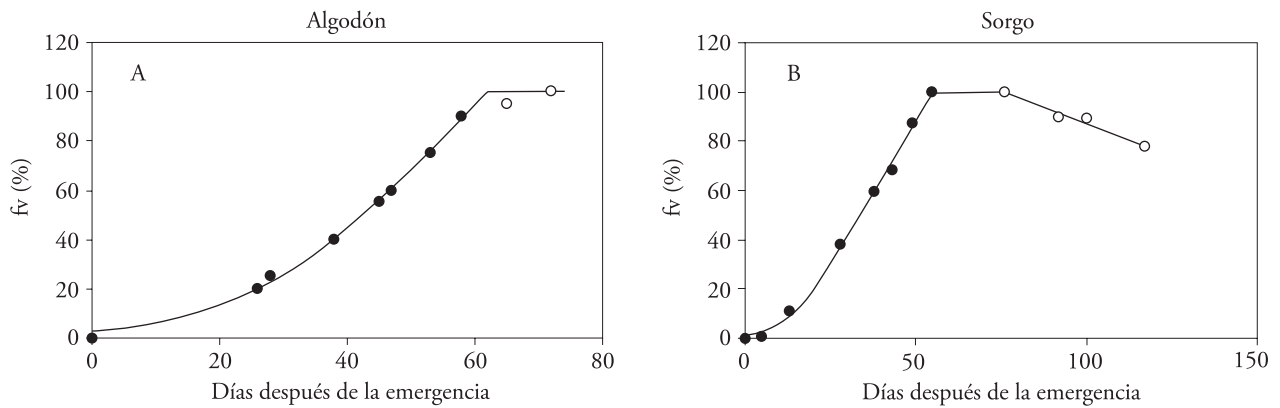


Figura 2. Ajuste de la fracción de cobertura vegetal verde de algodón A) y sorgo B) mediante el modelo expo-lineal.
Figure 2. Fit of the green plant cover fraction of cotton A) and sorghum B) using the expo-linear model.

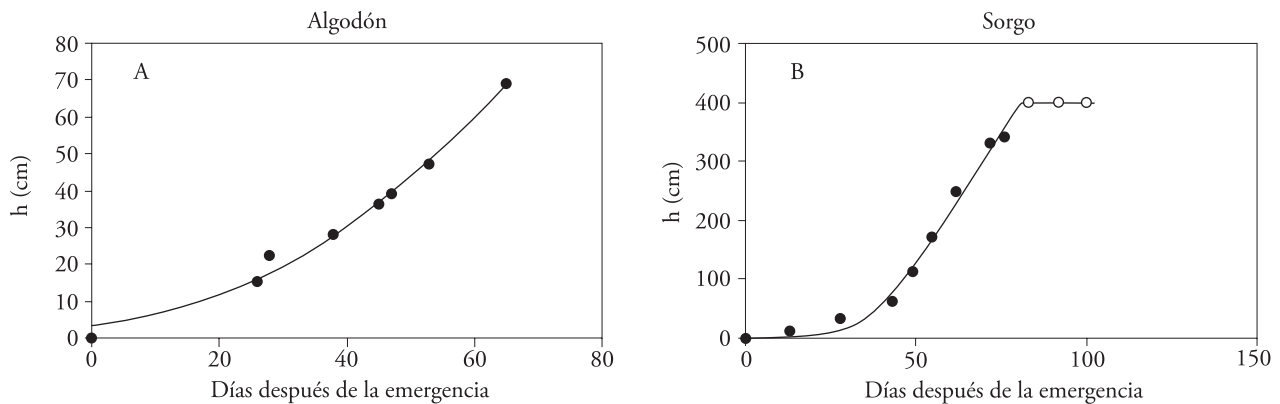


Figura 3. Ajuste de la altura del cultivo (cm) de algodón A) y sorgo B) mediante el modelo expo-lineal.
Figure 3. Fit of crop height (cm) of cotton A) and sorghum B) using the expo-linear model.

