

# OPTIMIZACIÓN DEL ÍNDICE ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN NDVI<sub>cp</sub>

## OPTIMIZATION OF THE SPECTRAL VEGETATION INDEX NDVI<sub>cp</sub>

Fernando Paz-Pellat<sup>1\*</sup>, Martín Bolaños-González<sup>1</sup>, Enrique Palacios-Vélez<sup>1</sup>,  
Luís A. Palacios-Sánchez<sup>1</sup>, Mario Martínez-Menes<sup>1</sup>, Alfredo Huete<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Gestión de Riesgos y Recursos Naturales Asistida por Sensores Remotos. Colegio de Postgraduados. 56230. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México. (pellat@colpos.mx). <sup>2</sup>University of Arizona. Department of Soil, Water and Environment Sciences 1200 E. South Campus Dr., Rm. 429 Shantz Bldg. #38 Tucson, AZ 85721-0038.

### RESUMEN

La optimización de los índices espectrales de la vegetación para reducir el efecto del suelo y de la atmósfera, requiere hipótesis fuertes cuando no hay conocimiento relacionado con las variables atmosféricas y sólo información contenida en las imágenes satelitales. La optimización del índice NDVI<sub>cp</sub>, diseñado para minimizar el efecto del suelo, es analizada con una perspectiva de su factibilidad y de las restricciones asociadas a este objetivo. Para explicar la problemática de la optimización del índice espectral de la vegetación NDVI<sub>cp</sub>, se analizó la estructura matemática de los efectos atmosféricos y se formuló el NDVI<sub>cp</sub> en función de esta estructura para analizar el problema de minimización de los efectos conjuntos del suelo y de la atmósfera. Los análisis mostraron que sin el conocimiento del tipo de aerosol (espesor óptico de la atmósfera) y modelo atmosférico, los intentos de reducción o eliminación de los efectos atmosféricos son indeterminados (implican soluciones múltiples al problema). Si se conocen la atmósfera y el aerosol, pero no el espesor óptico atmosférico, es posible minimizar los efectos atmosféricos y del suelo usando un esquema de aproximación de las constantes del índice NDVI<sub>cp</sub> al caso sin atmósfera.

**Palabras clave:** Optimización, efecto del suelo y atmósfera, patrones estructurales.

### INTRODUCCIÓN

Los efectos atmosféricos presentes en la información espectral de las imágenes satelitales reducen su potencial de aplicación en la agricultura, ya que introducen un factor externo en los patrones de crecimiento de la vegetación. En las aplicaciones de la tecnología de los sensores remotos, la información espectral captada por éstos sufre distorsiones importantes que producen ruidos que contaminan las señales recibidas a nivel exo-atmosférico. La radiación solar emitida por el sol (radianza espectral, si se refiere a un ancho de banda específico), atraviesa la atmósfera

### ABSTRACT

The optimization of the spectral vegetation indices to reduce the effects of soil and atmosphere, requires strong hypotheses when there is no knowledge related to the atmospheric variables and only information contained in the satellite images. The optimization of the index NDVI<sub>cp</sub>, designed to minimize the effect of soil, is analyzed under a perspective of its viability and of the restrictions associated with this objective. To explain the problematic of the optimization of the spectral vegetation index NDVI<sub>cp</sub>, an analysis was made of the mathematical structure of the atmospheric effects, and the NDVI<sub>cp</sub> was formulated as a function of this structure to analyze the problem of minimization of the joint effects of soil and of the atmosphere. The analyses showed that without the knowledge of the type of aerosol (optical thickness of the atmosphere) and atmospheric model, the attempts at reduction or elimination of the atmospheric effects are indeterminated (imply multiple solutions to the problem). If the atmosphere and aerosol are known, but not the atmospheric optical thickness, it is possible to minimize the atmospheric effects and of the soil using a scheme of approximation of the constants of the NDVI<sub>cp</sub> index to the case without atmosphere.

**Key words:** Optimization, effect of soil and atmosphere, structural patterns.

### INTRODUCTION

The atmospheric effects present in the spectral information of the satellite images reduce their potential of application in agriculture, given that they introduce an external factor in the growth patterns of vegetation. In the applications of remote sensing technology, the spectral information capted by these sensors suffers important distortions which produce noises that contaminate the signals received at the exo-atmospheric level. The solar radiation emitted by the sun (spectral radiance, if referring to a specific band width), crosses the terrestrial atmosphere, suffers dispersions (simple and multiple) and absorptions by gases and aerosols (dust, smoke, contaminant particles), so that the fraction of the solar radiation

\*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2007. Aprobado: Septiembre, 2008.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 42: 925-937. 2008.

terrestre, sufre dispersiones (simples y múltiples) y absorciones por gases y aerosoles (polvo, humo, partículas de contaminantes), de tal manera que la fracción de la radiación solar que llega a la superficie terrestre es reflejada por los objetos en ella y re- enviada a la atmósfera. Así, la radiación reflejada por los objetos terrestres atraviesa de nuevo la atmósfera, sufriendo dispersiones y absorciones, hasta que una fracción relativamente pequeña de la radiación solar emitida es captada por un sensor en una plataforma espacial.

Las radianzas espectrales que captan los sensores tienen dos componentes en relación con las radianzas emitidas por el sol: la primera es una constante aditiva (radianza de trayectoria) que es producto de los fotones que chocan con la atmósfera y son reflejados hacia el sensor, sin tener relación alguna con los objetos terrestres; y la segunda es una constante multiplicativa (transmitancias atmosféricas) producto de las distorsiones que sufren las trayectorias de los fotones (dispersión y absorción) en su camino del sol a la superficie terrestre y de ella al sensor exo-atmosférico. Las perturbaciones que sufren las radianzas espectrales pueden ser aproximadas en forma lineal, por lo que potencialmente se puede recuperar la señal de los objetos terrestres en forma equivalente a que el sensor estuviera sobre la superficie terrestre. Así, la tecnología de los satélites virtuales puede ser desarrollada para aplicaciones operacionales de los sensores remotos.

Para analizar el problema de los efectos atmosféricos en las radianzas o reflectancias espectrales de los objetos terrestres, en este trabajo se analiza su efecto en el índice espectral de la vegetación *NDVI<sub>cp</sub>* (Paz *et al.*, 2007), basado en las bandas del rojo (*R*) e infrarrojo cercano (*IRC*), para su optimización.

## MÉTODOS DE CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS BASES TEÓRICAS

Para eliminar los efectos atmosféricos en las señales espectrales hay alternativas directas e indirectas (Kaufman y Tanre, 1996). En las directas se busca la corrección atmosférica directamente en las reflectancias espectrales, y en las indirectas las correcciones se efectúan sobre los índices de vegetación, los cuales son combinaciones lineales y no lineales de las reflectancias espectrales, particularmente de las bandas del *R* e *IRC*.

### Métodos generales de corrección atmosférica

Los esquemas de corrección atmosférica directa usados ahora son: Método de objetos invariantes (Moran *et al.*, 1992; Chavez, 1996); Método del objeto

that reaches the terrestrial surface is reflected by the objects in it and is sent back to the atmosphere. Thus, the radiation reflected by the terrestrial objects goes through the atmosphere once again, suffering dispersions and absorptions, until a relatively small fraction of the emitted solar radiation is capted by a sensor on a spatial platform.

The spectral radiances that are capted by the sensors have two components in relation to the radiances emitted by the sun: the first is an additive constant (path radiance) which is a product of the photons that impact with the amosphere and are reflected toward the sensor, without having any relation with the terrestrial objects; and the second is a multiplicative constant (atmospheric transmittances) that is product of the distortions suffered by the trajectories of the photons (dispersion and absorption) in their path from the sun to the terrestrial surface and from there to the exo-atmospheric sensor. The perturbations suffered by the spectral radiances can be approximated in linear form, thus potentially the signal of the objects can be recovered in a form that is equivalent to the sensor being on the terrestrial surface. Thus, the technology of the virtual satellites can be developed for operational applications of the remote sensors.

