

# MODELACIÓN DEL EFECTO DE ESCALA ESPECTRAL EN EL SISTEMA SUELO-VEGETACIÓN

## MODELING OF THE SPECTRAL SCALE EFFECT IN THE SOIL-VEGETATION SYSTEM

Alfonso Zarco-Hidalgo, Fernando Paz-Pellat, Enrique Palacios-Vélez, Alejandro Cano-Gonzalez, Martín Bolaños-González, Fermín Pascual-Ramírez, Luís A. Palacios-Sánchez, Oscar Palacios-Vélez y José L. Oropeza Mota

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

### RESUMEN

El problema del efecto de escala en las reflectancias de los cultivos ha sido enfocado probabilística y determinísticamente. Como parte del análisis de varios experimentos realizados en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, se revisó la versión probabilística usando una formulación determinística de las reflectancias de la mezcla suelo-vegetación. Los resultados mostraron que la hipótesis de homogeneidad implícita en la modelación probabilista del efecto de escala es dependiente de la geometría de las plantas en un píxel, así como de su cobertura y homogeneidad de las propiedades ópticas de las plantas individuales. Para el caso del suelo desnudo, la línea del suelo es invariante en efectos de escala y de humedad del suelo. En la parte final se desarrolla un algoritmo de modelación del efecto de escala para medios heterogéneos, fundamentado en la hipótesis de conservación de la energía a nivel de un píxel.

**Palabras clave:** Efecto de escala, espacios paramétricos, homogeneidad, reflectancia.

### INTRODUCCIÓN

La caracterización y modelación del efecto de escala espectral en la mezcla suelo-vegetación es uno de los principales problemas en el campo de los sensores remotos. Un área de la superficie terrestre (del tamaño de un píxel, en este caso), se compone de una mezcla de suelo y vegetación, para el caso de cultivos agrícolas. Sólo cuando la vegetación tiene una cobertura total del suelo y su índice de área foliar (IAF) es suficientemente grande ( $IAF > 2$  en las bandas espectrales del visible e  $IAF > 8$  para la banda espectral el infrarrojo cercano, el píxel en cuestión se puede considerar como puro (solo vegetación) (Ross, 1981).

Partiendo de que la información biofísica contenida en un píxel terrestre es independiente de su contexto (efecto de adyacencia) y que las características del sensor están fijas y las reflectancias medidas se

### ABSTRACT

The problem of scale effect on crop reflectances has been approached in probabilistic and deterministic form. As part of the analysis of various experiments conducted in the Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, the probabilistic version was revised using a deterministic formulation of the reflectances of the soil-vegetation mixture. Results showed that the hypothesis of homogeneity implicit in the probabilistic modeling of the scale effect is dependent on the geometry of the plants in a pixel, as well as their canopy and homogeneity of the optical properties of the individual plants. For the case of bare soil, the soil line is invariant in effects of scale and soil moisture. In the final part, an algorithm of modeling of the scale effect is developed for heterogeneous media, based on the hypothesis of energy conservation at the level of one pixel.

**Key words:** Scale effect, parametric spaces, homogeneity, reflectance.

### INTRODUCTION

The characterization and modeling of the spectral scale effect on the soil-vegetation mixture is one of the main problems in the field of remote sensing. An area of the terrestrial surface (of the size of one pixel, in this case), is composed of a mixture of soil and vegetation, for the case of agricultural crops. Only when the vegetation has a total coverage of the soil and its leaf area index (LAI) is large enough ( $LAI > 2$  for the spectral bands of the visible spectrum and  $LAI > 8$  for the spectral band of the near infrared), the pixel in question can be considered pure (vegetation only) (Ross, 1981).

Given the fact that the biophysical information contained in a terrestrial pixel is independent of its context (adjacency effect) and that the characteristics of the sensor are fixed and the measured reflectances can be used to extract the biophysical information from the pixel, the scale effect in the soil-vegetation mixture can be characterized in probabilistic or deterministic terms (Woodcock and Strahler, 1987; Tian *et al.*, 2002). The information contained in a

---

Recibido: Diciembre, 2006. Aprobado: Octubre, 2007.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 42: 193-204. 2008.

pueden usar para extraer la información biofísica del píxel, el efecto de escala en la mezcla suelo-vegetación puede caracterizarse en términos probabilísticos o determinísticos (Woodcock y Strahler, 1987; Tian *et al.*, 2002). La información contenida en un píxel de una imagen de satélite depende de un gran número de factores, por lo que la extracción de información biofísica está fuertemente sesgada por las hipótesis, explícitas o no, que se suponen en relación a la transferencia radiativa y a los rasgos de la superficie terrestre (Fisher, 1997; Cracknell, 1998).

En la versión probabilística, para caracterizar el efecto de escala se parte de la hipótesis de que la variabilidad espacial observada en las reflectancias es mínima cuando el tamaño del píxel es suficientemente grande para ser considerado como representativo (estadísticamente) de la mezcla suelo-vegetación. Estas ideas de volúmenes o áreas elementales representativas han sido propuestas en otros campos (Dagan, 1986; Wood *et al.*, 1988) y utilizadas en los sensores remotos por Woodcock y Strahler (1987), donde la medida de variación espacial usada es la varianza. Así, el problema de escalamiento se plantea como el encontrar una escala óptima que represente al medio observado por los sensores remotos (Marceau *et al.*, 1994a y b). En la visión determinística del escalamiento se parte de medios homogéneos (medios “turbios” en la teoría de transferencia radiativa) para el escalamiento correcto de las reflectancias, respetando la ley de la conservación de la energía (Tian *et al.*, 2002).

En este trabajo se revisan las hipótesis de los métodos probabilísticos de escalamiento, usando una formulación determinística del problema, y se clarifican los resultados obtenidos con ese tipo de aproximación. Los análisis se realizan usando un planteamiento de escalamiento en espacio y tiempo, el cual debe ser considerado para comprender el problema de la mezcla suelo-vegetación en su dinámica (Aplin, 2006). Asimismo, se plantea un esquema correcto de escalamiento de las reflectancias en la mezcla suelo-vegetación (medio heterogéneo). La discusión del escalamiento es ejemplificada usando datos de experimentos realizados en Montecillo, México.

