

# DISEÑO DE UN ÍNDICE ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN: NDVI<sub>cp</sub>

## DESIGN OF A VEGETATION SPECTRAL INDEX: NDVI<sub>cp</sub>

Fernando Paz-Pellat<sup>1</sup>, Enrique Palacios-Vélez<sup>1</sup>, Martín Bolaños-González<sup>1</sup>, Luis A. Palacios-Sánchez<sup>1</sup>,  
Mario Martínez-Menes<sup>1</sup>, Enrique Mejía-Saenz<sup>1</sup> y Alfredo Huete<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hidrocencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (pellat@colpos.mx). <sup>2</sup>University of Arizona Dept. of Soil, Water and Environ. Sciences 1200 E. South Campus Dr., Rm. 429 Shantz Bldg. #38 Tucson, AZ 85721-0038.

### RESUMEN

Hay muchos índices de vegetación (IV) basados en relaciones del espacio espectral del rojo e infrarrojo cercano. En este trabajo se hace una revisión de la estructura de los IV más utilizados, usando una formulación para caracterizar curvas de igual índice de área foliar. Con el fin de resolver las inconsistencias encontradas en los IV, se propone uno nuevo (NDVI<sub>cp</sub>), basado en la estructura correcta del problema, bajo consideraciones empíricas. El NDVI<sub>cp</sub> se valida usando datos de experimentos en campo con maíz (*Zea mays*, L.) y algodón (*Gossypium* spp).

**Palabras clave:** Espacio R-IRC, índices de vegetación, NDVI<sub>cp</sub>.

### INTRODUCCIÓN

La tecnología de los sensores remotos ha creado una gran expectativa en la caracterización biofísica de la vegetación. Los trabajos en esta área muestran relaciones empíricas entre la información captada por los sensores (radiancias) a bordo de satélites comerciales, y diversas variables biofísicas [biomasa, índice de área foliar (IAF), cobertura, etcétera]. Debido a las propiedades ópticas de las hojas verdes, la absorción en la banda espectral del rojo del espectro electromagnético es muy alta, mientras que reflejan o dispersan la mayor parte en la banda del infrarrojo cercano. Los índices de vegetación (IV) (Tucker, 1979; Huete, 1988), aprovechan este contraste utilizando relaciones entre dos bandas de muestreo del espectro electromagnético, la roja (R) y la infrarroja cercana (IRC). Así, las relaciones empíricas calculadas entre las variables biofísicas de los cultivos y los IV reflejan patrones generales o tendencias entre las propiedades ópticas de los cultivos y su arquitectura (distribución espacial y angular de los fitoelementos del follaje), para una geometría sensor-iluminación dada. Aunque se ha intentado optimizar los IV (Liu y Huete, 1995), los resultados dependen de las hipótesis consideradas en relación con la estructura del problema.

Recibido: Septiembre, 2006. Aprobado: Mayo, 2007.  
Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 41: 539-554. 2007.

### ABSTRACT

There are many vegetation indices (VI) based on relationships of the spectral space of the red and near infrared. In this study, the structure of the most widely used VI is examined, using a formulation to characterize curves of equal leaf area index. In order to solve the inconsistencies found in the VI, a new one (NDVI<sub>cp</sub>) is proposed, based on the correct structure of the problem, under empirical considerations. The NDVI<sub>cp</sub> is validated using data from field experiments with maize (*Zea mays* L.) and cotton (*Gossypium* spp.).

**Key words:** Space R-IRC, vegetation indices, NDVI<sub>cp</sub>.

### INTRODUCTION

The technology of remote sensors has created a great expectation in the biophysical characterization of plants. The works in this area show empirical relationships between the information captured by the sensors (radiances) on commercial satellites, and diverse biophysical variables (biomass, leaf area index (LAI), canopy cover, etc.). Due to the optical properties of the green leaves, the absorption in the spectral band of the red of the electromagnetic spectrum is very high, whereas they reflect or disperse the greatest part in the band of the near infrared. The vegetation indices (VI) (Tucker, 1979; Huete, 1988), take advantage of this contrast by utilizing relationships between two bands of the electromagnetic spectrum, the red (R) and the near infrared (IRC). Thus, the empirical relationships calculated between the biophysical variables of the crops and the VI reflect general patterns or tendencies among the optical properties of the crops and their architecture (spatial and angular distribution of the phytoelements of the foliage), for a given sensor-illumination geometry. Although several attempts have been made to optimize the VI (Liu and Huete, 1995), the results depend on the hypotheses considered in relation to the structure of the problem.

Although numerous works have been written related to vegetation indices, the problem remains as to which

Aunque se han escrito numerosos trabajos relacionados con los índices de vegetación, permanece el problema sobre cuál es el más apropiado. Así, el objetivo primario de este trabajo es esclarecer la estructura del problema en el diseño de IV y plantear un esquema apropiado de solución.

En este trabajo se revisan diferentes IV y se muestran sus alcances y limitaciones, utilizando un planteamiento general del problema de estimación de IV. Partiendo de la estructura del problema, se propone un índice que considera la dinámica de la mezcla suelo-vegetación en forma correcta. Se ejemplifica el índice propuesto con mediciones en campo.

### Espacio espectral R-IRC de la mezcla suelo-vegetación

En la Figura 1 se muestra el espacio espectral R-IRC del patrón temporal de crecimiento de un cultivo, representado por curvas de igual índice de área foliar o IAF (iso-IAF); el nombre común de esta gráfica es sombrero de tres picos. La Figura 1 se generó usando seis tipos de suelos (S2, S5, S7, S9, S11 y S12; del más oscuro al más claro). Paz *et al.* (2005) detallan las simulaciones radiativas mostradas en la Figura 1.

El análisis de la Figura 1 define varios patrones muy importantes para entender el comportamiento de la reflectividad durante el desarrollo de los cultivos:

- a) Si se unen los valores de igual IAF (iso-IAF) de cada curva de igual suelo (iso-Suelo), se obtiene un patrón cuasi-lineal. Este patrón ha sido verificado experimentalmente (Huete *et al.*, 1985; Price, 1992 -con datos de Huete y Jackson 1987-, Baush, 1993; Xia, 1994; Gilabert *et al.*, 2002; Meza Díaz y Blackburn, 2003) y por modelos de transferencia radiativa (Richardson y Wiegand, 1991; Baret y Guyot, 1991; Qi *et al.*, 1994; Yoshioka *et al.*, 2000). En realidad, la curva de iso-IAF corresponde a un comportamiento de tipo parabólico (considerando interacciones de segundo orden), que si no se consideran suelos muy claros, resulta en una línea recta (interacciones de primer orden). Así, el estado de crecimiento de un cultivo (IAF) se refleja en una línea recta, independientemente del tipo de suelo de fondo en el cultivo.
- b) La pendiente e intersección de las líneas rectas de iso-IAF varían con el valor del IAF, como se observa en la Figura 1. La inclinación (pendiente) de las rectas de iso-IAF parte desde una pendiente igual a la de la línea del suelo (IAF=0) y aumenta hasta alcanzar un ángulo de 90° en sentido contrario a las manecillas del reloj. Esta última condición corresponde al caso de saturación de la reflectividad de la

is the most appropriate. Therefore, the primary objective of the present study is to clarify the structure of the problem in the design of VI and to offer an appropriate scheme of solution.

The present work examines different VI and their potential and limits are shown, using a general statement of the problem of estimation of VI. From the structure of the problem, an index is proposed that considers the dynamic of the soil-vegetation mixture in the correct form. The proposed index is exemplified with field measurements.

### Spectral space R-IRC of the soil-vegetation mixture

Figure 1 shows the spectral space R-IRC of the temporal growth pattern of a crop, represented by curves of equal leaf area index or LAI (iso-LAI); the common name of this graph is tassled cap. Figure 1 was generated using six types of soil (S2, S5, S7, S9, S11 and S12; from the darkest to the lightest). Paz *et al.* (2005) detail the radiative simulations shown in Figure 1.

The analysis of Figure 1 defines various patterns that are very important for understanding the behaviour of the reflectance during crop development:

- a) If the values of equal LAI (iso-LAI) are joined from each curve of equal soil (iso-Soil), a quasi-linear pattern is obtained. This pattern has been verified experimentally (Huete *et al.*, 1985; Price, 1992 - with data of Huete and Jackson 1987-, Baush, 1993; Xia, 1994; Gilabert *et al.*, 2002; Meza Díaz and Blackburn, 2003) and by models of radiative transfer (Richardson and Wiegand, 1991; Baret and Guyot,

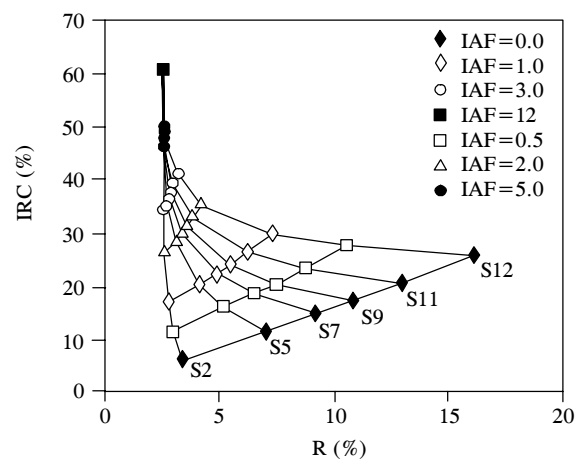


Figura 1. Espacio espectral IRC-R para las simulaciones en el cultivo maíz.