To analyze the problem of the atmospheric effects in the spectral radiances or reflectances of the terrestrial objects, an analysis is made of their effect on the spectral vegetation index *NDVI<sub>cp</sub>* (Paz *et al.*, 2007), based on the bands of red (*R*) and near infrared (*NIR*), for their optimization.

## METHODS OF ATMOSPHERIC CORRECTION AND THEIR THEORETICAL BASIS

To eliminate the atmospheric effects in the spectral signals there are direct and indirect alternatives (Kaufman and Tanre, 1996). In the direct alternatives, the atmospheric correction is sought directly in the spectral reflectances, and in the indirect alternatives the corrections are made on the vegetation indices, which are linear and non-linear combinations of the spectral reflectances, particularly of the bands of *R* and *NIR*.

### General methods of atmospheric correction

The schemes of direct atmospheric correction presently used are as follows: Method of invariant objects (Moran *et al.*, 1992; Chavez, 1996); Method of the dark object (Kaufman and Sendra, 1988; Liang *et al.*, 1997; Kaufman, 2002); Method of adjustment of histograms (Richter, 1996a and b); Method of

oscuro (Kaufman y Sendra, 1988; Liang *et al.*, 1997; Kaufman, 2002); Método del ajuste de histogramas (Richter, 1996a y b); Método de reducción del contraste (Tanre *et al.*, 1988; Tanre y Legrand, 1991). Con excepción del método del objeto oscuro, que usa patrones de invarianza relativos, el resto se basa en hipótesis de invarianza absoluta de los objetos terrestres, por lo que su confiabilidad se limita a la validez de esta hipótesis fundamental. Paz *et al.* (2005b) han introducido el método de los patrones invariantes (no objetos), que es muy robusto para las correcciones atmosféricas de tipo relativo (en relación a una atmósfera de referencia).

Los métodos directos requieren identificar los objetos terrestres en forma adecuada. En especial los objetos suelo desnudo, vegetación densa y cuerpos de agua son necesarios en muchos métodos de corrección atmosférica, incluyendo los propuestos en este trabajo. Usando índices y patrones de las firmas espectrales de los objetos terrestres es posible caracterizarlos en forma adecuada (Palacios *et al.*, 2006) y analizar sus patrones espectrales.

La corrección atmosférica indirecta de los índices de vegetación ha sido analizada con diferentes enfoques. Myneni y Asrar (1994) analizan el efecto atmosférico sobre los índices de vegetación (IV) más comunes y concluyen que es importante su corrección, ya que la atmósfera (aerosoles, principalmente) cambia el contraste entre la banda del *R* e *IRC*, la cual es usada en los IV. Así, los efectos atmosféricos dan como resultado que, a medida que su intensidad es mayor, los IV muestran que la vegetación disminuye (cobertura, índice de área foliar o IAF, o biomasa), como artefacto de los cambios atmosféricos.

Usando las diferencias entre las bandas del rojo y del azul, Kaufman y Tanre (1992) propusieron un índice de vegetación (ARVI) que reduce el efecto de los aerosoles, después de un proceso previo de las reflectancias por efectos de la dispersión molecular (Rayleigh) y del ozono. Independientemente de su validez, esta técnica requiere la banda del azul, la cual no está disponible en algunos satélites (NOAA y SPOT, por ejemplo). Uno de los IV más usados es el de diferencias normalizadas o NDVI (Rouse *et al.*, 1974); aunque Paz *et al.* (2007) muestran que este IV tiene serias limitaciones, producto de sus hipótesis intrínsecas. El NDVI trata de minimizar los efectos del fondo de la vegetación (suelos, generalmente), por lo que al tratar de reducir los efectos de la atmósfera, éstos son interactivos con los primeros. Huete y Liu (1994) discutieron la influencia del suelo en el NDVI al aumentar el efecto de los aerosoles atmosféricos y concluyeron que el efecto del suelo

reduction of contrast (Tanre *et al.*, 1988; Tanre and Legrand, 1991). With the exception of the dark object method, which uses patterns of relative invariance, the rest is based on hypotheses of absolute invariance of the terrestrial objects, thus their reliability is limited to the validity of this fundamental hypothesis. Paz *et al.* (2005b) have introduced the method of the invariant patterns (non objects), which is very robust for the relative type atmospheric corrections (with respect to a reference atmosphere).

The direct methods require the adequate identification of the terrestrial objects. Especially the objects bare soil, dense vegetation and bodies of water are necessary in many methods of atmospheric correction, including those proposed in the present work. Using indices and patterns of the spectral signatures of the terrestrial objects, it is possible to characterize them adequately (Palacios *et al.*, 2006) and to analyze their spectral patterns.

The indirect atmospheric correction of the vegetation indices has been analyzed under different approaches. Myneni and Asrar (1994) analyze the atmospheric effect on the most common vegetation indices (VI), and conclude that their correction is important, given that the atmosphere (aerosols, mainly) changes the contrast between the band of *R* and *NIR*, which is used in the VI. Thus, the atmospheric effects give as a result that, as their intensity increases, the VI show that the vegetation decreases (canopy, leaf area index or LAI, or biomass) as artefact of the atmospheric changes.

Using the differences between the bands of the red and the blue, Kaufman and Tanre (1992) proposed a vegetation index (ARVI) that reduces the effect of the aerosols, after a previous process of the reflectances from the effects of the molecular dispersion (Rayleigh) and of the ozone. Independently of its validity, this technique requires the blue band, which is not available in some satellites (NOAA and SPOT, for example). One of the most widely used VI is that of normalized differences or NDVI (Rouse *et al.*, 1974); although Paz *et al.* (2007) show that this VI has serious limitations, product of their intrinsic hypotheses. The NDVI tries to minimize the effects of background of the vegetation (soils, generally), thus when trying to reduce the effects of atmosphere, they are interactive with the first. Huete and Liu (1994) discussed the influence of soil on the NDVI by increasing the effect of the atmospheric aerosols, and concluded that the effect of soil is reduced when the intensity of the effects of atmosphere is increased, and that for an atmospheric visibility (optical thickness) less than 5 km, the contribution of soil in the NDVI is minimal. In the perspective of interactive effects,

se reduce al aumentar la intensidad de los efectos de la atmósfera, y que para una visibilidad atmosférica (espesor óptico) menor a 5 km, la contribución del suelo en el NDVI es despreciable. En la perspectiva de efectos interactivos, Liu y Huete (1995) desarrollaron un esquema para la minimización conjunta de los efectos del suelo y de la atmósfera en los IV. Estos desarrollos sirvieron de base para la generación de un IV mejorado, EVI, que es un producto operacional del sensor MODIS en la plataforma espacial TERRA (Huete *et al.*, 1999).

Cualquier intento de optimización conjunta de los efectos atmosféricos y del suelo tiene asociado el problema de optimización local, ya que sólo es posible una optimización para un modelo atmosférico y tipo de aerosol. El problema global de optimización requiere una estrategia que considere explícitamente la estructura matemática del IV y de los modelos atmosféricos y tipos de aerosoles.

### ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS EFECTOS ATMOSFÉRICOS

En la Figura 1a se muestran las curvas iso-IAF ( $IRC=a_0+b_0R$ ) de simulaciones radiativas (Paz *et al.*, 2005a), con y sin efectos atmosféricos. En el resto de ese trabajo, las reflectancias están en porcentajes, por lo que las intersecciones  $a_0$ , y similares, tienen las mismas unidades y  $b_0$ , y pendientes similares, son adimensionales. Los efectos atmosféricos fueron simulados con el modelo 6S (Vermote *et al.*, 1997): modelo atmosférico de verano de latitud media, aerosol continental con una visibilidad de 10 km, ángulo cenital solar de  $30^\circ$  y una altitud a nivel del mar (0 km). En la Figura 1b se muestra que la estructura matemática de los patrones entre  $a_0-b_0$  se mantiene, pero no sus

Liu and Huete (1995) developed a scheme for the joint minimization of the effects of the soil and of the atmosphere in the VI. These developments served as a basis for the generation of an improved VI, EVI, which is an operational product of the sensor MODIS in the spatial platform TERRA (Huete *et al.*, 1999).

Any attempt at joint optimization of the atmospheric and soil effects is associated with the problem of local optimization, given that it is only possible to have an optimization for an atmospheric model and type of aerosol. The global problem of optimization requires a strategy that explicitly considers the mathematical structure of the VI and of the atmospheric models and types of aerosols.

### MATHEMATICAL STRUCTURE OF THE ATMOSPHERIC EFFECTS

The curves iso-LAI ( $NIR=a_0+b_0R$ ) of radiative simulations (Paz *et al.*, 2005a), with and without atmospheric effects are shown in Figure 1. In the rest of this work, the reflectances are in percentages, thus the intersections  $a_0$ , and those that are similar, have the same units and  $b_0$ , and similar slopes, are adimensional. The atmospheric effects were simulated with the model 6S (Vermote *et al.*, 1997): summer atmospheric model of midlatitude, continental aerosol with a visibility of 10 km, solar zenithal angle of  $30^\circ$  and an altitude at sea level (0 km). In Figure 1b it is shown that the mathematical structure of the patterns between  $a_0-b_0$  is maintained, but not their values. The  $NDVI_{cp}$  was designed to model the first part of the pattern of Figure 1b (from the start to the transition to a change of slope of the curve); therefore the atmospheric effects modify the constants  $c$  and  $d$  used in this index.

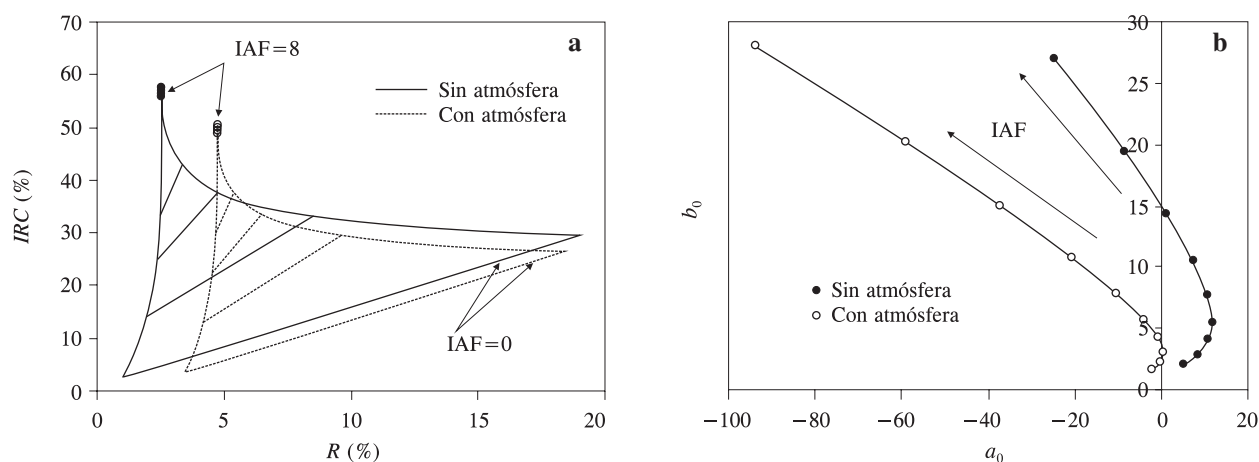


Figura 1. Patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación, con y sin atmósfera.  
Figure 1. Spectral patterns of the soil-vegetation mixture, with and without atmosphere.

valores. El  $NDVI_{lep}$  fue diseñado para modelar la primera parte del patrón de la Figura 1b (del inicio hasta la transición a un cambio de pendiente de la curva), por lo que los efectos atmosféricos modifican las constantes  $c$  y  $d$  usadas en este índice.

Los efectos atmosféricos en las reflectancias pueden aproximarse en forma lineal (Steven, 1998; Paz *et al.*, 2005b), considerando sólo las interacciones de primer orden de las reflectancias. Así, la relación entre las reflectancias con atmósfera (subíndice 2) con las reflectancias terrestres o de una imagen de referencia con una atmósfera dada (subíndice 1), para las bandas espectrales del  $R$  y del  $IRC$ , estará dada por:

$$\begin{aligned} R_2 &= a_R + b_R R_1 \\ IRC_2 &= a_{IRC} + b_{IRC} IRC_1 \end{aligned} \quad (1)$$

donde, los parámetros  $a$  y  $b$  para cada banda espectral están definidos en función del modelo atmosférico y de aerosol usado, para una visibilidad atmosférica (espesor óptico de la atmósfera), ángulo cenital solar y altitud dadas.

Para analizar los patrones estructurales asociados al efecto atmosférico se usaron simulaciones radiativas del modelo 6S (Vermote *et al.*, 1997), para los modelos atmosféricos y tipos de aerosoles mostrados en el Cuadro 1.

Los dos tipos generales de patrones de los aerosoles son los asociados a  $j=1$ , 5 y 6 (el de interés para las aplicaciones de los índices de vegetación) y los asociados a  $j=2$ , 3 y 7. En el caso de  $j=1$ , 5 y 6, para un modelo atmosférico dado, la variación de  $b_R/b_{IRC}$  con el espesor óptico en la banda de 550 nm ( $\tau_{550}$ ) es prácticamente similar, por lo que pueden ser agrupados en un aerosol genérico. En la Figura 2 se muestra el caso de ( $i=1$ ;  $j=1$ , 5 y 6).

Para la misma atmósfera  $i=1$ , en la Figura 3 se muestra el caso para los aerosoles  $j=2$ , 3 y 7. Los aerosoles 2 y 7 tienen patrones muy similares, que pueden dar lugar a confusión muy fácilmente.

Se observa de la Figura 3 que las curvas de los aerosoles  $j=2$ , 3 y 7 convergen en un punto (se

The atmospheric effects in the reflectances can be approximated in linear form (Steven, 1998; Paz *et al.*, 2005b), considering only the first order interactions of the reflectances. Thus, the relationship between the reflectances with atmosphere (subindex 2) with the terrestrial reflectances or of a reference image with a given atmosphere (subindex 1), for the spectral bands of the  $R$  and of the  $NIR$ , will be obtained through:

$$\begin{aligned} R_2 &= a_R + b_R R_1 \\ NIR_2 &= a_{NIR} + b_{NIR} NIR_1 \end{aligned} \quad (1)$$

where the parameters  $a$  and  $b$  for each spectral band are defined as a function of the atmospheric model and of aerosol used, for an atmospheric visibility (optical thickness of the atmosphere) and given solar zenithal angle and altitude.

To analyze the structural patterns associated with the atmospheric effect, radiative simulations of the model 6S (Vermote *et al.*, 1997) were used, for the atmospheric models and types of aerosols shown in Table 1.

The two general types of patterns of the aerosols are those associated with  $j=1$ , 5 and 6 (that of interest for the applications of the vegetation indices) and those associated to  $j=2$ , 3 and 7. In the case of  $j=1$ , 5 and 6, for a given atmospheric model, the variation of  $b_R/b_{NIR}$  with the optical thickness in the band of 550 nm ( $\tau_{550}$ ) is practically similar; therefore they can be grouped in a generic aerosol. The case of ( $i=1$ ;  $j=1$ , 5 and 6) is shown in Figure 2.