### ESPACIOS ESPECTRALES DE LA MEZCLA SUELO-VEGETACIÓN

En la Figura 1 se muestra el patrón temporal de crecimiento de un cultivo, en el espacio espectral rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), representado por curvas de igual índice de área foliar o IAF (iso-IAF), la cual se generó usando seis tipos de suelos (S2, S5, S7, S9, S11 y S12; del más oscuro al más claro). Paz *et*

pixel of a satellite image depends on a great number of factors, thus the extraction of biophysical information is strongly biased by the hypotheses, explicit or not, that are assumed with respect to radiative transfer and to the features of the terrestrial surface (Fisher, 1997; Cracknell, 1998).

In the probabilistic version, to characterize the scale effect, the point of departure is the hypothesis that the spatial variability observed in the reflectances is minimal when the pixel size is large enough to be considered representative (statistically) of the soil-vegetation mixture. These ideas of representative elemental volumes or areas have been proposed in other fields (Dagan, 1986; Wood *et al.*, 1988) and utilized in remote sensing by Woodcock and Strahler (1987), where the measure of spatial variation used is the variance. Thus, the problem of scaling is defined as that of finding an optimum scale that represents the medium observed by the remote sensors (Marceau *et al.*, 1994a and b). In the deterministic vision of scaling, the departure point is homogeneous media (“turbid” media in the radiative transfer theory) for the correct scaling of the reflectances, respecting the energy conservation law (Tian *et al.*, 2002).

In this work, a revision is made of the hypotheses of the probabilistic approach for scaling, using a deterministic formulation of the problem, and the results obtained with this type of approximation are clarified. The analyses are made using a formulation of scaling in time and space, which should be considered in order to understand the problem of the soil-vegetation mixture in its dynamic (Aplin, 2006). In addition, a correct scheme of scaling of the reflectances in the soil-vegetation mixture (heterogeneous media) is proposed. The discussion of scaling is exemplified using data of experiments conducted in Montecillo, México.

### SPECTRAL SPACES OF THE SOIL-VEGETATION MIXTURE

Figure 1 shows the temporal pattern of growth of a crop, in the red (R) spectral space and near infrared spectral space (IRC), represented by curves of equal leaf area index or LAI (iso-LAI), which was generated using six types of soils (S2, S5, S7, S9, S11 and S12; from darkest to 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 behavior of the reflectance during crop development:

a) If the values of equal LAI (iso-LAI) of each curve of equal soil (iso-Soil) are joined, a quasi-linear

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 reflectancia 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. Así, un 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 ( $b_0$ ) e intersección ( $a_0$ ) 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, en el sentido contrario a las manecillas del reloj, hasta alcanzar un ángulo de  $90^\circ$ . Esta última condición corresponde al caso de saturación de la reflectancia de la banda del R, representada en la Figura 1, como los valores de reflectancia arriba del ápice del sombrero de tres picos (IAF>5). 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 la convergencia es hacia una línea recta (ápice en la Figura 1), ya que cuando una banda visible se satura, el IRC no lo hace y sigue creciendo hasta su propio punto de saturación. El punto de saturación, llamado también de reflectancia infinita o de medio denso, es función de las propiedades ópticas de las hojas y de su distribución angular.

En la Figura 2 se muestra la relación entre los parámetros  $a_0$  y  $b_0$  de las líneas rectas iso-IAF, para el ciclo de crecimiento del cultivo que va desde el suelo

pattern is obtained. Thus, a growth stage of a crop (LAI) is represented in a straight line, independently of the type of background soil in the crop.

b) The slope ( $b_0$ ) and intersection ( $a_0$ ) 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 an equal slope to that of the soil line (LAI=0) and increases, counter clock-wise, until reaching a  $90^\circ$  angle. This latter condition corresponds to the case of saturation of the reflectance of the R band, represented in Figure 1, as the reflectance values above the apex of the tassled cap (LAI>5). 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 saturation point of the visible bands. In reality the convergence is toward a straight line (apex in Figure 1), because when a visible band is saturated, the IRC is not, and keeps growing up to its own saturation point. The saturation point, also called infinite reflectance or of dense media, is a function of the optical properties of the leaves and of their angular distribution.

Figure 2 shows the relationship between parameters  $a_0$  and  $b_0$  of the straight lines iso-LAI, for the growth cycle of the crop that goes from the bare soil to the condition of complete coverage of the soil by the vegetation. In Figure 2 it is observed that in the initial stage there is an exponential type behavior pattern, up to a point where the R band is saturated (value does not change). After the saturation point of the R band, the pattern is linear. The initial point of the curve  $a_0$ - $b_0$  represents the case of bare soil ( $a_0=a_S$  and  $b_0=b_S$ ). The point where  $a_0$  reaches its maximum

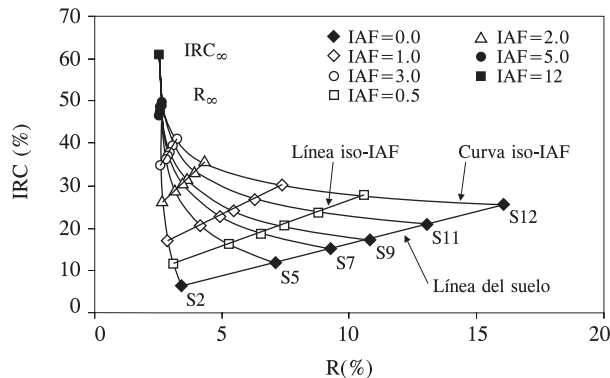


Figura 1. Espacio espectral IRC-R para las simulaciones del cultivo maíz.

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

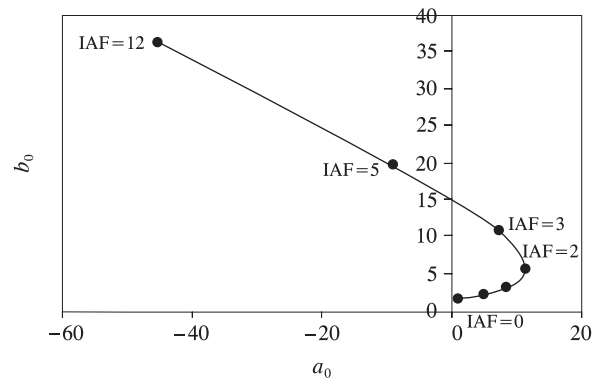


Figura 2. Patrón de los parámetros  $a_0$  y  $b_0$  de las curvas iso-IAF.