Figure 1. Spectral space IRC-R for the simulations in the maize crop.

banda del R, representada en la Figura 1 como los valores de reflectividad arriba del ápice del sombrero de tres picos ( $I_{AF} > 5$  en la Figura 1). Los patrones de los espacios espectrales IRC-Visible (azul, verde y rojo) son similares para todas las bandas del espectro visible, dado que hay una relación lineal entre estas bandas.

- c) Todas las curvas de iso-Suelos convergen al mismo punto de saturación de las bandas visibles. En realidad el sombrero de tres picos tiene una línea recta como ápice, ya que cuando una banda visible se satura, el IRC no lo hace y sigue creciendo hasta su propio punto de saturación. Esta propiedad es muy importante para el diseño de algoritmos de índices de la señal del suelo y de la vegetación, y refleja la condición física en que el suelo no se ve (relativo a cada banda espectral) y sólo se observa la vegetación. El punto de saturación, llamado también de reflectividad infinita o de medio ópticamente denso, es función del espectro de las hojas y de su distribución angular.

Las curvas iso- $I_{AF}$  mostradas en la Figura 1 se pueden describir como:

$$IRC_{I_{AF}} = a_{0,I_{AF}} + b_{0,I_{AF}} R_{I_{AF}} \quad (1)$$

donde el subíndice  $I_{AF}$  se refiere a un valor específico del  $I_{AF}$  de la mezcla suelo-vegetación. Los parámetros de la recta definida por la ecuación (1),  $a_{0,I_{AF}}$  (en % para nuestro caso) y  $b_{0,I_{AF}}$  (adimensional), dependen del valor de  $I_{AF}$ . En lo que sigue se omitirá el subíndice  $I_{AF}$  en  $R$  e  $IRC$ .

### Índices de vegetación y sus limitaciones

Los índices de vegetación basados en el espacio espectral  $R$ - $IRC$  tratan de calcular el estado de crecimiento de un cultivo ( $I_{AF}$  u otra variable relacionada). Índices de vegetación ampliamente usados en las aplicaciones de la técnica de sensores remotos son:

- IV de razones (*Ratio Vegetation Index*: Pearson y Miller, 1972):

$$RVI = \frac{IRC}{R} \quad (2)$$

- IV de diferencias normalizadas (*Normalized Difference Vegetation Index*: Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} \quad (3)$$

1991; Qi *et al.*, 1994; Yoshioka *et al.*, 2000). Actually, the curve of iso-LAI corresponds to a parabolic type behaviour (considering second order interactions), which if very light soils are not considered, result in a straight line (first order interactions). Thus, the stage of growth of a crop (LAI) is mapped in a straight line, regardless of the type of background soil in the crop.

- b) The slope and intersection of the straight lines of iso-LAI vary with the value of the LAI, as is observed in Figure 1. The slope of the straight lines of iso-LAI goes from a slope equal to that of the soil line ( $LAI=0$ ) and increases until reaching a 90° angle counter clock-wise. This last condition corresponds to the case of saturation of the reflectance of the band of the R, represented in Figure 1 as the values of reflectance above the apex of the tassled cap ( $LAI > 5$  in Figure 1). The patterns of the spectral spaces IRC-Visible (blue, green and red) are similar for all of the bands of the visible spectrum, given that there is a linear relationship among these bands.
- c) All of the curves of iso-Soils converge at the same point of saturation of the visible bands. In reality the tassled cap has a straight line as apex, given that when a visible band becomes saturated, the IRC does not, and keeps growing up to its own saturation point. This property is very important for the design of algorithms of indices of the signal from the soil and of the vegetation, and shows the physical condition in which the soil is not visible (relative to each spectral band) and only the vegetation is observed. The saturation point, also referred to as infinite reflectance or optically dense medium, is a function of the spectrum of the leaves and of their angular distribution.

The iso-LAI curves shown in Figure 1 can be described as follows:

$$IRC_{LAI} = a_{0,LAI} + b_{0,LAI} R_{LAI} \quad (1)$$

where the sub-index LAI refers to a specific value of the LAI of the soil-vegetation mixture. The parameters of the straight line defined by equation (1),  $a_{0,LAI}$  (in % for this case) and  $b_{0,LAI}$  (adimensional), depend on the value of LAI. In what follows the sub-index LAI will be omitted in  $R$  and  $IRC$ .

### Vegetation indices and their limitations

The vegetation indices based on the spectral space  $R$ - $IRC$  attempt to calculate the growth stage of a crop (LAI or another related variable). Vegetation indices

- IV perpendicular (*Perpendicular Vegetation Index*: Richardson y Wiegand, 1977):

$$PVI = \frac{IRC - b_S R - a_S}{\sqrt{1 + b_S^2}} \quad (4)$$

- IV de diferencias (*Difference Vegetation Index*: Jordan, 1969):

$$DVI = IRC - R \quad (5)$$

- IV de diferencias ponderadas (*Weighted Difference Vegetation Index*: Clevers, 1989):

$$WDVI = IRC - b_S R \quad (6)$$

- IV ajustado por suelo (*Soil Adjusted Vegetation Index*: Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R + L)}(1 + L) \quad (7)$$

- IV ajustado por suelo transformado (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*: Baret et al., 1989):

$$TSAVI = \frac{b_S(IRC - b_S R - a_S)}{R + b_S IRC - a_S b_S + X(1 + b_S^2)} \quad (8)$$

- IV ajustado por suelo optimizado (*Optimized Soil Adjusted Vegetation Index*: Rondeaux et al., 1996):

$$OSAVI = \frac{IRC - R}{IRC + R + Y} \quad (9)$$

- IV ajustado por suelo generalizado (*Generalized Soil Adjusted Vegetation Index*: Gilabert et al., 2002):

$$GESAVI = \frac{IRC - b_S R - a_S}{IRC + Z} \quad (10)$$

- IV de proporciones pareadas (Paz et al., 2003):

$$IVPP = \frac{IRC - b_S R - a_S}{IRC} \quad (11)$$

donde  $L$ ,  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  son valores que se dejan constantes ( $L=0.5$ ,  $X=0.08$ ,  $Y=0.16$  y  $Z=0.35$ , para valores de reflectividad en proporciones) y la línea del suelo ( $IAF=0$ ) está definida por los parámetros  $a_S$  y  $b_S$ .

widely used in the applications of remote sensor technique are:

-VI of ratios (*Ratio Vegetation Index*: Pearson and Miller, 1972):

$$RVI = \frac{IRC}{R} \quad (2)$$

-VI of normalized differences (*Normalized Difference Vegetation Index*: Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} \quad (3)$$

-VI perpendicular (*Perpendicular Vegetation Index*: Richardson and Wiegand, 1977):

$$PVI = \frac{IRC - b_S R - a_S}{\sqrt{1 + b_S^2}} \quad (4)$$

-VI of differences (*Difference Vegetation Index*: Jordan, 1969):

$$DVI = IRC - R \quad (5)$$

-VI of weighted differences (*Weighted Difference Vegetation Index*: Clevers, 1989):

$$WDVI = IRC - b_S R \quad (6)$$

-VI soil adjusted (*Soil Adjusted Vegetation Index*: Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R + L)}(1 + L) \quad (7)$$

-VI transformed soil adjusted (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*: Baret et al., 1989):

$$TSAVI = \frac{b_S(IRC - b_S R - a_S)}{R + b_S IRC - a_S b_S + X(1 + b_S^2)} \quad (8)$$

-VI optimized soil adjusted (*Optimized Soil Adjusted Vegetation Index*: Rondeaux et al., 1996):

$$OSAVI = \frac{IRC - R}{IRC + R + Y} \quad (9)$$

Para entender las limitaciones de los IV es necesario definir el contexto de lo que se caracterizará. Un IV trata de aproximar una línea recta usando sólo un par de valores ( $R$ ,  $IRC$ ) que representan una cantidad desconocida de vegetación mezclada con un suelo de reflectividad también desconocida.

Las hipótesis para caracterizar un conjunto de líneas rectas (iso- $I_{AF}$ ) representando la dinámica de crecimiento de un cultivo se pueden plantear como:

- a) suponer la intersección de las líneas en el origen (0, 0) y dejar que la pendiente varíe (casos del  $RVI$  y  $NDVI$ ):

$$IRC = \left( \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \right) R = RVI \times R \quad (12)$$

- b) suponer una pendiente de las líneas y dejar que la intersección con el eje  $IRC$  varíe (casos del  $DVI$  y  $WDVI$ ):

$$IRC = DVI + R \quad (13)$$

$$IRC = WDVI + b_s R \quad (14)$$

El  $PVI$  es similar al  $WDVI$ , pero lo que varía es la intersección con el eje  $IRC$ , ya que está en función de la distancia perpendicular a la línea del suelo y se incrementa a partir de la intersección  $a_s$  de la línea del suelo con el eje  $IRC$ .