For the same atmosphere  $i=1$ , in Figure 3 it is shown the case for the aerosols  $j=2$ , 3 and 7. Aerosols 2 and 7 have very similar patterns, which can very easily lead to confusion.

It is observed in Figure 3 that the curves of the aerosols  $j=2$ , 3 and 7 converge at a point (they intercept), thus the relationships between their  $I$

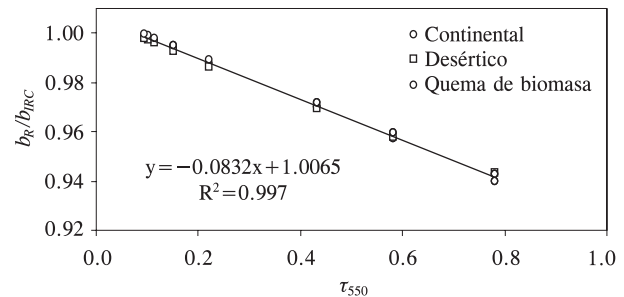


Figura 2. Variación de  $b_R/b_{IRC}$  con el espesor óptico a 550 nm para ( $i=1$ ;  $j=1$ , 5 y 6).

Figure 2. Variation of  $b_R/b_{NIR}$  with the optical thickness at 550 nm for ( $i=1$ ;  $j=1$ , 5 and 6).

Cuadro 1. Atmósferas y aerosoles del modelo 6S.  
Table 1. Atmospheres and aerosols of model 6S.

| Código i | Atmósfera              | Código j | Aerosol          |
|----------|------------------------|----------|------------------|
| 1        | Tropical               | 1        | Continental      |
| 2        | Verano Latitud Media   | 2        | Marítimo         |
| 3        | Invierno Latitud Media | 3        | Urbano           |
| 6        | EE.UU. Estándar 62     | 5        | Desértico        |
|          |                        | 6        | Quema de biomasa |
|          |                        | 7        | Estratosférico   |

interceptan), por lo que las relaciones entre sus intersecciones  $I$  y pendientes  $P$  deben ser de tipo lineal, tal como se muestra en la Figura 4.

Este espacio meta-parámtrico define una relación simétrica general (cualquier modelo atmosférico) tipo:

$$P_{i,j} = M_i(1 - I_{i,j}) \quad (2)$$

donde,  $M_i$  es un parámetro que es función del modelo atmosférico  $i$  (que varía en función del ángulo cenital solar y de visión, así como de la altitud).

La relación (2) ofrece una forma muy compacta para caracterizar las variaciones de  $b_R/b_{IRC}$  con los espesores ópticos (visibilidades atmosféricas), asociadas a una combinación  $(i, j)$ . Su aplicación para realizar correcciones atmosféricas no será analizada en este trabajo.

Para el caso del aerosol genérico ( $j=1, 5$  y  $6$ ), pueden ser analizadas las pendientes  $P$  e intersecciones  $I$  de la variación de  $b_R/b_{IRC}$  con la transmitancia atmosférica, para diferentes modelos atmosféricos (Figura 5).

El aerosol genérico definido tiene la ventaja de tener doble simetría en relación a los modelos atmosféricos (Figura 6) por lo que:

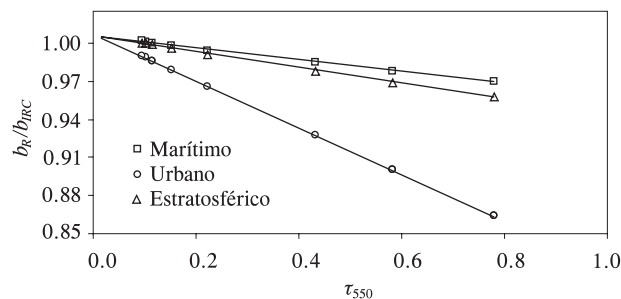


Figura 3. Variación de  $b_R/b_{IRC}$  con el espesor óptico a 500 nm para  $(i=1; j=2, 3$  y  $7)$ .

Figure 3. Variation of  $b_R/b_{NIR}$  with the optical thickness at 500 nm for  $(i=1; j=2, 3$  and  $7)$ .

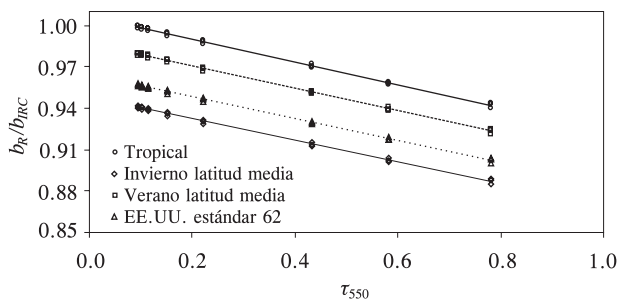


Figura 5. Variación de  $b_R/b_{IRC}$  con el espesor óptico a 550 nm para  $(i=1, 2, 3$  y  $6; j=1, 5$  y  $6)$ .

Figure 5. Variation of  $b_R/b_{NIR}$  with the optical thickness at 550 nm for  $(i=1, 2, 3$  and  $6; j=1, 5$ , and  $6)$ .

intersections and  $P$  slopes should be linear, as is shown in Figure 4.

This meta-parametric space defines a general symmetric relationship (any atmospheric model) type:

$$P_{i,j} = M_i(1 - I_{i,j}) \quad (2)$$

where  $M_i$  is a parameter which is a function of the atmospheric model  $i$  (which varies as a function of the solar zenithal angle and of vision, as well as of the altitude).

Relationship (2) offers a very compact form of characterizing the variations of  $b_R/b_{NIR}$  with the optical thicknesses (atmospheric visibilities) associated with a combination  $(i, j)$ . Its application for making atmospheric corrections will not be analyzed in this work.

For the case of the generic aerosol ( $j=1, 5$  and  $6$ ), we can analyze the  $P$  slopes and  $I$  intersections of the variation of  $b_R/b_{NIR}$  with the atmospheric transmittance, for different atmospheric models (Figure 5).

The defined generic aerosol has the advantage of having double symmetry with respect to the atmospheric models (Figure 6) therefore:

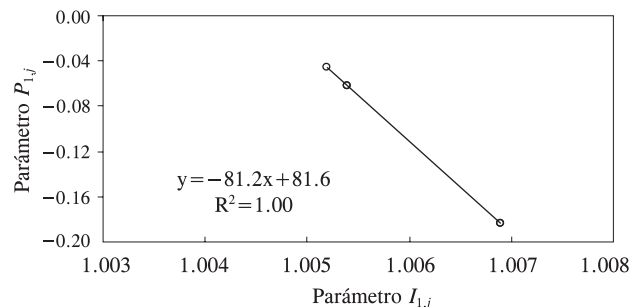


Figura 4. Relación lineal entre las pendientes e intersecciones de  $(i=1; j=2, 3$  y  $7)$ .

Figure 4. Linear relationship between the slopes and intersections of  $(i=1; j=2, 3$  and  $7)$ .

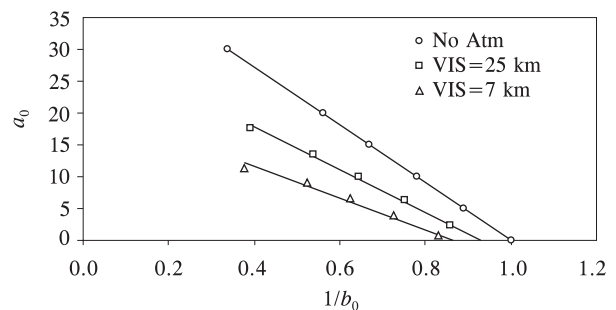


Figura 6. Relación entre  $(1/b_0)$  y  $a_0$  para diferentes visibilidades atmosféricas  $(i=1)$ .