Figure 2. Pattern of parameters  $a_0$  and  $b_0$  of the iso-LAI curves.

desnudo hasta la condición de cubrimiento completo del suelo por la vegetación. En la Figura 2 se observa que en la etapa inicial hay un patrón de comportamiento tipo exponencial, hasta un punto donde la banda R se satura (no cambia de valor). Después del punto de saturación de la banda R, el patrón es de tipo lineal. El punto inicial de la curva  $a_0-b_0$  representa el caso de suelo desnudo ( $a_0=a_S$  y  $b_0=b_S$ ). El punto donde  $a_0$  alcanza su valor máximo (punto de transición del patrón exponencial al lineal), representa el término de la fase de crecimiento exponencial e inicio de la fase lineal. El punto final del patrón lineal de la curva  $a_0-b_0$  representa la situación donde la banda del IRC se satura, lo cual ocurre cuando el IAF alcanza su valor máximo.

Una forma de linealizar el patrón expo-lineal mostrado en la Figura 2, es usar las siguientes transformaciones (Paz *et al.*, 2005 y 2006):

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

Paz *et al.* (2005) propusieron una relación lineal en el espacio paramétrico  $a_1-Y$ , donde  $Y=\ln(1.11-\beta)$ . Esta relación sólo es válida para las simulaciones radiativas de medio turbio. Para el caso general de medios heterogéneos, la relación lineal es entre  $a_1$  y  $\beta$ . En la Figura 3 se muestra el espacio paramétrico  $a_1-\beta$  de un cultivo de maíz (Bausch, 1993) y uno de algodón (Huete *et al.*, 1985), donde ambos experimentos se hicieron cambiando el suelo de fondo de los cultivos para generar curvas iso-IAF. Así, las relaciones mostradas en la Figura 3 representan en forma compacta, espacio paramétrico, un ciclo de crecimiento completo (etapa vegetativa) de los cultivos, para cualquier

value (point of transition from the exponential to the linear pattern), represents the end of the exponential growth phase and the beginning of the linear phase. The final point of the linear pattern of the curve  $a_0-b_0$  represents the situation where the band of the IRC becomes saturated, which occurs when the LAI reaches its maximum value.

One form of linearizing the expo-linear pattern shown in Figure 2, is using the following transformations (Paz *et al.*, 2005 and 2006):

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

Paz *et al.* (2005) proposed a linear relation in the parametric space  $a_1-Y$ , where  $Y=\ln(1.11-\beta)$ . This relation is only valid for the radiative simulations of turbid media. For the general case of heterogeneous media, the linear relation is between  $a_1$  and  $\beta$ . Figure 3 shows the parametric space  $a_1-\beta$  of a corn crop (Bausch, 1993) and one of cotton (Huete *et al.*, 1985), where both experiments were made changing the background soil of the crops to generate iso-LAI curves. Thus, the relations shown in Figure 3 represent in compact form, parametric space, a complete growth cycle (vegetative stage) of the crops, for any combination of optical properties of the background soils. The index  $\beta$  (0 to 1) can be considered as a perfect vegetation index, in the sense that it is invariant to effects of the soil.

In Figure 1, the effects of the changes of scale in the crop reflectances can be characterized, where time is implicit in the LAI. The variation range (and the variance) of the reflectances is given by the length of the iso-LAI lines (Figure 4). The length of the iso-LAI

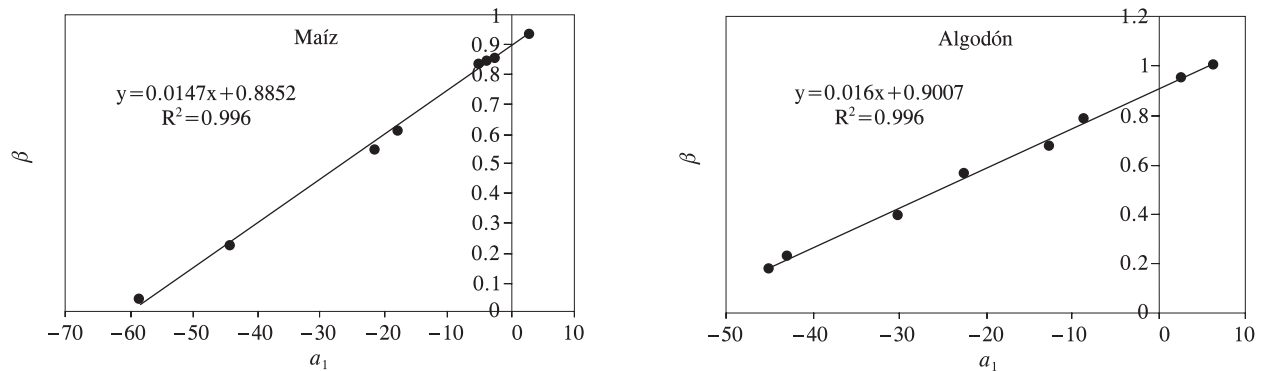


Figura 3. Espacio paramétrico  $a_1-\beta$  para un cultivo de maíz y uno de algodón.  
Figure 3. Parametric space  $a_1-\beta$  for a crop of corn and one of cotton.

combinación de propiedades ópticas de los suelos de fondo. El índice  $\beta$  (0 a 1) puede considerarse como un índice de vegetación perfecto, en el sentido de que es invariante a efectos del suelo.

En la Figura 1 se puede caracterizar los efectos de los cambios de escala en las reflectancias de los cultivos, donde el tiempo está implícito en el IAF. El rango de variación (y la varianza) de las reflectancias está dado por la longitud de las líneas iso-IAF (Figura 4). La longitud de las líneas iso-IAF se calcula simplemente como la distancia euclidiana entre el punto de la línea que corresponde al suelo más claro y al más oscuro.