- c) dejar que el origen, generalmente en el tercer cuadrante de los ejes  $R$  e  $IRC$ , con coordenadas ( $-l_1$  y  $-l_2$ ) y la pendiente varíen (resto de los índices). Por ejemplo, el  $SAVI$  fue diseñado en función del  $NDVI$  agregándole valores constantes (para una línea iso- $I_{AF}$  dada) al  $R$  e  $IRC$ :

$$SAVI = \frac{(IRC + l_2) - (R + l_1)}{(IRC + l_2) + (R + l_1)} \quad (15)$$

Puesto que la línea del suelo tiene una pendiente cercana a 1.0, los factores de ajuste  $l_1$  y  $l_2$  (origen) serán aproximadamente iguales. Así, el  $SAVI$  supone que  $L = l_1 + l_2$ , donde el factor ( $L$ ) en la ecuación (7) se introduce para mantener los mismos límites que el  $NDVI$ . De esta forma, la ecuación que representa el  $SAVI$  está definida por:

$$IRC = \left( \frac{SAVI \times L}{(1 + L) - SAVI} \right) + \left( \frac{(1 + L) + SAVI}{(1 + L) - SAVI} \right) R \quad (16)$$

- VI generalized soil adjusted (*Generalized Soil Adjusted Vegetation Index*: Gilabert *et al.*, 2002):

$$GESAVI = \frac{IRC - b_s R - a_s}{IRC + Z} \quad (10)$$

- VI of paired proportions (Paz *et al.*, 2003):

$$IVPP = \frac{IRC - b_s R - a_s}{IRC} \quad (11)$$

where  $L$ ,  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  are values that are left constant ( $L=0.5$ ,  $X=0.08$ ,  $Y=0.16$  and  $Z=0.35$ , for values of reflectance in proportions) and the soil line ( $LAI=0$ ) is defined by the parameters  $a_s$  and  $b_s$ .

To understand the limitations of the VI, it is necessary to define the context of what is to be characterized. A VI attempts to approximate a straight line using only one pair of values ( $R$ ,  $IRC$ ) that represent an unknown amount of vegetation mixed with a soil of also unknown reflectance.

The hypotheses for characterizing a group of straight lines (iso- $LAI$ ) representing the growth dynamic of a crop can be stated as follows:

- a) assume the intersection of the lines at the origin (0, 0) and let the slope vary (cases of the  $RVI$  and  $NDVI$ ):

$$IRC = \left( \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \right) R = RVI \times R \quad (12)$$

- b) assume a slope of the lines and let the intersection with the axis  $IRC$  vary (cases of  $DVI$  and  $WDVI$ ):

$$IRC = DVI + R \quad (13)$$

$$IRC = WDVI + b_s R \quad (14)$$

The  $PVI$  is similar to the  $WDVI$ , but what varies is the intersection with the axis  $IRC$ , given that it is a function of the distance perpendicular to the soil line and increases from the intersection  $a_s$  of the soil line with the axis  $IRC$ .

- c) let the origin, generally in the third quadrant of the axis  $R$  and  $IRC$ , with coordinates ( $-1$  and  $-1_2$ ), and the slope vary (rest of the indices). For example, the  $SAVI$  was designed as a function of the  $NDVI$  adding constant values (for a given line iso- $LAI$ ) to the  $R$  and  $IRC$ :

La ecuación (16) implica una relación lineal entre la intersección con el eje  $IRC$  ( $a_{0,IAF}$ ) y la pendiente ( $b_{0,IAF}$ ) de la línea iso- $IAF$  (ecuación 1). El índice  $SAVI$  se diseñó específicamente para cumplir dos condiciones/hipótesis: que se traslape con la línea del suelo supuesta con  $a_s=0.0$  y  $b_s=1.0$ ; que se traslape con la línea de  $IAF=1.0$ . Los índices  $TSAVI$ ,  $OSAVI$ ,  $GESAVI$  e  $IVPP$  también suponen una relación lineal entre  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$ , al dejar estáticas las constantes que definen el origen de las líneas iso- $IAF$ . Para visualizar la hipótesis implícita en los índices discutidos, la Figura 2 muestra la relación entre  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  para valores de los índices que van de 0.0 a 0.95 (algunos índices no están definidos para el valor 1.0. En la misma figura se presenta la relación entre  $a_{0,IAF}$  y  $1/b_{0,IAF}$ , que es importante y se discute más adelante. La Figura 2 se construyó usando valores de la línea del suelo de  $a_s=0$  y  $b_s=1$ , por lo que el  $OSAVI$  es igual al  $TSAVI$  bajo esta condición. El resto de los índices que cambian su valor en función de la pendiente de las curvas iso- $IAF$ , incluido el  $IVPP$  y suponen  $a_{0,IAF}=0$  para todo valor de  $b_{0,IAF}$ , por lo que estarían representados por una línea recta vertical coincidente con el eje  $b_{0,IAF}$  de la Figura 2.

Con la intención de diseñar IV invariantes a efectos del suelo, es necesario definir en forma clara la estructura del problema y plantear un esquema correcto de solución que deberían cumplir los IV propuestos.

Para analizar los patrones de las líneas iso- $IAF$  y su relación con los IV, es necesario definir los siguientes índices:

$$dIRC = IRC - (a_s + b_s R) \tag{17}$$

$$dR = \left( \frac{IRC - a_s}{b_s} \right) - R \tag{18}$$

que están relacionados por:

$$dIRC = (\tan \alpha) dR = b_s dR \tag{19}$$

En la Figura 3 se muestra la relación entre  $dIRC$  y  $dR$ . Así,  $PVI$ ,  $TSAVI$ ,  $GESAVI$  y  $IVPP$  pueden reescribirse como:

$$PVI = \frac{dIRC}{\sqrt{1 + b_s^2}} \tag{20}$$

$$TSAVI = \frac{b_s dIRC}{R + b_s IRC - a_s b_s + X(1 + b_s^2)} \tag{21}$$

$$SAVI = \frac{(IRC + l_2) - (R + l_1)}{(IRC + l_2) + (R + l_1)} \tag{15}$$

Given that the soil line has a slope close to 1.0, the adjustment factors  $l_1$  and  $l_2$  (origin) will be approximately equal. Thus, the  $SAVI$  assumes that  $L=l_1+l_2$ , where the factor ( $L$ ) in the equation (7) is introduced to maintain the same limits as the  $NDVI$ . In this way, the equation that represents the  $SAVI$  is defined by:

$$IRC = \left( \frac{SAVI \times L}{(1 + L) - SAVI} \right) + \left( \frac{(1 + L) + SAVI}{(1 + L) - SAVI} \right) R \tag{16}$$

Equation (16) implies a linear relationship between the intersection with the axis  $IRC$  ( $a_{0,LAI}$ ) and the slope ( $b_{0,LAI}$ ) of the line iso- $LAI$  (equation 1). The index  $SAVI$  was specifically designed to satisfy two conditions/

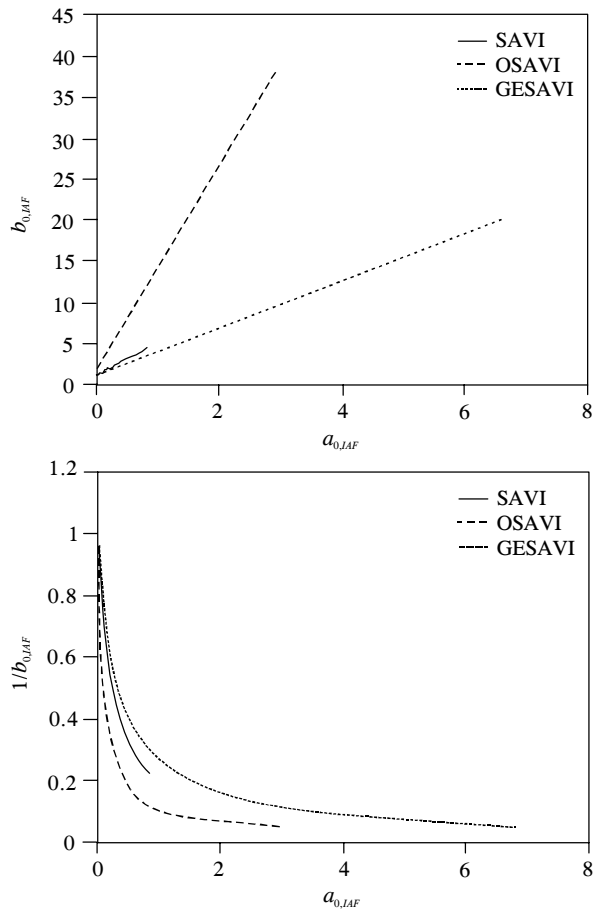


Figura 2. Relaciones entre  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$ ; y,  $a_{0,IAF}$  y  $1/b_{0,IAF}$  para los IV.

Figure 2. Relationships between  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$ ; and  $a_{0,LAI}$  and  $1/b_{0,LAI}$  for the VI.