Figure 6. Relationship between  $(1/b_0)$  and  $a_0$  for different atmospheric visibilities  $(i=1)$ .

$$P_{i,j} = NI_{i,j} \quad (3)$$

donde,  $N$  depende sólo de los ángulos cenitales solares y de visión, así como de la altitud.

#### OPTIMIZACIÓN POR EFECTOS ATMOSFÉRICOS DEL ÍNDICE NDVI<sub>cp</sub>

El índice de vegetación NDVI<sub>cp</sub> está basado en los patrones espectrales, espacio del  $R$ -IRC, de las líneas de igual vegetación (iso-IAF), Figura 1. Se observa de la Figura 1 que los suelos (IAF=0) caen sobre una línea de suelo (Baret *et al.*, 1993), definida como:

$$IRC = a_S + b_S R \quad (4)$$

donde, el subíndice  $S$  denota suelo.

El índice NDVI<sub>cp</sub> desarrollado por Paz *et al.* (2007), puede formularse como (no atmósfera o atmósfera de referencia):

$$NDVI_{cp} = \frac{(IRC - a_{0,1}) - R}{(IRC - a_{0,1}) + R} = \frac{b_{0,1} - 1}{b_{0,1} + 1} \quad (5)$$

donde, la pendiente de las líneas iso-IAF es estimada de:

$$\begin{aligned} b_{0,1} &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ A &= R \\ B &= -\left(\frac{c_1}{d_1} + IRC\right) \\ C &= \frac{1}{d_1} \end{aligned} \quad (6)$$

donde  $c_1$  y  $d_1$  son constantes empíricas que relacionan las intersecciones y pendientes de las líneas iso-IAF:

$$\frac{1}{b_{0,1}} = c + da_{0,1} \quad (7)$$

O en forma inversa, como:

$$\begin{aligned} a_{0,1} &= p_1 \left( \frac{1}{b_{0,1}} \right) - m_1 \\ p_1 &= \frac{1}{d_1} \\ m_1 &= \frac{c_1}{d_1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$P_{i,j} = NI_{i,j} \quad (3)$$

where  $N$  depends only on the solar zenithal angles and of vision, as well as on altitude.

#### OPTIMIZATION FROM ATMOSPHERIC EFFECTS OF THE NDVI<sub>cp</sub> INDEX

The NDVI<sub>cp</sub> vegetation index is based on the spectral patterns, space of the  $R$ -NIR, of the lines of equal vegetation (iso-LAI), Figure 1. In Figure 1 it is observed that the soils (LAI=0) fall over a soil line (Baret *et al.*, 1993), defined as:

$$NIR = a_S + b_S R \quad (4)$$

where subindex  $S$  denotes soil.

The NDVI<sub>cp</sub> index developed by Paz *et al.* (2007), can be formulated as follows (no atmosphere or reference atmosphere):

$$NDVI_{cp} = \frac{(NIR - a_{0,1}) - R}{(NIR - a_{0,1}) + R} = \frac{b_{0,1} - 1}{b_{0,1} + 1} \quad (5)$$

where the slope of the iso-LAI is estimated from:

$$\begin{aligned} b_{0,1} &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ A &= R \\ B &= -\left(\frac{c_1}{d_1} + NIR\right) \\ C &= \frac{1}{d_1} \end{aligned} \quad (6)$$

where  $c_1$  and  $d_1$  are empirical constants that relate the intersections and slopes of the iso-LAI lines:

$$\frac{1}{b_{0,1}} = c + da_{0,1} \quad (7)$$

Or in inverse form:

$$\begin{aligned} a_{0,1} &= p_1 \left( \frac{1}{b_{0,1}} \right) - m_1 \\ p_1 &= \frac{1}{d_1} \\ m_1 &= \frac{c_1}{d_1} \end{aligned} \quad (8)$$

Usando datos de un experimento de maíz (Bausch, 1993) y algodón (Huete *et al.*, 1985), Paz *et al.* (2007) propusieron usar los valores  $c_1=1.0$  ( $a_S=0.0$  y  $b_S=1.0$ ) y  $d_1=-0.022$  ( $d_1=-2.2$  para reflectancias en proporciones). El  $NDVI_{cp}$  es válido hasta la transición de la fase exponencial a la lineal (plantas individuales), en la etapa vegetativa del crecimiento de la vegetación.

Paz *et al.* (2005b) han demostrado que un cambio atmosférico entre un par de imágenes satelitales (atmósferas diferentes; 1 para la de referencia y 2 para la que se quiere estandarizar), usando la línea iso-LAI y sustituyendo las relaciones (1) en ésta, implica las siguientes relaciones:

$$a_{0,2} = a_{IRC} - b_{0,2}a_R + a_{0,1}b_{IRC} \quad (9)$$

$$\left(\frac{b_{IRC}}{b_R}\right) = \left(\frac{b_{S,2}}{b_{S,1}}\right) = \left(\frac{b_{0,2}}{b_{0,1}}\right) \quad (10)$$

La relación (10) define el método de corrección atmosférica directa de las  $b_0$ .

Al sustituir las relaciones (9) y (10) en la relación (8), se obtiene:

$$a_{0,2} = \{a_{IRC} - m_1 b_{IRC}\} + \left\{p_1 b_{IRC} \left(\frac{b_{IRC}}{b_R}\right) \left(\frac{1}{b_{0,2}}\right)\right\} - a_R b_{0,2} \quad (11)$$

La ecuación (11) es no lineal e implícita en  $b_{0,2}$  y puede aproximarse por:

$$a_{0,2} = p_2 \left(\frac{1}{b_{0,2}}\right) - m_2 \quad (12)$$

En el presente caso los parámetros  $m_2$  y  $p_2$  fueron estimados de simulaciones radiativas atmosféricas del modelo 6S, usando valores de  $0.3 \leq (1/b_{0,2}) \leq 0.9$ , con intervalos de 0.1 (para  $1/b_{0,2} < 0.4$  el comportamiento es no lineal; aunque puede aproximarse en forma lineal). En general, el modelo de la relación (12) se comporta muy bien en los ajustes de regresión lineal ( $R^2 > 0.99$ ), Figura 6.

En la Figura 7 se muestra la relación lineal entre  $m_2$  y  $p_2$ , para las diferentes visibilidades obtenidas al dejar fijo el aerosol y modelo atmosférico.

Considerando que para una atmósfera dada, todos los tipos de aerosoles convergen en el punto  $m_2=m_1$  y  $p_2=p_1$  (no atmósfera), Figura 7, entonces el patrón de todos los aerosoles de un modelo atmosférico forman

Using data of an experiment of maize (Bausch, 1993) and cotton (Huete *et al.*, 1985), Paz *et al.* (2007) proposed to use the values  $c_1=1.0$  ( $a_S=0.0$  and  $b_S=1.0$ ) and  $d_1=-0.022$  ( $d_1=-2.2$  for reflectances in proportions). The  $NDVI_{cp}$  is valid up to the transition of the exponential phase to the linear phase (individual plants), in the vegetative stage of growth of the vegetation.

Paz *et al.* (2005b) have demonstrated that an atmospheric change between a pair of satellite images (different atmospheres; 1 for that of reference and 2 for the one to be standardized), using the iso-LAI line and substituting the relationships (1) in it, implies the following relationships:

$$a_{0,2} = a_{NIR} - b_{0,2}a_R + a_{0,1}b_{NIR} \quad (9)$$

$$\left(\frac{b_{NIR}}{b_R}\right) = \left(\frac{b_{S,2}}{b_{S,1}}\right) = \left(\frac{b_{0,2}}{b_{0,1}}\right) \quad (10)$$

Relationship (10) defines the method of direct atmospheric correction of the  $b_0$ .