de inicio y fin de las fases del modelo expo-lineal coincidan; en caso contrario las relaciones serán del tipo no lineal. Esta condición se cumple en el cultivo algodón para las variables f_v y h . En general, dadas las

Determination of the linear relationships, given a common model between a pair of variables (similar mathematical functions), depends on whether the initial and final phase patterns coincide; otherwise,

Cuadro 2. Parámetros del ajuste del modelo expo-lineal (t_L : tiempo cuando el crecimiento es cero; t_T : tiempo cuando las tasas de crecimiento son iguales; r : tasa relativa de crecimiento; C : tasa máxima de crecimiento) de las variables Bm (biomasa), fv (cobertura aérea) y h (altura).

Table 2. Fit parameters of the expo-linear model (t_L : time when growth is zero; t_T : time when growth rates are equal; r : relative growth rate; C : Maximum growth rate) of the variables Bm (biomass), fv (aerial cover) and h (height).

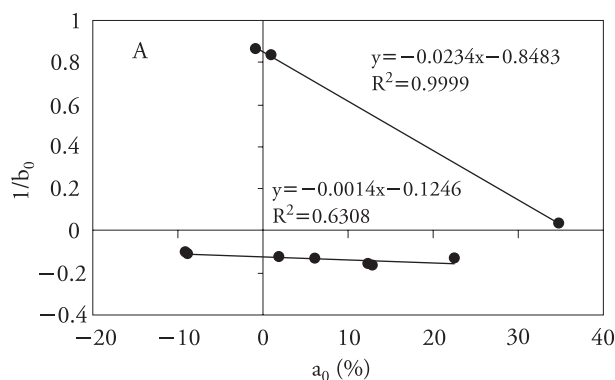
Cultivo	Variable	t_L	t_T	r	C	Máximo (DJ, Valor)	RECM
Algodón	Bm	24.9	28.2	0.163	7.76	(68,330)	15.66
	fv	28.5	34.8	0.086	2.93	(62,100)	5.27
	h	29.9	37.9	0.068	1.89	(65,68.9)	21.68
	IV_CIMAS	34.4	39.0	0.118	0.031	(66,0.97)	0.059
Sorgo	Bm	46.8	50.1	0.165	45.00	(112,2854)	53.77
	fv	12.6	15.4	0.192	2.35	(56,100)	1.68
	h	37.3	41.0	0.148	9.24	(82,400)	12.68

diferencias en r y C , se esperan patrones bilineales en casos donde los tiempos de inicio y final de las fases más o menos coincidan.

Con los datos presentados cabe destacar que los patrones temporales de la Bm en general no coinciden con los de fv y h, definiendo tiempos diferentes (tasas de crecimiento) en la obtención de los límites del crecimiento morfométrico de los cultivos y de la producción foliar y de biomasa.

Patrones espectrales de los cultivos

En la Figura 4 se muestra el espacio $(1/b_0, a_0)$ y (β, a_1) de los parámetros de las líneas de igual vegetación en el espacio espectral del R-IRC para las medidas radiométricas en el sorgo, donde se observa que las relaciones utilizadas en el NDVIcp e IV_CIMAS resultan correctas.



the relationships will be of a non-linear type. This condition is satisfied in the cotton crop for the variables fv and h. In general, given the differences in r and C , bi-linear patterns are expected in cases in which initial and end times of the phases more or less coincide.

With the presented data, it should be noted that the Bm temporal patterns, in general, do not coincide with those of fv and h, different times (growth rates) are defined in obtaining the crop morphometric growth limits, foliage production and biomass.