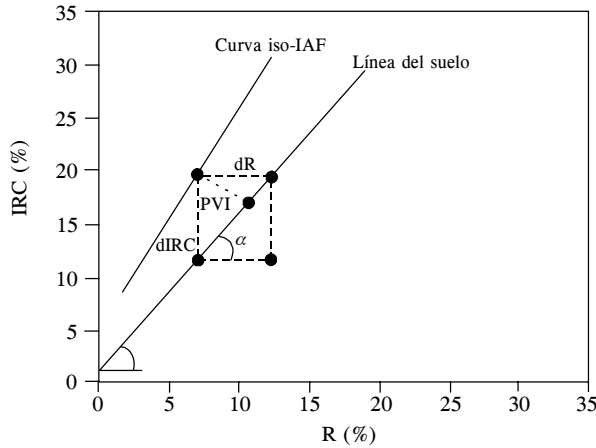


Figura 3. Relación entre los índices *dIRC* y *dR*.  
Figure 3. Relationship between the indices *dIRC* and *dR*.

$$GESAVI = \frac{dIRC}{IRC + Z} \quad (22)$$

$$IVPP = \frac{dIRC}{IRC} \quad (23)$$

En la Figura 4 se muestra la geometría general de la posición de una línea iso-IAF en relación con la línea del suelo. El punto de cruce entre ambas líneas (Figura 4) ésta dado por:

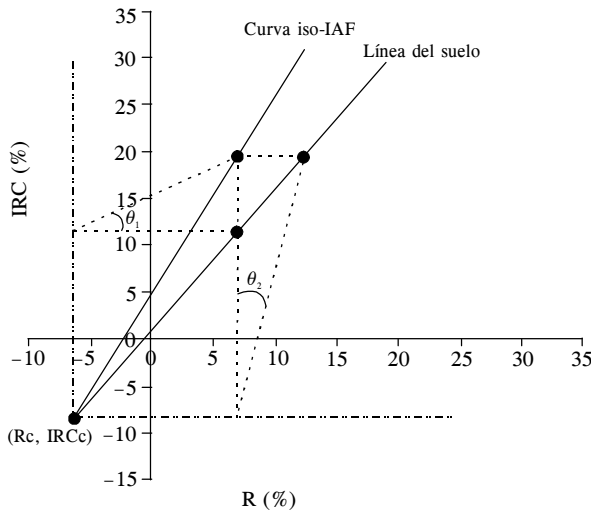


Figura 4. Relaciones geométricas entre las curvas iso-IAF y la línea del suelo.

Figure 4. Geometric relationships between the curves iso-LAI and the soil line.

hypotheses: that it overlaps with the assumed soil line with  $a_s=0.0$  and  $b_s=1.0$ ; that it overlaps with the line of  $LAI=1.0$ . The indices *TSAVI*, *OSAVI*, *GESAVI* and *IVPP* also assume a linear relationship between  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$ , as they leave static the constants that define the origin of the lines iso-LAI. To visualize the hypothesis implicit in the previously mentioned indices, Figure 2 shows the relationship between  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$  for values of the indices that go from 0.0 to 0.95 (some indices are not defined for the value 1.0). In the same figure, the relationship is presented between  $a_{0,LAI}$  and  $1/b_{0,LAI}$ , which is important and is discussed below. Figure 2 was constructed using values of the soil line of  $a_s=0$  and  $b_s=1$ , therefore the *OSAVI* is equal to the *TSAVI* under this condition. The rest of the indices that change their value as a function of the slope of the curves iso-LAI, including the *IVPP* assume  $a_{0,LAI}=0$  for all values of  $b_{0,LAI}$ , thus would be represented by a vertical straight line coinciding with the axis  $b_{0,LAI}$  of Figure 2.

With the intention of designing VI invariant to effects of the soil, it is necessary to clearly define the structure of the problem and to establish a correct scheme of solution that should be satisfied by the proposed VI.

To analyze the patterns of the lines iso-LAI and their relationship with the VI, it is necessary to define the following indices:

$$dIRC = IRC - (a_s + b_s R) \quad (17)$$

$$dR = \left( \frac{IRC - a_s}{b_s} \right) - R \quad (18)$$

which are related by:

$$dIRC = (\tan\alpha) dR = b_s dR \quad (19)$$

Figure 3 shows the relationship between *dIRC* and *dR*. Thus, *PVI*, *TSAVI*, *GESAVI* and *IVPP* can be rewritten as:

$$PVI = \frac{dIRC}{\sqrt{1 + b_s^2}} \quad (20)$$

$$TSAVI = \frac{b_s dIRC}{R + b_s IRC - a_s b_s + X(1 + b_s^2)} \quad (21)$$

$$GESAVI = \frac{dIRC}{IRC + Z} \quad (22)$$

$$Rc = \frac{a_s - a_{0,IAF}}{b_{0,IAF} - b_s} \quad (24)$$

$$IRC_c = \frac{a_{0,IAF}b_s - a_s b_{0,IAF}}{b_s - b_{0,IAF}} \quad (25)$$

De las propiedades invariantes entre dos líneas rectas que se cruzan (Gilabert *et al.*, 2002), se pueden establecer las siguientes relaciones (Figura 3 y 4):

$$\tan \theta_1 = \frac{dIRC}{R - Rc} = \frac{b_s dR}{R - Rc} \quad (26)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{dR}{IRC - IRC_c} = \frac{dIRC}{b_s(IRC - IRC_c)} \quad (27)$$

$$IVPP_R = \frac{dR}{R - Rc} = \frac{dIRC}{b_s(R - Rc)} \quad (28)$$

$$IVPP_{IRC} = \frac{dIRC}{IRC - IRC_c} = \frac{b_s dR}{IRC - IRC_c} \quad (29)$$

Los índices definidos por las relaciones (26) a (29), para curvas iso-IAF individuales, son IV perfectos para la eliminación del efecto del suelo.

De las ecuaciones 26 a 29, la relación entre ellas está dada por:

$$\tan \theta_1 = b_s IVPP_R \quad (30)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{IVPP_{IRC}}{b_s} \quad (31)$$

De los IV revisados, sólo GESAVI e IVPP tienen una estructura correcta, de acuerdo con las propiedades invariantes mostradas en las ecuaciones 26 a 29. Para determinar estas propiedades o índices invariantes (sin efecto del suelo) es necesario conocer los parámetros de las curvas iso-IAF. Puesto que esto no es posible, ya que sólo se cuenta con un punto ( $R$ ,  $IRC$ ) de la línea, es necesario suponer uno de los valores ( $Rc$ ,  $IRC_c$ ;  $IRC_c = a_s + b_s Rc$ ) o uno de los parámetros de la línea iso-IAF ( $a_{0,IAF}$ ,  $b_{0,IAF}$ ).

El problema de las relaciones (26) a (29), IV invariantes, es que se requiere conocer en forma dinámica los cruces de las líneas iso-IAF con la línea

$$IVPP = \frac{dIRC}{IRC} \quad (23)$$

Figure 4 shows the general geometry of the position of a line iso-LAI with respect to the soil line. The cross point between both lines (Figure 4) is given by:

$$Rc = \frac{a_s - a_{0,LAI}}{b_{0,LAI} - b_s} \quad (24)$$

$$IRC_c = \frac{a_{0,LAI}b_s - a_s b_{0,LAI}}{b_s - b_{0,LAI}} \quad (25)$$

From the invariant properties between two straight lines that cross (Gilabert *et al.*, 2002), the following relationships can be established (Figures 3 and 4):

$$\tan \theta_1 = \frac{dIRC}{R - Rc} = \frac{b_s dR}{R - Rc} \quad (26)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{dR}{IRC - IRC_c} = \frac{dIRC}{b_s(IRC - IRC_c)} \quad (27)$$

$$IVPP_R = \frac{dR}{R - Rc} = \frac{dIRC}{b_s(R - Rc)} \quad (28)$$

$$IVPP_{IRC} = \frac{dIRC}{IRC - IRC_c} = \frac{b_s dR}{IRC - IRC_c} \quad (29)$$

The indices defined by the relationships (26) to (29), for individual curves iso-LAI, are VI perfect for the elimination of the effect of the soil.

Of equations 26 to 29, the relationship among them is given by:

$$\tan \theta_1 = b_s IVPP_R \quad (30)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{IVPP_{IRC}}{b_s} \quad (31)$$

Of the VI that were analyzed, only GESAVI and IVPP have a correct structure, according to the invariant properties shown in equations 26 to 29. To determine these properties or invariant indices (without soil effect), it is necessary to know the parameters of the curves iso-LAI. Since this is not possible, because we have



del suelo. Para establecer una primera aproximación en relación al patrón temporal (crecimiento de la  $I_{AF}$ ) de la vegetación, es necesario conocer la relación entre los parámetros  $a_{0,I_{AF}}-b_{0,I_{AF}}$  para definir una relación funcional entre ellos. Los IV con una estructura similar al  $SAVI$  suponen una relación lineal entre estos parámetros.

### Índice espectral de la vegetación $NDVI_{Icp}$

Suponiendo un intervalo de valores del  $NDVI$  de 0 a 1 para la mezcla suelo-vegetación, el valor  $NDVI=0.0$  representa una línea del suelo (suelo desnudo, sin vegetación) con parámetros  $a_s=0.0$  y  $b_s=1.0$ . La condición  $NDVI=1.0$  representa el caso donde el suelo está totalmente cubierto por la vegetación (con la banda del  $R$  saturada; sin cambiar de valor).

En la Figura 1 se muestra que las intersecciones de las curvas iso- $I_{AF}$  son diferentes para cada valor del  $I_{AF}$ , aunque las pendientes de éstas siguen un patrón similar al mostrado por el  $NDVI$ . El  $NDVI$  supone que todas las líneas iso- $I_{AF}$  tienen un origen común en el espacio del  $R-IRC$  (0,0), y los cambios en la vegetación sólo se manifiestan por un cambio en la pendiente. De la Figura 1 resulta claro que la hipótesis implícita en el  $NDVI$  es incorrecta, por lo que se requiere ajustar las reflectividades del  $R$  y del  $IRC$  para que las hipótesis del  $NDVI$  reflejen la realidad.