If we substitute relationships (9) and (10) in relationship (8), we obtain:

$$a_{0,2} = \{a_{NIR} - m_1 b_{NIR}\} + \left\{p_1 b_{NIR} \left(\frac{b_{NIR}}{b_R}\right) \left(\frac{1}{b_{0,2}}\right)\right\} - a_R b_{0,2} \quad (11)$$

Equation (11) is non linear and implicit in  $b_{0,2}$ , and can be approximated by:

$$a_{0,2} = p_2 \left(\frac{1}{b_{0,2}}\right) - m_2 \quad (12)$$

In our case the parameters  $m_2$  and  $p_2$  were estimated from atmospheric radiative simulations of model 6S, using values of  $0.3 \leq (1/b_{0,2}) \leq 0.9$ , with intervals of 0.1 (for  $1/b_{0,2} < 0.4$  the behavior is non-linear; although it can be approximated in linear form). In general, the model of relationship (12) behaves very well in the fittings of linear regression ( $R^2 > 0.99$ ), Figure 6.

In Figure 7 it is shown the linear relationship between  $m_2$  and  $p_2$ , for different visibilities obtained when the aerosol and atmospheric model are left fixed.

Considering that for a given atmosphere, all of the types of aerosols converge at the point  $m_2=m_1$  and  $p_2=p_1$  (non atmosphere), Figure 7, then the pattern

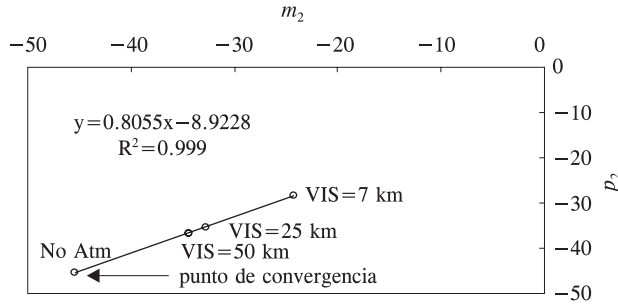


Figura 7. Relación lineal entre  $m_2$  y  $p_2$  para un tipo de aerosol dado ( $i=1$ ).

Figure 7. Linear relationship between  $m_2$  and  $p_2$  for a given type of aerosol ( $i=1$ ).

una abanico radial desde el punto de convergencia para el caso de no atmósfera. Este patrón implica que hay una relación lineal entre  $m_2$  y  $p_2$  de cada atmósfera (Figura 8):

$$p_2 = AA + BBm_2 \quad (13)$$

Usando un esquema de compactación estadística, se puede parametrizar  $AA$  y  $BB$  en función del ángulo cenital solar ( $\theta_s$ , en grados) y la altitud ( $ALT$ , en km), para un ángulo de visión a nadir:

$$AA/BB = k_1 + k_2\theta_s + k_3ALT + k_4\theta_s^2 + k_5ALT^2 + k_6\theta_s^3 + k_7ALT^3 \quad (14)$$

De esta forma se puede determinar  $AA$  y  $BB$  en función de la altitud y ángulo cenital solar de cada píxel, usando solamente una matriz de coeficientes  $k_i$ ,  $i=1,2,\dots,7$ . En general los ajustes del polinomio de la ecuación (14) muestran excelentes ajustes a las simulaciones radiativas atmosféricas ( $R^2 > 0.99$ ). Debe notarse que la argumentación desarrollada en este trabajo es independiente de la precisión de las relaciones (14), u otras mostradas adelante; ya que se puede usar en forma directa las simulaciones atmosféricas para estimar  $AA$  y  $BB$  y no utilizar las relaciones definidas.

En la aplicación del índice espectral  $NDVI_{cp}$  se requiere conocer las constantes  $m_2$  y  $p_2$  para la condición atmosférica de la imagen satelital, a nivel global o por ventanas dentro de la imagen. Puesto que esta información no está disponible, ya que es dependiente del modelo atmosférico, del tipo de aerosol y de la visibilidad atmosférica o espesor óptico a 550nm, no es posible optimizar en forma global el  $NDVI_{cp}$  y sólo puede aproximarse si se considera fija la atmósfera y aerosol y se selecciona una visibilidad promedio (alrededor de 25 km, por ejemplo).

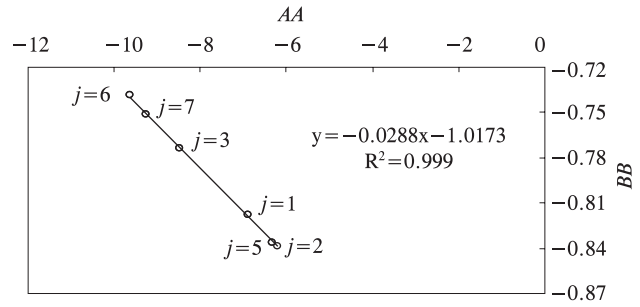


Figura 8. Relación lineal entre  $AA$  y  $BB$  para los aerosoles ( $j$ ) de una atmósfera  $i=1$ .

Figure 8. Linear relationship between  $AA$  and  $BB$  for the aerosols ( $j$ ) of an atmosphere  $i=1$ .

of all the aerosols of an atmospheric model form a radial fan from the convergence point for the case of non-atmosphere. This pattern implies that there is a linear relationship between  $m_2$  and  $p_2$  of each atmosphere (Figure 8)

$$p_2 = AA + BBm_2 \quad (13)$$

Using a scheme of statistical compacting, we can parametrize  $AA$  and  $BB$  as a function of the solar zenithal angle ( $\theta_s$ , in degrees) and the altitude  $ALT$ , in km), for an angle of vision at nadir:

$$AA/BB = k_1 + k_2\theta_s + k_3ALT + k_4\theta_s^2 + k_5ALT^2 + k_6\theta_s^3 + k_7ALT^3 \quad (14)$$

In this way we can determine  $AA$  and  $BB$  as a function of the altitude and solar zenithal angle of each pixel, using only a matrix of coefficients  $k_i$ ,  $i=1, 2, \dots, 7$ . In general the fittings of the polynomial of the equation (14) show excellent fits to the atmospheric radiative simulations ( $R^2 > 0.99$ ). It should be noted that the argumentation developed in the present work is independent of the precision of the relationships (14), or others shown further on; given that we can directly use the atmospheric simulations to estimate  $AA$  and  $BB$  and not use the defined relationships.

In the application of the spectral index  $NDVI_{cp}$  it is necessary to know the constants  $m_2$  and  $p_2$  for the atmospheric condition of the satellite image, at the global level or through windows within the image. Given that this information is not available, as it is dependent on the atmospheric model, the type of aerosol and the atmospheric visibility or optical thickness at 550 nm, it is not possible to globally optimize the  $NDVI_{cp}$ , and it can be approximated only if the atmosphere and aerosol are considered fixed and

Así, considerando que es posible obtener el espesor óptico de las relaciones anteriores (Figura 2), usando el esquema desarrollado por Paz *et al.* (2005b), se puede parametrizar  $m_2$  y  $p_2$  en función del espesor óptico:

$$\begin{aligned} m_2 &= e + f\tau_{550} \\ p_2 &= g + h\tau_{550} \end{aligned} \quad (15)$$

Al igual que los casos de *AA* y *BB*, las constantes  $e$ ,  $f$ ,  $g$  y  $h$  pueden ser parametrizadas usando un polinomio (con interacciones):

$$\begin{aligned} e/f/g/h &= l_1 + l_2\theta s + l_3ALT + l_4\theta s^2 + l_5\theta sALT \\ &+ l_6ALT^2 + l_7\theta s^3 + l_8\theta s^2ALT \\ &+ l_9\theta sALT^2 + l_{10}ALT^3 \end{aligned} \quad (16)$$

El ajuste de los polinomios (16) muestra una  $R^2 > 0.99$  a los valores de las simulaciones radiativas atmosféricas.