Así, para la etapa inicial del crecimiento de los cultivos (baja cobertura del suelo), la variabilidad (espacial) de las reflectancias es alta y representa los cambios en las propiedades ópticas (reflectancia) de los suelos, producto de cambio en la humedad o rugosidad (labranza) de los mismos. Cuando el cultivo cubre totalmente al suelo (desde el punto de vista óptico, es decir, dependiendo de la banda espectral utilizada), entonces la variabilidad es mínima o nula. De esta discusión, es claro que usar una medida de variabilidad espacial (varianza) para definir una escala óptima, es totalmente dependiente del grado de cubrimiento del suelo por la vegetación y de los cambios en las reflectancias de los suelos.

#### ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS DE ESCALAMIENTO

Para revisar la hipótesis primaria de las aproximaciones del escalamiento en las reflectancias, de que un medio homogéneo tiene variabilidad acotada, se diseñó un experimento en las instalaciones del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México, México. Adicionalmente, se hicieron dos experimentos para analizar el efecto de escala en las reflectancias del suelo. Las mediciones de reflectancia se realizaron con un radiómetro multi-espectral (Cropscan Inc.), que simula las bandas espectrales del sensor ETM+ del satélite LANDSAT 7. El radiómetro tiene un ángulo de visión de  $28^\circ$ , que define una relación de diámetro de observación a altura de medición de 1 a 2.

Partiendo de la hipótesis de que una parcela agrícola con un cultivo dado es la frontera de variabilidad espacial, las mediciones en esa parcela deben aproximar (ser representativas) la escala de la parcela en sus límites espaciales. Así, al medir el IAF o la densidad foliar ( $m^2 m^{-3}$ ), a lo largo o perpendicularmente a los surcos de una parcela para una escala de observación fija (área o volumen), las mediciones generan datos dependientes de la geometría de siembra de los cultivos y de la diversidad de las plantas individuales

lines is calculated simply as the Euclidian distance between the point of the line that corresponds to the lightest soil and to the darkest.

Thus, for the initial stage of the crop growth (low vegetation canopy), the variability (spatial) of the reflectances is high and represents the changes in the optical properties (reflectance) of the soils, product of change in moisture or roughness (tilling) of the soils. When the crop totally covers the soil (from the optical viewpoint, that is, depending on the spectral band used), the variability is minimal or null. From this discussion, it is clear that the use of a measurement of spatial variability (variance) to define an optimum scale, is totally dependent on the degree of soil cover by the vegetation and the changes in the soil reflectances.

#### ANALYSIS OF SCALING EXPERIMENTS

To revise the primary hypothesis of the approximations of scaling in the reflectances, that a homogeneous media has limited variability, an experiment was designed in the installations of the Colegio de Postgraduados in Montecillo, State of México, México. Additionally, two experiments were made to analyze the effect of scale in the reflectances of the soil. The measurements of reflectance were made with a multi-spectral radiometer (Cropscan Inc.), which simulates the spectral bands of the ETM+ sensor of the satellite LANDSAT 7. The radiometer has an angle of vision of  $28^\circ$ , which defines a relation of observation diameter to measurement height of 1 to 2.

Starting from the hypothesis that an agricultural plot with a given crop is the limit of spatial variability, the measurements in this plot should approximate (be representative) the scale of the plot in its spatial limits. Thus, when the LAI or leaf density ( $m^2 m^{-3}$ ) is measured, along or perpendicular to the rows of a

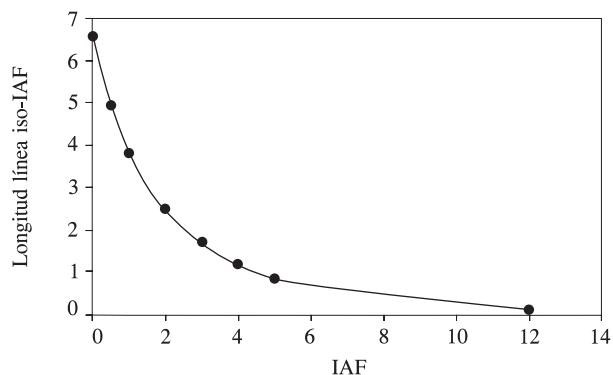


Figura 4. Variación de la longitud de las líneas iso-IAF.  
Figure 4. Variation of the length of the iso-LAI lines.

(Sinoquet *et al.*, 1991; Stewart *et al.*, 2003); aunque a medida que se aproxima al límite de la escala de la parcela, la variabilidad espacial se reduce (dependiendo del grado de cobertura del cultivo). Algo similar se observa a nivel de las reflectancias (Daughtry *et al.*, 1982).

**Efecto de escala en los suelos**

Se hicieron mediciones a diferentes alturas respecto al suelo (diferentes dimensiones de la parcela de suelo) sobre un suelo franco arcillo arenoso (MO 1.2 a 2.3 %; pH 7.6 a 8.1; CE 0.7 a 3.52 dS m<sup>-1</sup>). Las alturas variaron de 0.5m hasta 7.0 m, con intervalos de 0.5 m (Figura 7).

En la Figura 5a se muestra la variación de las reflectancias (R e IRC) del suelo con la escala (alturas de medición), para la condición de suelo seco y húmedo. Las mediciones se realizaron en condiciones de iluminación solar similares (componentes de la radianza y geometría solar). Se observa en la Figura 5a que para un suelo húmedo el comportamiento escalante es ligeramente no lineal, producto de una distribución heterogénea de la humedad en el suelo. En la Figura 5b se presenta la línea del suelo, donde se observa que el patrón es invariante en efectos de escala (y humedad del suelo).

Aunque el concepto de línea del suelo es relativamente estable para suelos heterogéneos (Baret *et al.*, 1983), la Figura 5b muestra que se espera una relación lineal entre el R e IRC, cuando los patrones escalantes de ambas reflectancias tienen la misma función matemática (lineal, exponencial, potencial, etc.).