Crop spectral patterns

Figure 4 shows the spaces $(1/b_0, a_0)$ and (β, a_1) of the linear parameters of equal vegetation in the R-NIR spectral space for the radiometric measurements of

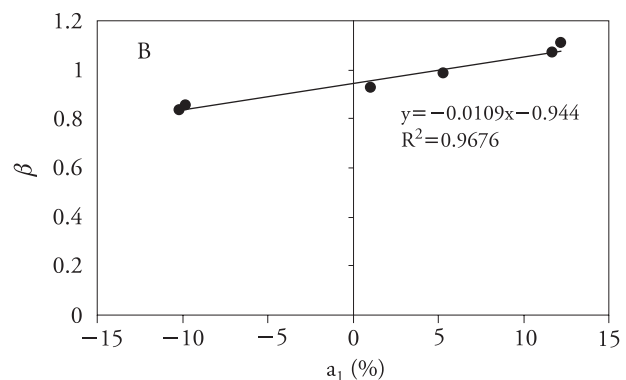


Figura 4. Relaciones paramétricas en los espacios del $(1/b_0, a_0)$ y (β, a_1) en las figuras (A) y (B) respectivamente de sorgo.
Figure 4. Parametric relationships in the spaces of $(1/b_0, a_0)$ and (β, a_1) in figures (A) and (B), respectively, of sorghum.

En la Figura 5 se muestra el gráfico del modelo expo-lineal ajustado a la biomasa aérea seca y al IV_CIMAS (estimado directamente de las pendientes b_0 ajustadas a los datos experimentales de las líneas de igual vegetación), tanto para el cultivo con densidad media del follaje (algodón), como para el de alta densidad (sorgo).

En cultivos de alta densidad del follaje el IV_CIMAS (basado en b_0) resulta inadecuado para modelar la dinámica de la Bm, ya que se satura rápidamente. Así, en el caso del sorgo (Figura 5b), el IV_CIMAS llega a sus valores máximos en la fase exponencial y después refleja pequeños cambios debido al mayor espesor de la cubierta vegetal, caracterizada por valores altos de IAF. Pero, el cultivo de densidad media no presenta el problema de saturación del IV_CIMAS y tiene una dinámica similar a la Bm (Figura 5a). Así, para el algodón la relación entre ambas variables, Bm e IV_CIMAS, es bilineal (fase exponencial y fase lineal), tanto para datos experimentales como para los modelos expo-lineales ajustados.

Una alternativa al uso de b_0 para la construcción de índices de vegetación es utilizar a_0 como parámetro básico ($a_0 - a_s$, para forzar las relaciones a pasar por el origen), aunque éste presenta un patrón bifásico (fase creciente y decreciente) al relacionarlo con el IAF. El uso de a_0 está justificado por su relación de la reflectancias de sólo la vegetación y en menor medida de las transmitancias (factores geométricos), a diferencia de las b_0 que son dependientes de sólo transmitancias de la parte de la vegetación (Yoshioka *et al.*, 2000).

En la Figura 6 se muestran los patrones temporales de la Bm (con el modelo expo-lineal ajustado)

sorghum. It can be observed that the relationships used in NDVIcp and IV_CIMAS are correct.

In Figure 5 is the graph of the expo-linear model fit to the dry aerial biomass and to IV_CIMAS (estimated directly from the b_0 slopes fit to the experimental data of the equal vegetation lines), for both the medium density (cotton) and the high density (sorghum) crops.

In high foliage density crops, IV_CIMAS (based on b_0) proves to be unsuitable for modeling the dynamics of Bm since it becomes saturated rapidly. Thus, in the case of sorghum (Figure 5b), IV_CIMAS reaches its maximum values in the exponential phase and later reflects small changes due to the thicker plant cover, characterized by high LAI values. But the mean crop density does not have the problem of saturation of IV_CIMAS and has dynamics similar to that of Bm (Figure 5a). So, for cotton the relationship between the two variables, Bm and IV_CIMAS, is bi-linear (exponential phase and linear phase), for both the experimental data and the fitted expo-linear models.