Con los desarrollos hasta este punto, se puede usar una estrategia de corrección atmosférica donde el espesor óptico a 550 nm se obtiene de  $b_R/b_{IRC}$  y con este valor se obtienen las constantes  $e$ ,  $f$ ,  $g$  y  $h$ ; y así  $m_2$  y  $p_2$  ( $c_2$  y  $d_2$ ) requeridos para estimar el efecto atmosférico en  $b_{0,2}$  (y  $NDVI_{cp}$ ). No obstante, en la Figura 2 se muestra que la corrección atmosférica en el  $NDVI_{cp}$  tiene soluciones múltiples para cuando no se conoce el aerosol (y modelo atmosférico). Así, conocido el modelo atmosférico, el modelo de aerosol genérico de la Figura 2 implica que para un mismo espesor óptico hay valores diferentes de  $m_2$  y  $p_2$  ( $c_2$  y  $d_2$ ) y, por tanto, valores diferentes del  $NDVI_{cp}$ .

### EFFECTO DE LA VISIBILIDAD ATMOSFÉRICA (ESPESOR ÓPTICO)

En la Figura 9 se muestra la relación  $a_{0,1} - (1/b_{0,1})$  para un experimento de maíz (Bausch, 1993), donde se utilizó una regresión sin forzarla a pasar por el punto (0, 1), por lo que  $c_1 = 0.968$  y  $d_1 = -0.0207$ .

Usando la base de datos experimentales del  $R$  e  $IRC$  para el maíz, fueron realizadas simulaciones atmosféricas (modelo verano latitud media, aerosol continental; altitud a 0 km y ángulo cenital solar de  $30^\circ$ ), para visibilidades de 7 a 200 km. Las curvas espectrales iso-IAF fueron ajustadas por regresión lineal para cada visibilidad atmosférica simulada.

En la Figura 10 se muestran las constantes  $c_2$  y  $d_2$  para las visibilidades simuladas, donde estas tienen una relación lineal (Figura 7).

an average visibility is selected (around 25 km, for example).

Therefore, considering that it is possible to obtain the optical thickness of the above relationships (Figure 2), using the scheme developed by Paz *et al.* (2005b), we can parametrize  $m_2$  and  $p_2$  as a function of the optical thickness:

$$\begin{aligned} m_2 &= e + f\tau_{550} \\ p_2 &= g + h\tau_{550} \end{aligned} \quad (15)$$

As in the cases of *AA* and *BB*, the constants  $e$ ,  $f$ ,  $g$  and  $h$  can be parametrized using a polynomial (with interactions):

$$\begin{aligned} e/f/g/h &= l_1 + l_2\theta s + l_3ALT + l_4\theta s^2 + l_5\theta sALT \\ &+ l_6ALT^2 + l_7\theta s^3 + l_8\theta s^2ALT \\ &+ l_9\theta sALT^2 + l_{10}ALT^3 \end{aligned} \quad (16)$$

The adjustment of the polynomials (16), shows an  $R^2 > 0.99$  to the values of the atmospheric radiative simulations.

With the developments up to this point, we can use a strategy of atmospheric correction where the optical thickness at 550 nm is obtained from  $b_R/b_{NIR}$  and with this value the constants  $e$ ,  $f$ ,  $g$ , and  $h$  are obtained; and thus  $m_2$  and  $p_2$  ( $c_2$  and  $d_2$ ) required to estimate the atmospheric effect in  $b_{0,2}$  (and  $NDVI_{cp}$ ). Even so, in Figure 2 it is shown that the atmospheric correction in the  $NDVI_{cp}$  has multiple solutions for when the aerosol (and atmospheric model) is unknown. Thus, once the atmospheric model is known, the model of generic aerosol of Figure 2 implies that for the same optical thickness, there are different values of  $m_2$  and  $p_2$  ( $c_2$  and  $d_2$ ) and, therefore, different values of the  $NDVI_{cp}$ .

### EFFECT OF THE ATMOSPHERIC VISIBILITY (OPTICAL THICKNESS)

In Figure 9 it is shown the relationship  $a_{0,1} - (1/b_{0,1})$  for an experiment of maize (Bausch, 1993), where a regression is used without forcing it to pass through the point (0,1), thus  $c_1 = 0.968$  and  $d_1 = -0.0207$ .

Using the base of experimental data of the  $R$  and  $NIR$  for the maize, atmospheric simulations were made (model midlatitude summer, continental aerosol; altitude at 0 km and solar zenithal angle of  $30^\circ$ ), for visibilities of 7 to 200 km. The spectral iso-LAI curves

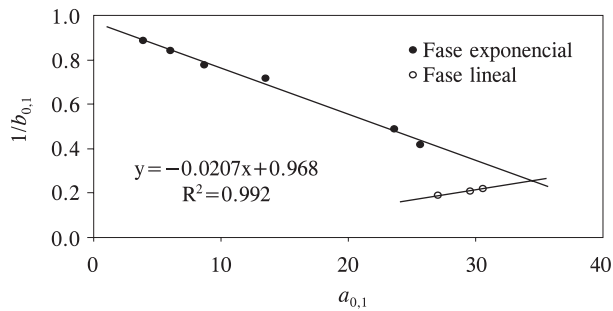


Figura 9. Relación  $a_{0,1}-(1/b_{0,1})$  de las curvas iso-IAF de un experimento de maíz (Bausch, 1993).

Figure 9. Relationship  $a_{0,1}-(1/b_{0,1})$  of the iso-LAI curves of an experiment of maize (Bausch, 1993).

Aunque el uso de una VIS=25 km reduce los efectos atmosféricos (punto intermedio de los caso de VIS=7 km y VIS=no atm), éstos todavía son notorios. Una alternativa es usar un valor de  $c_2=1.0$  y  $d_2=-0.0144$  (obtenido de la relación mostrada en la Figura 10), la cual considera una constante  $c_2$  similar al caso sin atmósfera (que también puede ser aproximado por  $c_2=1.0$  y  $d_2=-0.022$ ; Paz *et al.*, 2007). En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos usando esta estrategia, donde también se muestra el caso del NDVI clásico. En la Figura 11a el valor del  $NDVI_{cp}$  tiene un rango de variación de 0 a alrededor de 0.2 (efecto atmosférico), producto de usar una estrategia donde se uso  $c_2=1.0$ .

Para el caso del NDVI clásico, los resultados muestran un muy pobre desempeño para reducir los efectos atmosféricos. Por tanto, se puede concluir que este índice resulta inadecuado para estimar variables biofísicas asociadas a la vegetación, bajo efectos combinados del suelo y de la atmósfera.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una modelación de los patrones estructurales asociados a los efectos atmosféricos, de modo que puedan ser usados a partir

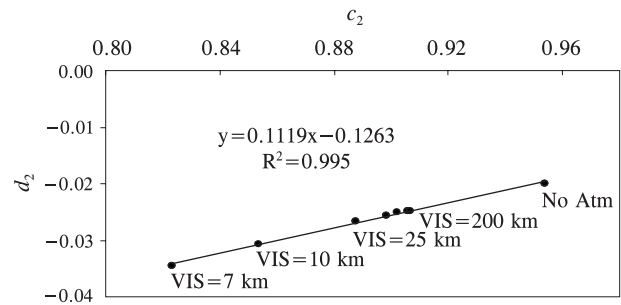
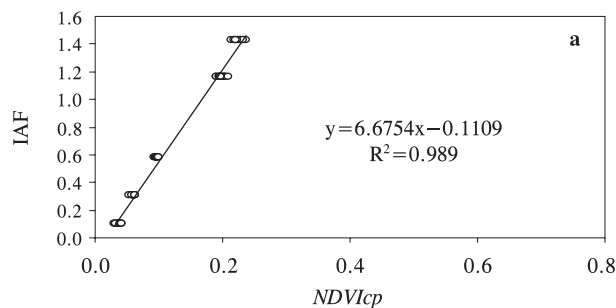


Figura 10. Relación entre  $c_2$  y  $d_2$  para diferentes visibilidades del experimento de maíz.