De la definición de las líneas iso- $I_{AF}$  dada por la ecuación (1), para que las curvas iso- $I_{AF}$  tengan un origen en (0,0) es necesario que la reflectividad del  $IRC$  sea transformada como:

$$IRC_{Cs}=(IRC-a_{0,I_{AF}})=b_{0,I_{AF}}R \quad (32)$$

La reflectividad  $IRC_{Cs}$  está corregida por el efecto del suelo y cumple con que el patrón para las curvas de igual  $NDVI$  sea igual al de iso- $I_{AF}$ . El problema de este esquema de corrección del efecto del suelo en el  $NDVI$  es que es necesario conocer el valor del parámetro  $a_{0,I_{AF}}$  el cual varía con el  $I_{AF}$  de la vegetación. Para conocer el valor de  $a_{0,I_{AF}}$  es necesario establecer la relación entre  $a_{0,I_{AF}}-b_{0,I_{AF}}$  de las curvas iso- $I_{AF}$ .

En la Figura 5 se muestra la relación entre los parámetros  $a_{0,I_{AF}}$  y  $b_{0,I_{AF}}$  de la Figura 1, para el ciclo de crecimiento del cultivo desde el suelo desnudo hasta su cubrimiento completo por la vegetación. En ella se observa que en la etapa inicial hay un patrón de comportamiento tipo exponencial, hasta el punto donde la banda  $R$  se satura (no cambia de valor). Después del punto de saturación de la banda  $R$ , el patrón es del tipo lineal. El punto inicial de la curva  $a_{0,I_{AF}}-b_{0,I_{AF}}$  (Figura 4) representa el caso de suelo desnudo ( $a_{0,I_{AF}=0} = a_s$  y  $b_{0,I_{AF}=0} = b_s$ ). El punto donde  $a_{0,I_{AF}}$  alcanza su

only one point ( $R, IRC$ ) of the line, it is necessary to assume one of the values ( $Rc, IRCc$ ;  $IRCc=a_s+b_sRc$ ) or one of the parameters of the line iso- $LAI$  ( $a_{0,LAI}, b_{0,LAI}$ ).

The problem of the relationships (26) to (29) VI, invariant is that it requires dynamic knowledge of the crosses of the lines iso- $LAI$  with the soil line. To establish an initial approximation with respect to the temporal pattern (growth of the  $LAI$ ) of the vegetation, it is necessary to know the relationship between the parameters  $a_{0,LAI}-b_{0,LAI}$  to define a functional relationship between them. The VI with a structure similar to the  $SAVI$  assume a linear relationship between these parameters.

### Vegetation spectral index $NDVI_{Icp}$

Assuming an interval of values of the  $NDVI$  from 0 to 1 for the soil-vegetation mixture, the value  $NDVI=0.0$  represents a soil line (bare soil, without vegetation) with parameters  $a_s=0.0$  and  $b_s=1.0$ . The condition  $NDVI=1.0$  represents the case in which the soil is totally covered by the vegetation (with the  $R$  band saturated; without change of value).

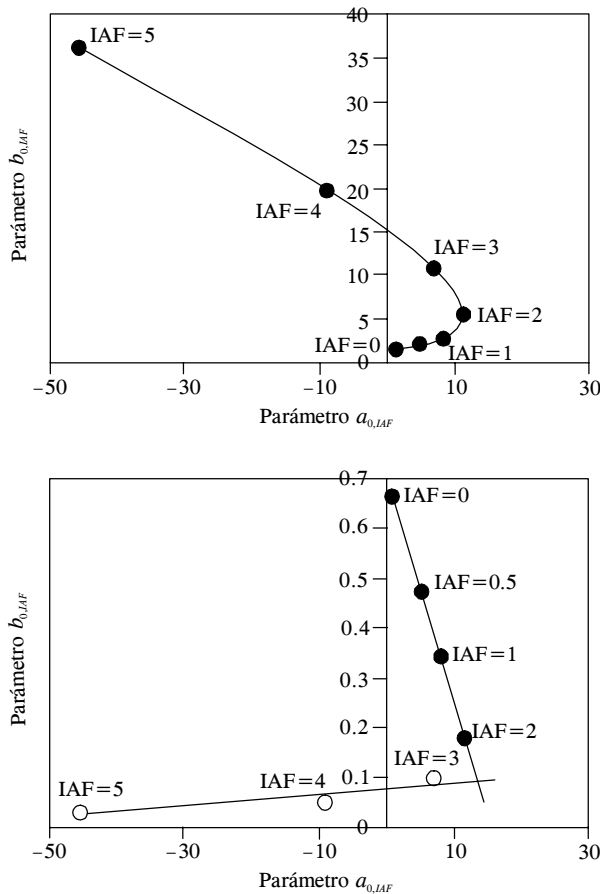
Figure 1 shows that the intersections of the curves iso- $LAI$  are different for each value of the  $LAI$ , although their slopes follow a pattern similar to that shown by the  $NDVI$ . The  $NDVI$  assumes that all the lines iso- $LAI$  have a common origin in the space of the  $R-IRC$  (0,0), and the changes in the vegetation are only manifested by a change in slope. From Figure 1 it is clear that the hypothesis implicit in the  $NDVI$  is incorrect, thus it is necessary to adjust the reflectances of the  $R$  and of the  $IRC$  so that the hypotheses of the  $NDVI$  reflect reality.

From the definition of the lines iso- $LAI$  given by equation (1), for the curves iso- $LAI$  to have an origin in (0,0), it is necessary that the reflectance of the  $IRC$  be transformed as follows:

$$IRC_{Cs}=(IRC-a_{0,LAI})=b_{0,LAI}R \quad (32)$$

The reflectance  $IRC_{Cs}$  is corrected by the effect of soil and complies with the requirement that the pattern for the curves of equal  $NDVI$  be equal to that of iso- $LAI$ . The problem of this scheme of correction of the soil effect in the  $NDVI$  is that it is necessary to know the value of the parameter  $a_{0,I_{AF}}$ , which varies with the  $LAI$  of the vegetation. To know the value of  $a_{0,LAI}$ , it is necessary to know the relationship between  $a_{0,LAI}-b_{0,LAI}$  of the curves iso- $LAI$ .

Figure 5 shows the relationship between the parameters  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$  of Figure 1, for the growth cycle of the crop from bare soil to its complete coverage by the vegetation. It can be observed that in the initial



**Figura 5. Patrón entre los valores  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  de las curvas iso-IAF.**  
**Figure 5. Pattern among the values  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$  of the curves iso-LAI.**

valor máximo (punto de transición del patrón exponencial al lineal), representa el término de la fase de crecimiento exponencial e inicio de la lineal. El punto final del patrón lineal de la curva  $a_{0,IAF}-b_{0,IAF}$  representa la situación donde la banda del IRC se satura, lo cual ocurre cuando el IAF alcanza su valor máximo.

En la misma Figura 5 se muestra una transformación ( $b_{0,IAF} \rightarrow 1/b_{0,IAF}$ ) que vuelve aproximadamente lineal la función expo-lineal. Esta transformación fue elegida para modelar en forma adecuada la transición entre las fases exponencial y lineal. Comparando las hipótesis de los IV (Figura 2), con las definidas por las simulaciones radiativas (Figura 5), resultan claras las diferencias entre lo supuesto y lo teórico (y experimental, como se verá más adelante).

Para validar la propuesta de la relación entre  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  enseguida se analizan dos experimentos de campo con cultivos contrastantes: maíz (*Zea mays* L.) (Bausch, 1993) y algodón (*Gossypium* spp) (Huete *et al.*, 1985). En ambos experimentos se utilizaron

stage there is an exponential type behaviour pattern, up to the point in which the R band becomes saturated (no more change of value). After the saturation point of the R band, the pattern is of the linear type. The initial point of the curve  $a_{0,LAI}-b_{0,LAI}$  (Figure 4) represents the case of bare soil ( $a_{0,LAI=0}=a_s$  and  $b_{0,LAI=0}=b_s$ ). The point where  $a_{0,LAI}$  reaches its maximum value (transition point of the exponential to the linear pattern), represents the end of the exponential growth phase and the start of the linear one. The final point of the linear pattern of the curve  $a_{0,LAI}-b_{0,LAI}$  represents the situation where the band of the IRC becomes saturated, which occurs when the LAI reaches its maximum value.

Figure 5 also shows a transformation ( $b_{0,LAI} \rightarrow 1/b_{0,LAI}$ ) which turns the expo-linear function approximately linear. This transformation was chosen to adequately model the transition between the exponential and linear phases. Comparing the hypotheses of the VI (Figure 2), with those defined by the radiative simulations (Figure 5), the differences between the assumed and the theoretical (and experimental, as will be seen below) are clear.

To validate the proposal of the relationship between  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$ , an analysis is made of two field experiments with contrasting crops: maize (*Zea mays* L.) (Bausch, 1993) and cotton (*Gossypium* spp) (Huete *et al.*, 1985). In both experiments, sliding trays were used with different soils under the crops. In the references mentioned these experiments are described in detail.