One alternative to using b_0 for the construction of vegetation indexes is to use a_0 as a basic parameter ($a_0 - a_s$, to force the relationships to pass through the intercept), although this has a bi-phasic pattern (increasing and decreasing phases) when it is related to LAI. The use of a_0 is justified by its reflectance relationship of only the vegetation and to a lesser degree by the transmittances (geometric factors), unlike b_0 , which are dependent on only transmittances from the vegetation part (Yoshioka *et al.*, 2000).

In Figure 6, the Bm (with the fitted expo-linear model) and $a_0 - a_s$ temporal patterns are shown. In

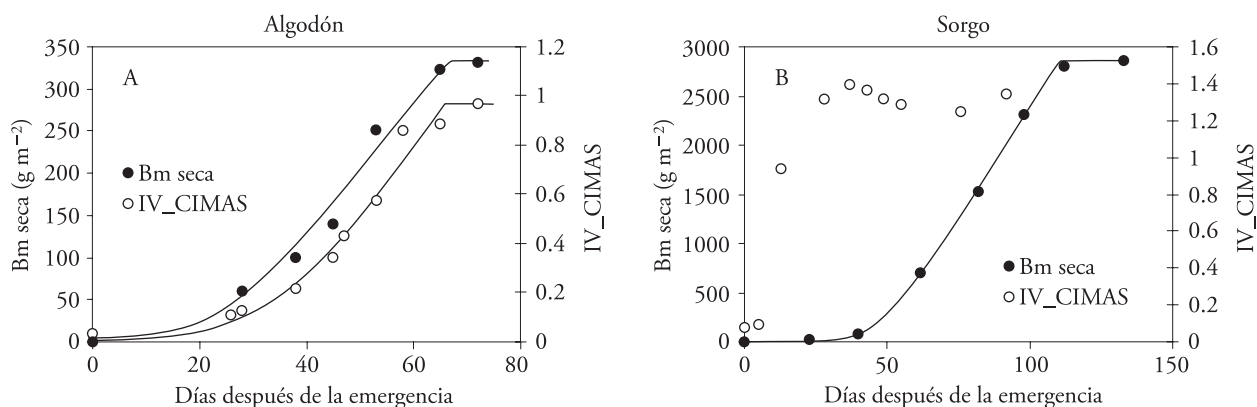


Figura 5. Patrones temporales de la Bm y el IV_CIMAS para el algodón (A) y sorgo (B), con modelos expo-lineales ajustados.
Figure 5. Temporal patterns of Bm and IV_CIMAS for cotton (A) and sorghum (B), with fitted expo-linear models.