En la Figura 6 se muestra la línea del suelo de mediciones realizadas en otro sitio, mismo suelo, usando transectos de cuatro mediciones en los ejes norte-sur y este-oeste, para alturas de 1, 2 y 3 m; condiciones secas y húmedas del suelo. Se ratifica el patrón invariante a escala y humedad.

plot for a fixed observation scale (area or volume), the measurements generate data dependent on the geometry of sowing of the crops and on the diversity of the individual plants (Sinoquet *et al.*, 1991; Stewart *et al.*, 2003); although as the limit of the scale of the plot is approached, spatial variability is reduced (depending on the degree of crop canopy). Something similar is observed at the level of the reflectances (Daughtry *et al.*, 1982).

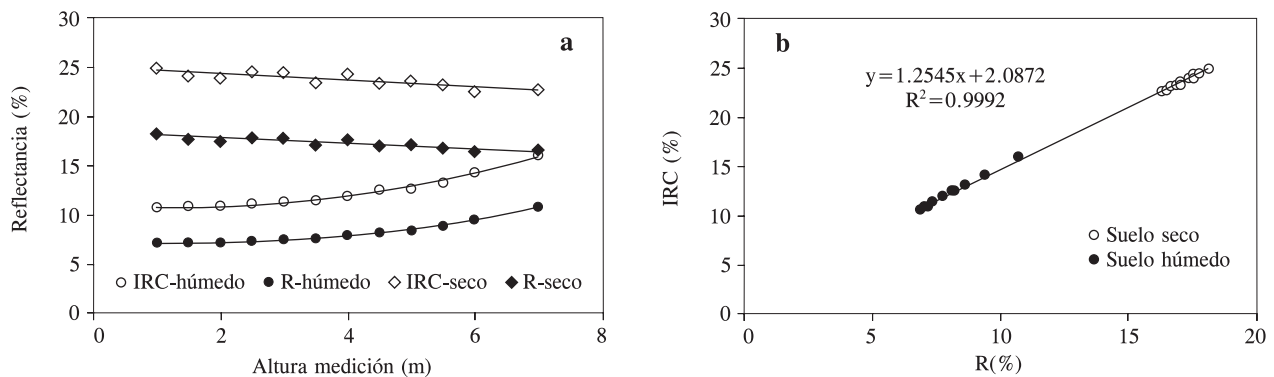
**Effect of scale in soils**

Measurements were made at different heights with respect to the soil (different dimensions of the soil plot) on a sandy clay loam soil (OM 1.2 to 2.3%, pH 7.6 to 8.1; EC 0.7 to 3.52 dS m<sup>-1</sup>). The heights varied from 0.5 m to 7.0 m, with intervals of 0.5 m (Figure 7).

Figure 5 shows the variation of the reflectances (R and IRC) of the soil with the scale (measurement heights), for the condition of dry and wet soil. The measurements were made under similar conditions of solar illumination (components of solar radiance and geometry). It is observed in Figure 5a that for a wet soil the scaling behavior is slightly non-linear, product of a heterogeneous distribution of the soil moisture. Figure 5b shows the soil line, where it is observed that the pattern is invariant in effects of scale (and soil moisture).

Although the concept of soil line is relatively stable for heterogeneous soils (Baret *et al.*, 1983), Figure 5b shows that a linear relation is expected between the R and IRC, when the scaling patterns of both reflectances have the same mathematical function (linear, exponential, potential, etc.).

Figure 6 shows the soil line of measurements made in another site, same soil, using transects of four measurements in the north-south and east-west axis, for heights of 1, 2 and 3 m; dry and wet soil



**Figura 5. Efecto de escala en los suelos, para condiciones secas y húmedas.**  
**Figure 5. Scale effect in soils, for dry and wet conditions.**

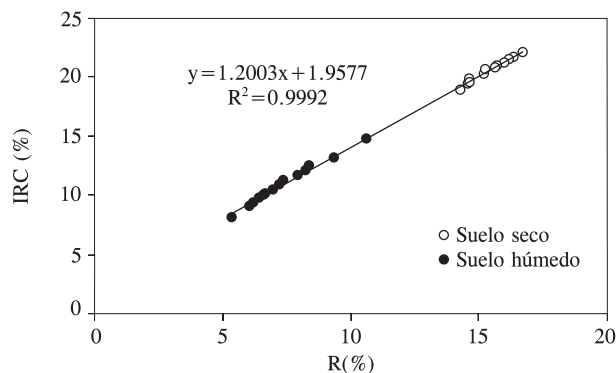


Figura 6. Patrón invariante a escala y humedad de la línea del suelo.

Figure 6. Invariant pattern to scale and moisture of the soil line.

### Efecto de escala en la mezcla suelo-vegetación

El caso de la mezcla suelo-vegetación es más complejo de analizar y depende del grado de cobertura del cultivo. Para revisar el efecto de escala en la mezcla suelo-vegetación se analizó dos parcelas experimentales de maíz y frijol sin estrés (año 2003), ambos en la etapa de madurez fisiológica (máxima cobertura). Las parcelas experimentales fueron de 6×6 m, con surcos espaciados a 0.75 m. El maíz se sembró a una densidad de 25 plantas/surco (espaciamiento de 0.2m) y el frijol con una densidad de 50 plantas/surco (espaciamiento de 0.1 m). En la fecha de las mediciones, el maíz tenía una altura de 1.80 m y un IAF de 2.17; la altura del frijol era 0.4 m e IAF de 0.33. Así, hay dos condiciones de cobertura máxima del terreno: baja y alta.

Para construir líneas iso-IAF en cada medición (altura), se usaron dos suelos contrastantes (claro y oscuro) en charolas deslizables debajo del follaje de los cultivos. Las mediciones se hicieron usando las condiciones de suelos secos y húmedos (dos días diferentes, pero con las mismas condiciones de iluminación y geometría solar), de tal manera que se contó generalmente con cuatro valores de reflectancias de los suelos (suelo claro y oscuro; húmedo y seco) para la misma cantidad de vegetación (IAF). Para frijol, las mediciones se hicieron desde una altura de 1.0 a 7.0 m, variando las alturas en intervalos de 0.5 m. Para maíz, la altura inicial fue 2.0 a 7.0 m, con variaciones de alturas de 0.5 m. En algunas alturas las reflectancias medidas fueron desechadas debido a problemas de estabilidad del radiómetro. En la Figura 7 se muestra el esquema de medición usado.