Figure 6 shows the curves iso-LAI of the experiment of maize and cotton, in the spectral space R-IRC. The pattern between the parameters  $a_{0,LAI}$  of the curves iso-LAI OF Figure 6 is similar to that shown in Figure 1.

A good approximation to the exponential behaviour shown in Figure 5, including its transition, is obtained with the equation:

$$\frac{1}{b_{0,LAI}} = c + da_{0,LAI} \quad (33)$$

Figure 7 shows a good fit of the equation (33) to the data of maize and cotton. The data of R and IRC are normalized by multiplying the reflectances by the cosine of the solar zenithal angle to reduce the effect of the sol-sensor geometry (Bolaños *et al.*, 2007). Figure 7 also shows the fit of the same model to the data of the linear phase; although the value of slope d, of equation (33), shows that  $1/b_{0,LAI}$  is practically constant.

To simplify the model of Figure 7, a value of  $c=1.0$  ( $a_s=0.0$  and  $b_s=1.0$ ) was assumed, considering that the values of the soil line are unknown. As a first semi-empirical approximation of the relationship  $a_{0,LAI}$

charolas deslizantes con diferentes suelos debajo de los cultivos. En las referencias mencionadas se detallan esos experimentos.

En la Figura 6 se muestran las curvas iso-IAF del experimento de maíz y algodón, en el espacio espectral R-IRC. El patrón entre los parámetros  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  de las curvas iso-IAF de la Figura 6 es similar al mostrado en la Figura 1.

Una buena aproximación al comportamiento exponencial mostrado en la Figura 5, incluyendo su transición, se obtiene con la ecuación:

$$\frac{1}{b_{0,IAF}} = c + da_{0,IAF} \quad (33)$$

En la Figura 7 se muestra un buen ajuste de la ecuación (33) a los datos de maíz y algodón. Los datos de R e IRC se normalizaron multiplicando las

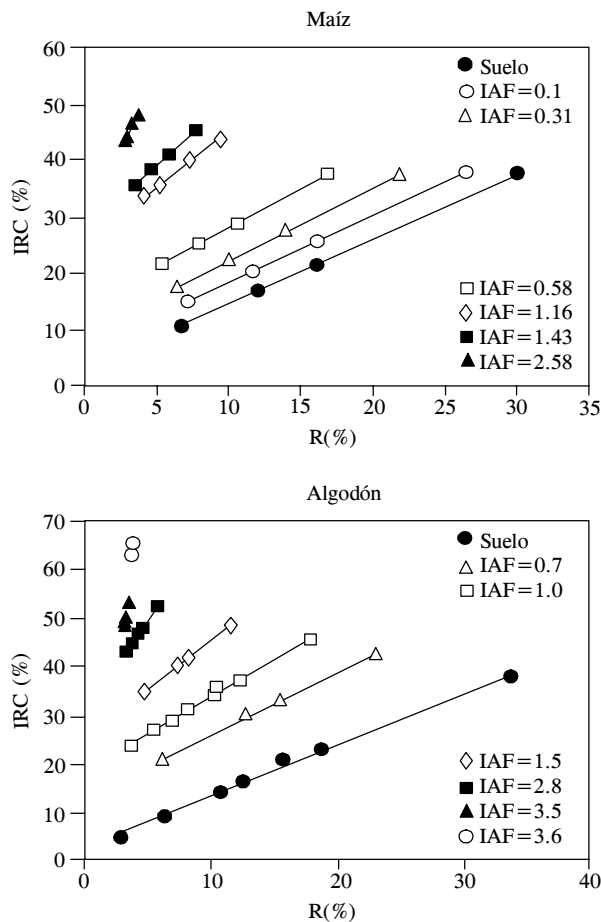


Figura 6. Curvas iso-IAF del experimento de maíz (Bausch, 1993) y algodón (Huete et al., 1985).

Figure 6. Curves iso-LAI of the maize experiment (Bausch, 1993) and cotton experiment (Huete et al., 1985).

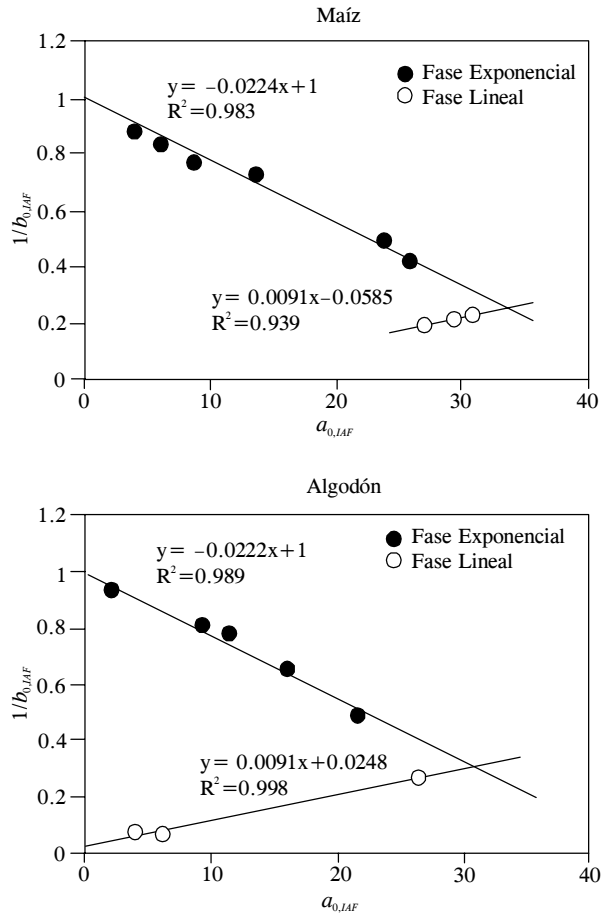


Figura 7. Modelo ajustado entre  $a_0$  y  $b_0$  para los experimentos de maíz y algodón.

Figure 7. Fitted model between  $a_0$  and  $b_0$  for the experiments of maize and cotton.

$-b_{0,LAI}$  for crops, the values  $c=1.0$  and  $d=-0.022$  can be used. Paz and Bolaños (2004)<sup>3</sup> discuss this situation, analyze other crops, and show that the use of the values of Figure 7 results in adequate fits for other crops, including grasses.

The design of a generalized vegetation index should be based on the slope of the curves iso-LAI (Paz and Bolaños, 2004)<sup>3</sup>. Thus, solving equation (33) for  $a_{0,LAI}$ , and substituting it in equation (1), then  $b_{0,LAI}$  can be obtained from:

$$b_{0,LAI} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = R$$

$$B = -\left(\frac{c}{d} + IRC\right) \quad (34)$$

$$C = \frac{1}{d}$$

reflectividades por el coseno del ángulo cenital solar, para reducir el efecto de la geometría sol-sensor (Bolaños *et al.*, 2007). En la Figura 7 también se muestra el ajuste del mismo modelo a los datos de la fase lineal; aunque el valor de la pendiente  $d$ , de la ecuación (33), muestra que  $1/b_{0,IAF}$  es prácticamente constante.

Para simplificar el modelo de la Figura 7 se supuso un valor de  $c=1.0$  ( $a_s=0.0$  y  $b_s=1.0$ ), considerando que se desconocen las constantes de la línea del suelo. Como una primera aproximación semi-empírica de la relación  $a_{0,IAF}-b_{0,IAF}$  para cultivos, se pueden utilizar los valores  $c=1.0$  y  $d=-0.022$ . Paz y Bolaños (2004)<sup>3</sup> discuten esta situación, analizan otros cultivos, y muestran que el uso de las constantes de la Figura 7 resulta en ajustes adecuados para otros cultivos, incluidos los pastos.

El diseño de un índice de vegetación generalizado debe basarse en la pendiente de las curvas iso-*IAF* (Paz y Bolaños, 2004)<sup>3</sup>. Así, resolviendo la ecuación (33) para  $a_{0,IAF}$ , y sustituyéndola en la ecuación (1), se tiene que  $b_{0,IAF}$  puede obtenerse de:

$$\begin{aligned}
 b_{0,IAF} &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\
 A &= R \\
 B &= -\left(\frac{c}{d} + IRC\right) \\
 C &= \frac{1}{d}
 \end{aligned} \tag{34}$$

Para estimar el valor de  $b_{0,IAF}$ , sólo es necesario usar los valores de  $R$  e  $IRC$ , ya que los valores de  $c$  y  $d$  son supuestos. Así, dado un punto de una línea iso-*IAF*,  $(R,IRC)$ , su pendiente se calcula a partir de la ecuación (34). Con el valor de  $b_{0,IAF}$  calculado, se puede calcular  $a_{0,IAF}$  usando la ecuación (33), resolviéndola para  $a_{0,IAF}$ . De la ecuación del *NDVI*, corregida por el efecto del suelo, se puede construir un índice sin este efecto (*NDVI<sub>cp</sub>*, del Colegio de Postgraduados, el cual varía de 0 a 1):

$$NDVI_{cp} = \frac{(IRC - a_{0,IAF}) - R}{(IRC - a_{0,IAF}) + R} = \frac{b_{0,IAF} - 1}{b_{0,IAF} + 1} \tag{35}$$