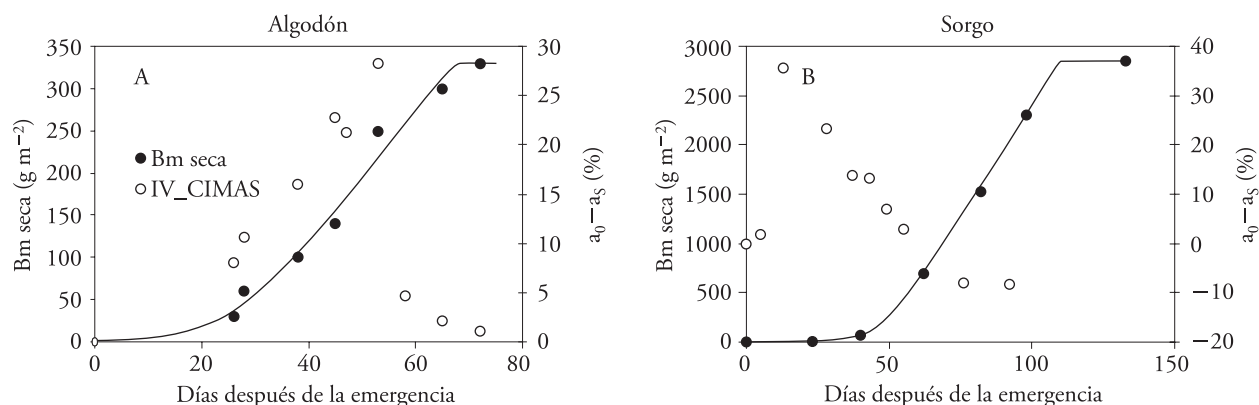


Figura 6. Patrones y ajustes temporales: biomasa seca y $a_0 - a_5$ para el algodón (A) y biomasa seca y $a_0 - a_5$ para el sorgo (B).
Figure 6. Temporal patterns and fits: dry biomass and $a_0 - a_5$ for cotton (A) and dry biomass and $a_0 - a_5$ for sorghum (B).

y de $a_0 - a_5$. En el algodón, la relación de $a_0 - a_5$ es del tipo lineal proporcional hasta donde la etapa vegetativa termina e inicia la reproductiva; después los valores se reducen y reflejan cambios asociados a las propiedades ópticas del follaje y la floración. En el sorgo para $a_0 - a_5$, después de una fase creciente rápida dentro de la fase exponencial de la B_m , el patrón es lineal e inversamente proporcional hasta un valor cercano a t_T y después permanece constante. Esto es producto de la rápida saturación de la banda del R.

Considerando el tiempo como un indicador de IAF (parámetro asociado a la arquitectura de la cubierta vegetal), el patrón temporal de $a_0 - a_5$ sería al inicio un patrón expo-lineal creciente y después se presentaría uno expo-lineal decreciente. Para un cultivo de densidad media de follaje, el cambio de un patrón a otro de la curva de B_m está relacionado con el término de la etapa vegetativa e inicio de la reproductiva. Para un cultivo de densidad alta, el cambio se da rápidamente y dentro de la fase exponencial de la etapa vegetativa. Como se aprecia en la Figura 6 el máximo valor de B_m en algodón ($\sim 350\ g\ m^{-2}$) coincide con el cambio de pendiente $a_0 - a_5$ frente al tiempo (se alcanza un valor umbral de IAF). Este comportamiento se reproduce en el sorgo, sin embargo, teniendo en cuenta el rango de valores de la biomasa, el máximo de B_m en algodón coincide con el valor al inicio de la etapa vegetativa del sorgo. Por ello, el comportamiento de $a_0 - a_5$ frente al tiempo está asociado a la B_m y a la arquitectura de la cubierta vegetal.

Para entender los patrones observados entre la B_m y $a_0 - a_5$, se revisaron los patrones temporales de f_v y $a_0 - a_5$ (Figura 7).

cotton, the relationship of $a_0 - a_5$ is of a proportional linear type up to where the vegetative stage ends and the reproductive stage begins. Afterward, the values decrease and reflect changes associated with the optical properties of the foliage and flowers. In sorghum, for $a_0 - a_5$, after a rapid growth phase within the B_m exponential phase, the pattern is linear and inversely proportional up to a value of nearly t_T , and later it remains constant. This is caused by rapid saturation of the R band.

Considering time as an indicator of LAI (parameter associated with the architecture of the plant cover), the temporal pattern of $a_0 - a_5$ would be an increasing expo-linear pattern at the beginning and later the pattern would be decreasing expo-linear. For a medium foliage density crop, the change from one pattern to another of the B_m curve is related to the end of the vegetative stage and the beginning of the reproductive stage. For a high density crop the change occurs quickly and within the exponential phase of vegetative stage. As seen in Figure 6, the highest B_m value in cotton ($\sim 350\ g\ m^{-2}$) coincides with the change in slope $a_0 - a_5$ against time (a LAI threshold value is reached). This behavior is reproduced in sorghum; however, keeping in mind the range of values of biomass, the maximum B_m in cotton coincides with the value at the beginning of the sorghum vegetative stage. For this reason, the behavior of $a_0 - a_5$ against time is associated with B_m and the architecture of the plant cover.