Para cada altura de medición se determinaron las constantes  $a_0$  y  $b_0$  de las líneas iso-IAF y con estos valores se estimó  $a_1$  y  $\beta$  usando las relaciones (1). La línea del suelo estimada para los suelos en las

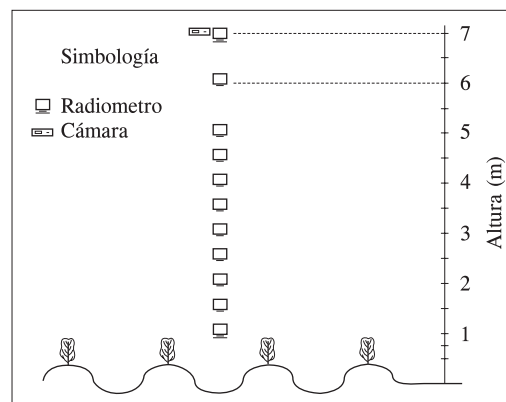


Figura 7. Esquema de medición experimental.

Figure 7. Scale of experimental measurement.

conditions. The invariant pattern to scale and moisture is ratified.

### Scale effect in the soil-vegetation mixture

The case of the soil-vegetation mixture is more complex to analyze and depends on the degree of crop canopy. To revise the scale effect in the soil-vegetation mixture, an analysis was made of two experimental plots of corn and bean without stress (year 2003), both in the stage of physiological maturity (maximum cover). The experimental plots measured 6×6 m, with rows spaced at 0.75 m. The corn was sown at a density of 25 plants/row (spacing of 0.2 m) and the bean with a density of 50 plants/row (spacing of 0.1 m). On the date of the measurements, the corn had a height of 1.80 m and a LAI of 2.17; the height of the bean was 0.4 m and LAI of 0.33. Therefore, there are two conditions of maximum cover of the plot: low and high.

To construct iso-LAI lines in each measurement (height), two contrasting soils were used (light and dark) in sliding trays under the crop foliage. The measurements were made using the conditions of dry and wet soils (two different days, but with the same conditions of light and solar geometry), so that there were generally four values of reflectances of the soils (light and dark soil; wet and dry) for the same amount of vegetation (LAI). For bean, the measurements were made from a height of 1.0 to 7.0 m, varying the heights at intervals of 0.5 m. For corn, the initial height was 2.0 to 7.0 m, with height variations of 0.5 m. In some heights the measured reflectances were discarded due to problems of stability of the radiometer. Figure 7 shows the measurement scale used.

For each measurement height, the constants  $a_0$  and  $b_0$  of the iso-LAI lines were determined, and these values were used to estimate  $a_1$  and  $\beta$  using the relationships (1). The soil line estimated for the

charolas deslizables se caracterizó con las constantes  $a_S=2.3522$  y  $b_S=1.1089$ .

En la Figura 8 se muestran los parámetros de las líneas iso-IAF, espacio paramétrico  $a_0-b_0$  y  $a_1-\beta$ , para el maíz y la Figura 9 para el frijol.

Para el experimento de maíz, se observa en la Figura 8 que a medida que la altura de medición aumenta, las curvas iso-IAF tienden a una hipotética escala de representación de la parcela; aunque esta relación no es monótona. Así, considerando la heterogeneidad de las plantas individuales, en un experimento supuesto como homogéneo es posible encontrar valores contradictorios de la reflectancia (línea iso-IAF), dependientes de la geometría de la siembra y de las diferencias entre las plantas individuales. Esta situación es más crítica en un cultivo de baja cobertura como el frijol (Figura 9), donde se presenta un patrón inverso al esperado por el efecto de escala (bajo la concepción de homogeneidad espacial).

En las Figuras 10 y 11 se muestra en forma más clara el efecto de escala en el índice espectral  $\beta$ , donde se observan patrones diferentes en función del grado de cobertura de los cultivos. En la Figura 10, cultivo con alta cobertura del suelo, el patrón escalante mostrado es congruente con el esperado al incrementar el área de observación de la parcela experimental. En la Figura 11, cultivo con baja cobertura del suelo, el primer punto (altura 1 m) representa la situación donde el radiómetro se puso sobre el follaje, por lo que el índice  $\beta$  fue alto (más vegetación). En las otras mediciones el radiómetro observó diferentes mezclas de suelo-vegetación. El patrón escalante (Figura 11) es contrario al esperado, producto de que el radiómetro observa más vegetación (definida por el espaciamiento entre surcos) al aumentar el área de medición.

### MODELACIÓN DEL EFECTO DE ESCALA EN LA REFLECTANCIA

Tian *et al.* (2002) plantearon el problema de escalamiento de las reflectancias para el caso de objetos puros (suelo y vegetación); es decir para condiciones de medios turbios. Su solución se desarrolló usando la ecuación de transferencia radiativa tridimensional (Ross, 1981), bajo la restricción de respetar la ley de conservación de la energía y está definida por:

$$\varpi = \frac{1}{1 - f_{\text{suelo}}} \sum_{l=1}^n \omega_l f v_l \quad (2)$$

donde,  $\omega$  es el albedo foliar (reflectancia más transmitancia) y  $f$  representa la fracción (0 a 1) de los objetos suelo o vegetación ( $v$ ) en un píxel. Así, la relación (2)

soils in the sliding trays was characterized with the constants  $a_S=2.3522$  and  $b_S=1.1089$ .

Figure 8 shows the parameters of the iso-LAI lines, parametric space  $a_0-b_0$  and  $a_1-\beta$ , for the corn and Figure 9 for the bean.

For the corn experiment, it is observed in Figure 8 that as the measuring height increases, the iso-LAI curves tend toward a hypothetical scale of representation of the plot; although this relation is not monotonous. Thus, considering the heterogeneity of the individual plants, in an experiment assumed to be homogeneous, it is possible to find contradictory values of the reflectance (iso-LAI line), dependent on the geometry of the crop and the differences among the individual plants. This situation is more critical in a low canopy crop such as bean (Figure 9), where there is a pattern that is inverse to the one that is expected due to the scale effect (under the notion of spatial homogeneity).