Figure 10. Relationship between  $c_2$  and  $d_2$  for different visibilities of the maize experiment.

were fitted by linear regression for each simulated atmospheric visibility.

In Figure 10 it is shown the constants  $c_2$  and  $d_2$  for the simulated visibilities, where they have a linear relationship (Figure 7).

Although the use of a VIS=25 km reduces the atmospheric effects (intermediate point of the case of VIS=7 km and VIS=no atm), these are still noticeable. One alternative is to use a value of  $c_2=1.0$  and  $d_2=-0.0144$  (obtained from the relationship shown in Figure 10), which considers a constant  $c_2$  similar to the case without atmosphere (which also can be approximated by  $c_2=1.0$  and  $d_2=-0.022$ ; Paz *et al.*, 2007).

In Figure 11 it is shown the results obtained using this strategy, where the case of the classic NDVI is also shown. In Figure 11a the value of the  $NDVI_{cp}$  has a range of variation that goes from 0 to around 0.2 (atmospheric effect), product of using a strategy where  $c_2=1.0$  was used.

For the case of the classic NDVI, the results show a very poor performance for reducing the atmospheric effects. Therefore, it can be concluded that this index is inadequate for estimating biophysical values associated with vegetation, under combined effects of soil and atmosphere.

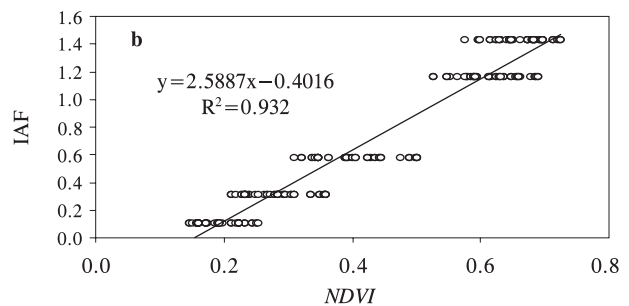


Figura 11. Efectos atmosféricos (visibilidades de 7 a 200 km) y del suelo para el  $NDVI_{cp}$  y el NDVI clásico.

Figure 11. Atmospheric effects (visibilities of 7 to 200 km) and of soil for the  $NDVI_{cp}$  and classic NDVI.

del conocimiento únicamente del modelo atmosférico y el tipo de aerosol. Usando el concepto de un aerosol genérico (aerosol continental, quema de biomasa y desértico), se demostró que para una razón de las pendientes (efectos atmosféricos) de las bandas del *R* e *IRC*, se obtiene un espesor óptico muy similar. Esto implica que una estimación del espesor óptico, caso del aerosol genérico, no es suficiente para corregir el efecto atmosférico en el *NDV<sub>icp</sub>*; requiriéndose el conocimiento del modelo atmosférico y del tipo de aerosol para optimizar este índice.

En la situación contraria, conocido el modelo atmosférico y el tipo de aerosol, pero no el espesor óptico o visibilidad, es posible optimizar el *NDV<sub>icp</sub>* usando una estrategia de aproximar la constante *c* para el caso atmosférico, a un valor similar al del caso sin atmósfera.

Así, la búsqueda de un *IV* óptimo, para los efectos atmosféricos y del suelo es una tarea indeterminada, a menos que se conozca el modelo atmosférico y el tipo de aerosol. Dicha información no está disponible en las imágenes satelitales y sólo aproximada en algunos productos operacionales, como los del sensor MODIS.

## LITERATURA CITADA

- Baret, F., S. Jacquemoud, and J. F. Hanocq. 1993. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Rev.* 7: 65-82.
- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of the Environ.* 46: 213-222.
- Chavez, P. 1996. Image based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62: 1025-1036.
- Huete, A. R., and H. Q. Liu. 1994. An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing* 32: 897-905.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of the Environ.* 17: 35-53.
- Huete, A., C. Justice, and W. van Leeuwen. 1999. MODIS vegetation index (MOD 13), Algorithm Theoretical Basis Document. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt. 129 p.
- Kaufman, Y. J. 2002. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm-theory. *Geophysical Res. Letters* 29: 2116-2119.
- Kaufman, Y. J., and C. Sendra. 1988. Automatic atmospheric correction. *Int. J. of Remote Sensing* 9: 1357-1381.
- Kaufman, Y. J., and D. Tanre. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing* 30: 261-270.
- Kaufman, Y. J., and D. Tanre. 1996. Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: from AVHRR to EOS-MODIS. *Remote Sensing of the Environ.* 55: 65-79.
- Liang G. S., H. Fallah-Adl, S. Kalluri, J. JaJa, Y. Kaufman, and J. Townshend. 1997. Development of an operational atmospheric correction algorithm for TM Imagery. *J. of Geophysical Res.* 102: 17174-17186.

## CONCLUSIONS

In this study a modelling was developed of the structural patterns associated with the atmospheric effects, so that they can be used from just the knowledge of the atmospheric model and the type of aerosol. Using the concept of a generic aerosol (continental aerosol, burning of biomass and desert aerosol), it was demonstrated that for a ratio of the slopes (atmospheric effects) of the bands of the *R* and *NIR*, a very similar optical thickness is obtained. This implies that an estimation of the optical thickness, case of the generic aerosol, is not sufficient to correct the atmospheric effect in the *NDV<sub>icp</sub>*; requiring the knowledge of the atmospheric model and the type of aerosol to optimize this index.

In the contrary situation, when the atmospheric model and type of aerosol are known, but not the optical thickness or visibility, it is possible to optimize the *NDV<sub>icp</sub>* using a strategy of approximating the constant *c* for the case with atmosphere, at a value similar to that of the case without atmosphere.

Therefore, the search for an optimal *IV*, for the effects of atmosphere and soil is an indetermined task, unless the atmospheric model and type of aerosol are known. Such information is not available in the satellite images and is only approximated in some operational products, such as those of the sensor MODIS.

—End of the English version—



- Liu, H. Q., and A. Huete. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing* 33: 457-465.
- Moran, S., R. D. Jackson, P. N. Slater, and P. N. Teillet. 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment* 41: 169-182.
- Myneni, R. B., and G. Asrar. 1994. Atmospheric effects and spectral vegetation indices. *Remote Sensing of the Environ.* 47: 390-402.
- Palacios, L. A., F. Paz, J. L. Oropeza, B. Figueroa, M. Martínez, C. A. Ortiz, y A. Exebio. 2006. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia* 40: 613-626.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L. A. Palacios. 2005a. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, L. A. Palacios, L. Tijerina, y E. Mejía. 2005b. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Rev. Latinoamericana de Recursos Naturales* 1: 51-64.
- 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: *NDV<sub>icp</sub>*. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Richter, R. 1996a. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *Int. J. of Remote Sensing* 17: 1201-1214.

- Richter, R. 1996b. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. *Computers and Geosciences* 22: 675-681.
- 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. NASA/GSFC. Type III. Final Report. Greenbelt, MD. 371 p.
- Steven, M. 1998. The sensitivity of the OSAVI vegetation index to observational parameters. *Remote Sensing of Environ.* 63: 49-60.
- Tanre, D., and M. Legrand. 1991. On the satellite retrieval of Saharan dust optical thickness over land: two different approaches. *J. of Geophysical Res.* 96: 5221-5227.
- Tanre, D., P. Y. Deschamps, C. Devaux, and M. Herman. 1988. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in thematic mapper data. *J. of Geophysical Res.* 93: 15955-15964.
- Vermote, E. F., D. Tanre, J. L. Deuze, M. Herman, and J. J. Morcrette. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* 35: 675-686.