To understand the patterns observed between B_m and $a_0 - a_5$, the f_v and $a_0 - a_5$ temporal patterns are reviewed (Figure 7).

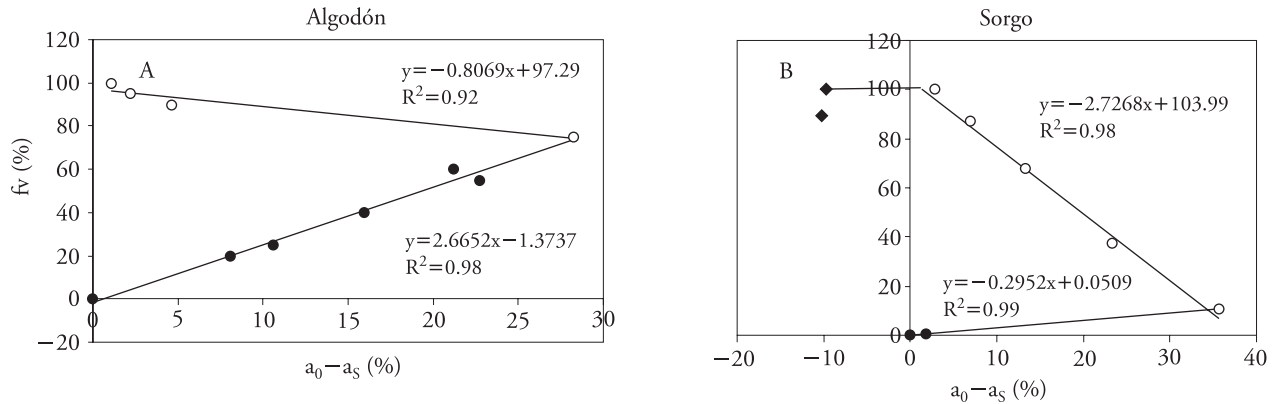


Figura 7. Patrones temporales de f_v y $a_0 - a_s$ para el algodón A) y sorgo B). Los círculos rellenos representan la fase exponencial (expo-lineal) de la etapa vegetativa y los sin relleno la fase lineal (reproductiva).

Figure 7. Temporal patterns of f_v and $a_0 - a_s$ for cotton A) and sorghum B). The filled in circles represent the exponential (expo-linear) phase of the vegetative stage, and the unfilled circles the linear (reproductive) phase.

Si se analiza la Figura 7 usando como referencia la Figura 4 ($a_0, 1/b_0$), se observa un patrón bilineal entre $a_0 - a_s$ y f_v , donde el cambio de pendiente está asociado al cambio observado en los patrones de la Figura 4 (fase exponencial a lineal o fase expo-lineal a reproductiva). Este modelo bilineal entre $a_0 - a_s$ y f_v permite realizar estimaciones de b_0 para el NDVIcp e IV_CIMAS con información de campo fácilmente obtenible como la f_v .

Respecto a la altura h de los cultivos, en la Figura 8 se muestran las relaciones entre $a_0 - a_s$ y h para algodón y sorgo, donde el patrón observado es lineal-exponencial, con un cambio de pendiente asociado a un cambio de fase similar al de la Figura 4. Este comportamiento se asemeja al observado entre $a_0 - a_s$ y

If we analyze Figure 7 using Figure 4 ($a_0, 1/b_0$) as a reference, we observe a bi-linear pattern between $a_0 - a_s$ and f_v , in which the change in slope is associated with the change observed in the patterns in Figure 4 (exponential to linear phase, or expo-linear to reproductive phase). This bi-linear model between $a_0 - a_s$ and f_v allows estimation of b_0 for NDVIcp and IV_CIMAS with easily obtained field information, such as f_v .