The scale effect on the spectral index  $\beta$  is shown more clearly in Figures 10 and 11, where different patterns are observed as a function of the degree of crop canopy. In Figure 10, crop with high soil cover, the scaling pattern shown is congruent with that expected when the observation area of the experimental plot is increased. In Figure 11, crop with low soil cover, the first point (height 1 m) represents the situation where the radiometer was placed over the foliage, so the index  $\beta$  was high (more vegetation). In the other measurements the radiometer observed different soil-vegetation mixtures. The scaling pattern (Figure 11) is contrary to what was expected, resulting from the fact that the radiometer observes more vegetation (defined by the spacing between rows) as the area of measurement increases.

### MODELING OF THE SCALE EFFECT IN REFLECTANCE

Tian *et al.* (2002) addressed the problem of scaling of the reflectances for the case of pure objects (soil and vegetation); that is, for conditions of turbid media. Their solution was developed using the equation of tridimensional radiative transfer (Ross, 1981), under the restriction of respecting the law of energy conservation and is defined by:

$$\varpi = \frac{1}{1 - f_{\text{soil}}} \sum_{l=1}^n \omega_l f v_l \quad (2)$$

where  $\omega$  is the foliar albedo (reflectance plus transmittance) and  $f$  represents the fraction (0 to 1) of the objects soil or vegetation ( $v$ ) in a pixel. Thus,



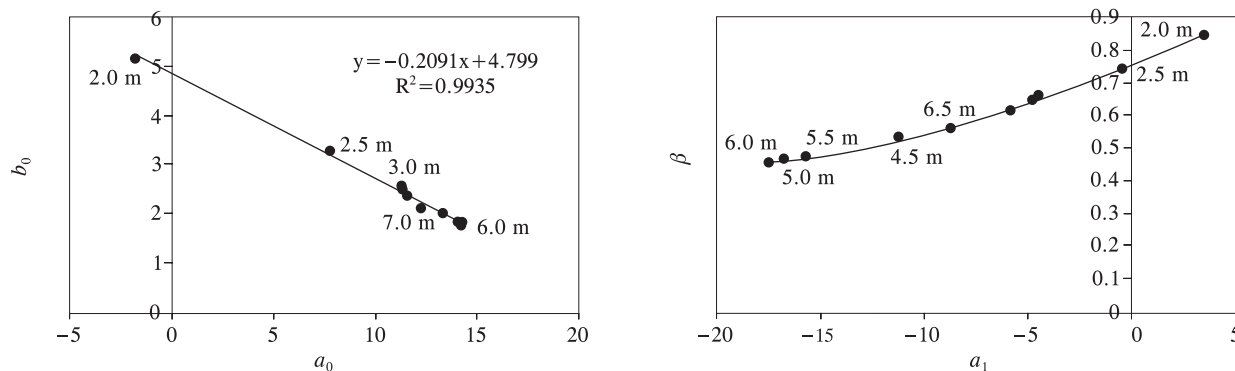


Figura 8. Líneas iso-IAF para diferentes alturas del experimento del maíz.  
Figure 8. Iso-LAI lines for different heights of the corn experiment.

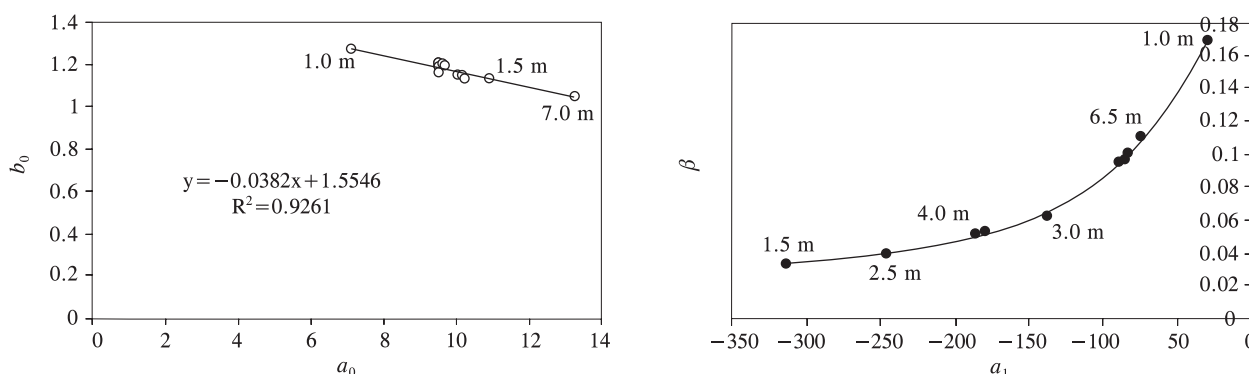


Figura 9. Líneas iso-IAF para diferentes alturas del experimento de frijol.  
Figure 9. Iso-LAI lines for different heights of the bean experiment.

establece que el albedo foliar a la escala de un píxel de tamaño arbitrario ( $\omega$  promedio), es función de las contribuciones de los tipos de vegetación (albedos) en el píxel, sin considerar al suelo. Puesto que el albedo foliar no es medible en forma directa por los sensores remotos, es necesario definir una relación de esta variable con las reflectancias.

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

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

$$q = \frac{2Kdir, n}{Kdir, n + Kdif, n} \quad (3)$$

donde,  $K$  es un coeficiente de extinción,  $dir$  se refiere a radianza directa y  $dif$  a radianza difusa,  $n$  se refiere a hojas no negras y  $h$  a hojas con distribución angular horizontal.

Goudriaan (1977) y Ross (1981) propusieron una serie de simplificaciones para estimar la reflectancia

the relation (2) establishes that the foliar albedo to the scale of one pixel of arbitrary size ( $\omega$  average), is a function of the contributions of the types of vegetation (albedos) in the pixel, without considering the soil. Given that the foliar albedo is not directly measurable by remote sensing, it is necessary to define a relation of this variable with the reflectances.