En la Figura 8 se muestran los resultados de usar la ecuación (35) en el cultivo de algodón y el de maíz,

To estimate the value of  $b_{0,LAI}$ , it is only necessary to use the values of  $R$  and  $IRC$ , given that the values of  $c$  and  $d$  are assumed. Thus, given a point of a line iso-*LAI*,  $(R,IRC)$ , its slope is calculated from equation (34). With the value of  $b_{0,LAI}$  calculated,  $a_{0,LAI}$  can be calculated using equation (33), solving it for  $a_{0,LAI}$ . From the equation of the *NDVI*, corrected by the effect of soil, an index without this effect can be developed (*NDVI<sub>cp</sub>*, of the Colegio de Postgraduados, which varies from 0 to 1):

$$NDVI_{cp} = \frac{(IRC - a_{0,LAI}) - R}{(IRC - a_{0,LAI}) + R} = \frac{b_{0,LAI} - 1}{b_{0,LAI} + 1} \tag{35}$$

Figure 8 shows the results of using equation (35) in the cotton and maize crops, including the data of the senescence phase of an experiment with maize in Montecillo, México, with two conditions of soil moisture. It is observed that the effect of soil was strongly reduced when the approximated model was used for estimating  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$  (same values for all of the growth stages). An approximately linear relationship was also observed between the *NCVI<sub>cp</sub>* and the *LAI* in the exponential phase, and that in the linear phase the values of the *NDVI<sub>cp</sub>* became saturated (their value changes very little).

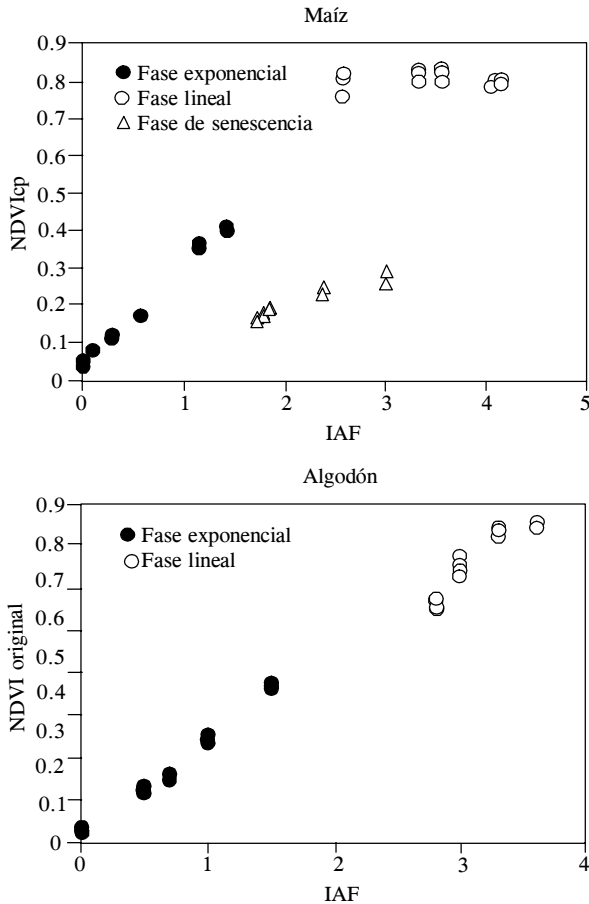
In the case of the cotton experiment, the linear phase of the vegetative stage is confused with the start of the reproduction stage, therefore a saturation of the *NDVI<sub>cp</sub>* does not appear, product of change in the optical properties of the phytoelements (reproductive organs, additional to the leaves). Something similar happens in the maize experiment, but in a less pronounced way.

In comparison, Figure 9 shows the relationship between the original *NDVI* and the *LAI*, and a great dispersion is observed in the exponential growth phase of the maize and the cotton.

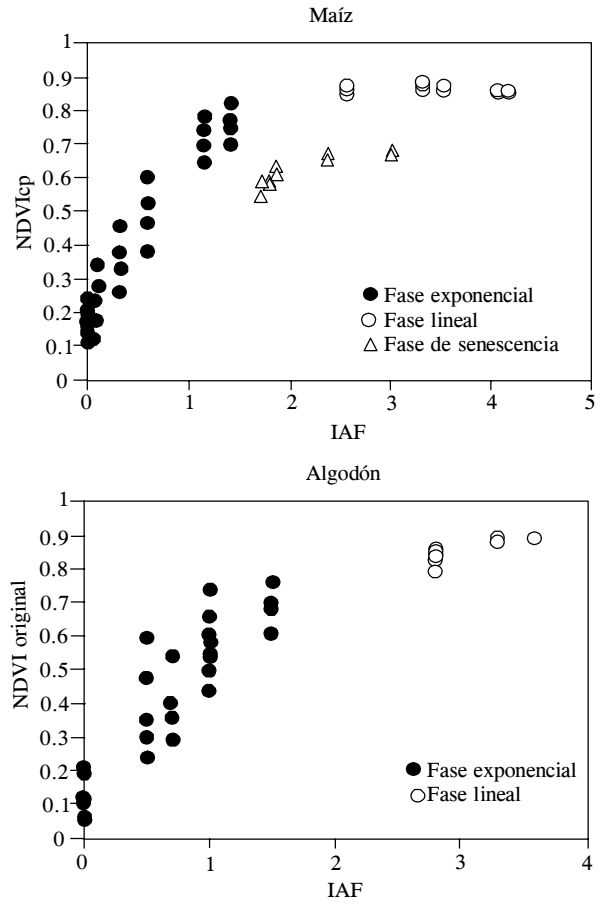
Although it can be argued that, given that the *NDVI<sub>cp</sub>* was formulated using the non-linear structure between  $a_{0,LAI}$  and  $b_{0,LAI}$  (verified theoretically and experimentally), contrary to the rest of the indices that assume it to be linear and use the hypothesis of a fixed slope or intersection, then the errors of estimation of the *LAI* using the *NDVI<sub>cp</sub>* will be lower. One exception will be the *VI* that approximate, linearly, segments of the curve  $a_{0,LAI}-b_{0,LAI}$ .

To verify the argument that, because of its design, the *NDVI* is better than the rest of the indices analyzed,

<sup>3</sup> Paz, F. y M. Bolaños. 2004. Bases para el diseño de un índice de vegetación generalizado, Reporte Octubre-Noviembre para AGROASEMEX, Grupo de Gestión de Recursos Naturales Asistida por Sensores Remotos, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 155 p.



**Figura 8. Relación entre el NDVI<sub>cp</sub> y el IAF para los experimentos con maíz y algodón.**  
**Figure 8. Relationship between the NDVI<sub>cp</sub> and the LAI for the experiments with maize and cotton.**



**Figura 9. Relación entre el NDVI y el IAF para experimentos de maíz y algodón.**  
**Figure 9. Relationship between the NDVI and the LAI for experiments of maize and cotton.**

incluyendo datos de la fase de senescencia de un experimento con maíz en Montecillo, México, con dos condiciones de humedad del suelo. Se observa que el efecto del suelo se redujo fuertemente al usar el modelo aproximado para estimar  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  (mismos valores para todas las fases del crecimiento). También se observa una relación aproximadamente lineal entre el NDVI<sub>cp</sub> y el IAF en la fase exponencial, y que en la fase lineal los valores del NDVI<sub>cp</sub> se saturan (su valor cambia muy poco).

En el caso del experimento de algodón, la fase lineal de la etapa vegetativa se confunde con el inicio de la etapa de reproducción, por lo que no se presenta una saturación del NDVI<sub>cp</sub>, producto de cambio en las propiedades ópticas de los fitoelementos (órganos reproductivos, adicionales a las hojas). Algo similar sucede en el experimento del maíz, pero en forma menos pronunciada.

En comparación, en la Figura 9 se muestra la relación entre el NDVI original y el IAF, y se observa una

an efficiency parameter (inverse) defined by Gilbert *et al.* (2002) was used:

$$T_{IV}(LAI) = \frac{\sigma_{LAI}}{\sigma} \times 100 \quad (36)$$

where  $\sigma_{LAI}$  is the standard deviation for the values of the VI corresponding to a value of the LAI and  $\sigma$  is the standard deviation of the values of the VI for all the interval of variation of the LAI.  $T_{VI}(LAI)$  measures the efficiency (%) of the VI to reduce the effect of the soil on the estimations of the LAI, where the smaller the  $T_{VI}(LAI)$ , the more efficient the VI will be.

Given that the main interest was to reduce the effect of soil on the VI, only the experimental data shown in Figure 6 were analyzed for the exponential phase. As the vegetation covers the soil, the VI tend to become stabilized and have small errors.

gran dispersión en la fase exponencial del crecimiento del maíz y el algodón.

Aunque puede argumentarse que dado que el  $NDVI_{cp}$  fue formulado usando la estructura no-lineal entre  $a_{0,IAF}$  y  $b_{0,IAF}$  (verificada teórica y experimentalmente), a diferencia del resto de los índices que la suponen lineal y usan la hipótesis de una intersección o pendiente fija, entonces los errores de estimación del  $IAF$  usando el  $NDVI_{cp}$  serán menores. Una excepción serán los IV que aproximen, linealmente, segmentos de la curva  $a_{0,IAF}-b_{0,IAF}$ .