With regard to crop height, Figure 8 shows the relationships between $a_0 - a_s$ and h for cotton and sorghum. The pattern observed is linear-exponential, with a change in slope associated with a change in phase, similar to that in Figure 4. This behavior is similar to that observed between $a_0 - a_s$ and f_v ,

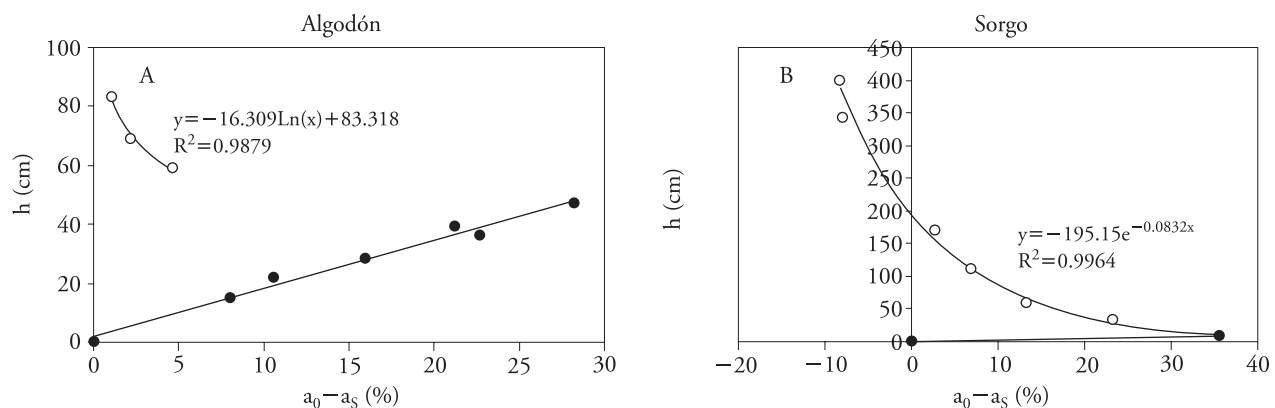


Figura 8. Patrones temporales de h y $a_0 - a_s$ para el algodón y sorgo. Los círculos rellenos representan la fase exponencial (expo-lineal) de la etapa vegetativa y los sin relleno la fase lineal (reproductiva).

Figure 8. Temporal patterns of h and $a_0 - a_s$ for cotton and sorghum. The filled in circles represent the exponential (expo-linear) phase of the vegetative stage, and the unfilled circles the linear (reproductive) phase.

f_v , pero con un patrón exponencial para la fase lineal o reproductiva, permitiendo su modelación en forma simple y la parametrización del NDVI_{cp} o IV_CIMAS de forma simplificada.

CONCLUSIONES

De la modelación temporal de las variables biofísicas B_m , f_v y h , usando un modelo expo-lineal, es posible inferir las relaciones esperadas entre pares de variables, donde un patrón bilineal se presenta cuando los inicios y finales de las fases del modelo coinciden entre ambas variables. Otros patrones (exponenciales principalmente) se presentan cuando los inicios y términos de las fases son diferentes. En general, las fases exponencial y lineal de la B_m no coinciden con las de f_v y h , mostrando diferencias entre las características estructurales y la distribución espacial de la vegetación (f_v y h) y la función fotosintética (follaje y biomasa).

Con respecto a las relaciones entre las variables biofísicas y los índices de vegetación basados en b_0 , en el cultivo con densidad media de follaje (algodón), las relaciones del IV_CIMAS con la B_m resultaron en patrones bilineales bien caracterizados, contrario al caso del cultivo con densidad alta de follaje (sorgo), donde el IV_CIMAS mostró una rápida saturación en la fase exponencial de B_m debido a los altos valores de IAF alcanzados por esta cubierta vegetal.

Se exploró el uso de a_0 ($a_0 - a_s$) como métrica espectral para evitar los problemas de saturación de los índices de vegetación basados en b_0 . Las relaciones entre $a_0 - a_s$ y B_m fueron de tipo expo-lineal doble, con problemas en la definición de sus transiciones. No obstante, para la variable f_v las relaciones fueron bilineales para ambas densidades de follaje, permitiendo una parametrización fácil en campo de $a_0 - a_s$, NDVI_{cp} e IV_CIMAS. Algo similar se presentó para la relación con h , donde el patrón fue lineal-exponencial.