Para verificar el argumento de que, por diseño, el  $NDVI_{cp}$  es mejor que el resto de los índices revisados, se utilizó un parámetro de eficiencia (inversa) definido por Gilabert *et al.*, 2002:

$$T_{IV}(IAF) = \frac{\sigma_{IAF}}{\sigma} \times 100 \quad (36)$$

donde  $\sigma_{IAF}$  es la desviación estándar para los valores del IV correspondientes a un valor del  $IAF$  y  $\sigma$  es la desviación estándar de los valores del IV para todo el intervalo de variación del  $IAF$ .  $T_{IV}(IAF)$  mide la eficiencia (%) de los IV para reducir el efecto del suelo en las estimaciones del  $IAF$ , donde entre más pequeño sea  $T_{IV}(IAF)$ , más eficiente será el IV.

Puesto que el mayor interés es reducir el efecto del suelo en los IV, sólo se analizaron los datos experimentales mostrados en la Figura 6 para la fase exponencial. A medida que la vegetación cubre al suelo, los IV tienden a estabilizarse y tienen errores pequeños.

En el Cuadro 1 se muestran las eficiencias de los IV analizados para el experimento del maíz y en el Cuadro 2 para el de algodón. Tal como se comentó anteriormente, validando los argumentos, el  $NDVI_{cp}$  fue superior, en promedio y en casi todos los valores particulares del  $IAF$ , a todos los IV analizados. Un índice que se comportó muy bien fue el  $GESAVI$ , concordando con su hipótesis intrínseca de suponer un cruce fijo óptimo entre las líneas iso- $IAF$  con la línea del suelo. También el  $SAVI$  y  $TSAVI$  se comportaron bien y reflejan la condición de optimización para valores del  $IAF$  alrededor de 1, como es el caso mostrado en los Cuadros 1 y 2.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la estructura correcta para desarrollar un índice de vegetación que aproxime la dinámica de la mezcla suelo-vegetación. Los índices comunes en sensores remotos se caracterizan por aproximaciones empíricas con hipótesis implícitas incongruentes con la evidencia experimental o teórica.

In Table 1 are shown the efficiencies of the IV analyzed for the maize experiment, and in Table 2, for that of cotton. As mentioned previously, validating the arguments, the  $NDVI_{cp}$  was superior, on the average and in almost all of the particular values of the  $LAI$ , to all of the VI analyzed. One index that behaved very well was the  $GESAVI$ , concurring with its intrinsic hypothesis of assuming an optimum fixed cross between the lines iso- $LAI$  with the soil line. Also  $SAVI$  and  $TSAVI$  behaved well and reflect the condition of optimization for values of the  $LAI$  close to 1, as is the case shown in Tables 1 and 2.

## CONCLUSIONS

In the present study an analysis was made of the correct structure for developing a vegetation index that approximates the dynamic of the soil-vegetation mixture. The indices common in remote sensors are characterized by empirical approximations with implicit hypotheses that are incongruent with the experimental or theoretical evidence.

Using the notion of invariant indices for the curves iso- $LAI$  and the structure of their dynamic pattern, a VI was designed similar to the  $NDVI$ , but with the correct structure. This index was validated using information from field experiments for maize and cotton, proving itself to be superior to the classic  $NDVI$  (and the rest of the VI presented).

—End of the English version—



Usando el planteamiento de índices invariantes para las curvas iso- $IAF$  y la estructura del patrón dinámico de ellas, se diseñó un IV similar al  $NDVI$ , pero con la estructura correcta. Este índice se validó usando información de experimentos en campo para maíz y algodón, mostrándose que es superior al  $NDVI$  clásico (y los demás IV presentados).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con apoyo del CONACYT, convenio CONACYT-2002-C01-41792, del proyecto Agricultura Asistida por Sensores Remotos, y el de AGROASEMEX, S.A., contrato "Desarrollo de un Seguro Ganadero con Base en Sensores Remotos", 2004-2005.

## LITERATURA CITADA

Baret, F., and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35:161-173.

**Cuadro 1. Eficiencias de los IV para el experimento del maíz.**  
**Table 1. Efficiencies of the VI for the maize experiment.**

Índice de Vegetación	IAF							Promedio	Desviación Estándar
	0.004	0.02	0.1	0.31	0.58	1.16	1.43		
NDVI <sub>cp</sub>	4.31	<b>3.08</b>	<b>2.37</b>	<b>2.83</b>	<b>1.03</b>	4.23	<b>2.62</b>	<b>2.72</b>	1.19
NDVI	19.48	21.79	29.31	35.08	39.26	24.17	18.96	28.98	8.44
RVI	5.29	6.14	10.27	16.65	30.69	58.78	66.43	13.81	10.45
WDVI	<b>3.13</b>	3.66	3.76	8.42	10.15	18.50	18.54	5.82	3.23
PVI	<b>3.13</b>	3.66	3.76	8.42	24.94	18.50	18.54	8.78	9.28
DVI	13.72	11.36	14.24	17.46	17.19	22.48	21.81	14.80	2.55
WDVI	3.13	3.66	3.76	8.42	10.15	18.50	18.54	5.82	3.23
SAVI	4.57	3.97	3.32	3.20	4.58	<b>3.10</b>	3.07	3.93	0.66
TSAVI	5.09	4.98	8.69	11.99	17.02	10.29	7.18	9.55	5.08
OSAVI	7.18	9.82	13.73	16.15	19.97	11.68	8.25	13.37	5.06
GESAVI	4.74	5.15	3.85	3.00	2.64	3.82	4.16	3.88	1.08
IVPP	9.14	7.90	16.37	21.30	24.10	11.87	8.63	15.76	7.18

Nota: Los valores en negritas indican los mejores (más eficientes).

**Cuadro 2. Eficiencias de los IV para el experimento del algodón.**  
**Table 2. Efficiencies of the VI for the cotton experiment.**

Índice de Vegetación	IAF					Promedio	Desviación Estándar
	0	0.5	0.7	1	1.5		
NDVI <sub>cp</sub>	<b>6.78</b>	<b>5.85</b>	5.11	6.44	4.42	<b>5.72</b>	0.96
NDVI	25.83	65.24	47.10	42.21	27.26	41.53	16.15
RVI	9.10	56.49	39.49	75.07	78.58	51.75	28.53
WDVI	8.30	16.36	15.83	20.80	25.96	17.45	6.54
PVI	8.30	16.36	15.83	20.80	40.28	20.31	12.03
DVI	10.07	21.35	20.06	23.57	27.91	20.59	6.59
WDVI	8.30	16.36	15.83	20.80	25.96	17.45	6.54
SAVI	10.00	9.75	8.79	26.28	<b>1.08</b>	11.18	9.21
TSAVI	14.02	23.52	21.41	19.21	12.27	18.08	4.80
OSAVI	12.22	30.74	26.31	22.40	14.14	21.16	7.89
GESAVI	12.13	6.55	<b>4.08</b>	<b>4.00</b>	4.29	6.21	3.47
IVPP	32.83	36.05	27.80	21.23	12.18	26.02	9.55

Nota: Los valores en negritas indican los mejores (más eficientes).

Baret, F., G. Guyot, and D. J. Major. 1989. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *In: Proceedings of IGARSS'89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canada. Vol. 3, pp: 1355-1358.*

Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment. 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.*

Clevers, J. G. P. W. 1989. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment. 29: 25-37.*

Gilbert, M. A., J. González-Piqueras, F. J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment. 82: 303-310.*

Huete, A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment. 25: 295-309.*

Huete, A. R., y R. D. Jackson, 1987. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on rangelands. *Remote Sensing of Environment, 23: 213-232.*

Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment. 17: 35-53.*

Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology. 50: 663-666.*

Liu, H. Q., and A. Huete. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 33: 457-465.*

Meza Díaz, B., y G.A. Blackburn. 2003. Remote sensing of mangrove biophysical properties: evidence from a laboratory simulation of the possible effects of background variation on spectral indices. *International Journal of Remote Sensing. 24:53-75.*

Paz, F., L. A. Palacios, E. Palacios, M. Martínez, y E. Mejía. 2003. Un índice de vegetación sin efecto atmosférico: IVPP. *In: A. de Alba, L. Reyes y M. Tiscareño (eds), Memoria del Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos en Agricultura México-USA. INIFAP-SAGARPA, Aguascalientes, México. pp: 46-51.*

Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia, 39:293-301.*

- Pearson, R. L., and L. D. Miller. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. *In: Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM International, Ann Arbor, MI. pp: 1357-1381
- Price, J. C. 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*. 41: 29-34.
- Qi, J., A. Chehbouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr, and S. Sorooshian. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 48:119-126.
- Richardson, A. J., and C. L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*. 43: 1541-1552.
- Richardson, A. J., and C. L. Wiegand, 1991. Comparison of two models for simulating the soil vegetation composite reflectance of a developing cotton canopy. *International Journal of Remote Sensing*. 11:447-459.
- Rondeaux, G., M. Steven, and F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55:97-107.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, MASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp: 1-371.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographics infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8: 127-150.
- Xia, L. 1994. A two-axis adjusted vegetation index (TWVI). *International Journal of Remote Sensing*. 15:1447-1458
- Yoshioka, H., T. Miura, A. R. Huete, and B. D. Ganapol, 2000. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. *Remote Sensing of Environment*. 74: 313-326.