Los análisis presentados muestran que la definición de fases en un modelo expo-lineal, debe estar relacionada con el cambio observado del comportamiento exponencial al lineal en el espacio (a_0 , b_0) o (a_0 , $1/b_0$), de manera que estos patrones puedan asociarse con los de f_v y h . Esto es válido para cultivos de densidad media ó alta.

but with an exponential pattern for the linear or reproductive phase, allowing simple modeling and parameterization of NDVI_{cp} or IV_CIMAS in a simplified form.

CONCLUSIONS

From temporal modeling of the biophysical variables B_m , f_v and h , using an expo-linear model, it is possible to infer the expected relationships between pairs of variables, in which there is a bi-linear pattern when the beginnings and ends of the model phases coincide between the two variables. Other patterns (mainly exponential) appear when the beginnings and ends are different. In general, the exponential and linear phases of B_m do not coincide with those of f_v and h , exhibiting differences in structural characteristics and spatial distribution of the vegetation (f_v and h) and the photosynthetic function (foliage and biomass).

In terms of the relationships among biophysical variables and the vegetation indexes based on b_0 , in the medium dense foliage crop (cotton), the relationships between IV_CIMAS and B_m had well-characterized bi-linear patterns, contrasting with the highly dense foliage crop (sorghum), in which IV_CIMAS was rapidly saturated in the exponential phase of B_m due to the high LAI values of this plant cover.

The use of a_0 ($a_0 - a_s$) was explored as spectral metrics to avoid problems of saturation of the vegetation indexes based on b_0 . The relationship between $a_0 - a_s$ and B_m were of a double expo-linear type, with problems in defining its transitions. Nevertheless, for the f_v variables of foliage, the relationships were bi-linear for both foliage densities. This permitted easy parameterization of $a_0 - a_s$, NDVI_{cp} and IV_CIMAS in the field. The relationship with h was similar, the pattern being linear-exponential.

The analysis presented shows that the definition of phases in an expo-linear model should be related to the change observed in behavior, from exponential to linear in the (a_0 , b_0) or (a_0 , $1/b_0$) space, so that these patterns can be associated with f_v and h . This is valid for medium or high density crops.

—End of the English version—



LITERATURA CITADA

- Calera, A., C. Martínez, and J. Meliá. 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *Int. J. Remote Sensing* 22: 3357-3362.
- Ferrandino, F. J. 1989. Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield. *Agric. For. Meteorol.* 47: 273-289.
- Gilbert, M. A., J. González-Piqueras, F. J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing Environ.* 82: 303-310.
- 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.
- Goudriaan, J., and H. H. van Laar. 1994. Modeling 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 Sensing Environ.* 17: 35-53.
- Jackson, R. D., P. J. Pinter, R. J. Reginato, and S. B. Idso. 1980. Hand-held radiometry. A set of notes developed for use at the workshop on hand-held radiometry. Phoenix, Arizona. US Department of Agriculture. Agricultural Reviews and Manuals. 66 p.
- López-Urrea, R., A. Montoro, P. López-Fuster, and E. Fereres. 2009. Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli. *Agric. Water Manage.* 96: 1155-1161.
- McCoy, R. M. 2005. Fields Methods in Remote Sensing. The Guilford Press New York London. 159 p.
- Milton, E. J. 1987. Principles of field spectroscopy. *Int. J. Remote Sensing* 8(12): 1807-1827.
- 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, 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.
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43(3): 291-307.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing Environ.* 8: 127-150.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE transactions in Geoscience and Remote Sensing* 34: 1254-1265.
- Yoshioka, H., T. Miura, A.R. Huete, and B.D Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. *Remote Sensing Environ.* 74: 313-326.