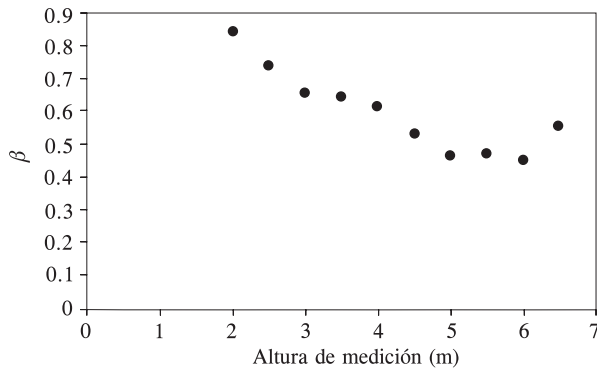
The infinite reflectance for non horizontal and non black leaves, can be reasonable approximated according to Goudriaan and van Laar (1994):

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

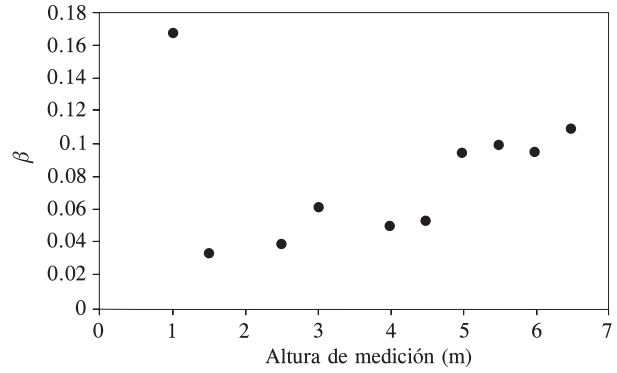
$$q = \frac{2Kdir, n}{Kdir, n + Kdif, n} \quad (3)$$

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

Goudriaan (1977) and Ross (1981) proposed a series of simplifications to estimate the infinite



**Figura 10.** Efecto de escala en el índice espectral  $\beta$  para el experimento de maíz.  
**Figure 10.** Scale effect in the spectral index  $\beta$  for the corn experiment.



**Figura 11.** Efecto de escala en el índice espectral  $\beta$  para el experimento de fríjol.  
**Figure 11.** Scale effect in the spectral index  $\beta$  for the bean experiment.

en el infinito para hojas horizontales. Así, para hojas horizontales no negras y bi-Lambertianas (reflectancia igual a transmitancia), la reflectancia en el infinito está dada por:

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

Así, conocidos los coeficientes de extinción, se puede invertir las relaciones (3) y (4) para obtener el albedo foliar, conocida la reflectancia en el infinito, como:

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

Las reflectancias en el infinito,  $R_{\infty}$ , representan las reflectancias de saturación, definidas en el espacio del R-IRC (Figura 1).

De las consideraciones anteriores, el algoritmo general para escalar las reflectancias, para medios heterogéneos, es el siguiente:

- a) Estimar las fracciones de los objetos suelo y de la mezcla suelo-vegetación ( $f_{\text{suelo}}$  y  $f_V$ ), para un píxel a una escala arbitraria.
- b) Para la mezcla suelo-vegetación, estimar las reflectancias en el infinito (Figura 1) de tal forma que los medios heterogéneos sean convertidos a medios homogéneos (virtualmente). También estimar los coeficientes de extinción para estos medios (independientes de la cobertura de la vegetación).
- c) Bajo la hipótesis de hojas bi-Lambertianas, estimar el albedo foliar de cada mezcla suelo-vegetación usando la relación (5).

reflectance for horizontal leaves. Thus, for non black horizontal and bi-Lambertian leaves (reflectance equal to transmittance), the infinite reflectance is obtained with the following:

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

Thus, knowing the extinction coefficients, relations (3) and (4) can be inverted to obtain the foliar albedo, knowing the infinite reflectance, as:

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

The infinite reflectances,  $R_{\infty}$ , represent the reflectances of saturation, defined in the space of the R-IRC (Figure 1).

Of the above considerations, the general algorithm for scaling the reflectances, for heterogeneous media, is as follows:

- a) Estimate the fractions of the soil and the soil-vegetation objects ( $f_{\text{soil}}$  and  $f_V$ ), for a pixel with an arbitrary scale.
- b) For the soil-vegetation mixture, estimate the infinite reflectances (Figure 1) in such a way that the heterogeneous media are converted to homogeneous media (virtually). Also estimate the extinction coefficients for these media (independent of the vegetation canopy).
- c) Under the hypothesis of bi-Lambertian leaves, estimate the foliar albedo of each soil-vegetation mixture using relation (5).

- d) Estimar el albedo foliar promedio correspondiente a la escala del píxel, producto de los albedos foliares de las mezclas suelo-vegetación presentes, usando la relación (2).
- e) Con el albedo foliar promedio del píxel, estimar la reflectancia en el infinito usando la relación (3) y la (4).
- f) Estimar la reflectancia del píxel para cualquier condición de mezcla suelo-vegetación usando las curvas iso-IAF e iso-Suelo. Esto es, conocida la reflectancia en el infinito y la línea del suelo (invariante bajo efectos de escala), se puede generar curvas iso-Suelo proyectándolas desde su punto de convergencia hasta los valores de reflectancia del suelo deseado.

El algoritmo presentado es válido para cualquier escala arbitraria del píxel y no supone homogeneidad a nivel de los objetos que lo componen. La aplicación del algoritmo desarrollado no será discutida en este trabajo, ya que requiere una estrategia de conversión, simplificada y operacional, de medios heterogéneos a homogéneos, la cual será discutida en otra publicación.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se han revisado los diferentes enfoques para caracterizar y modelar el efecto de escala de las reflectancias en la mezcla suelo-vegetación. La versión probabilística plantea una escala de homogeneidad (representatividad estadística) que depende de la geometría de las plantas en un píxel, de su cobertura y de las propiedades ópticas de los suelos. Así, el concepto de homogeneidad probabilística es variante bajo efecto de escala.

Usando una formulación determinística de la dinámica espectral asociada al crecimiento de la vegetación, se revisó el efecto de escala en experimentos de cultivos con diferentes coberturas. Para el caso de suelo desnudo, la línea del suelo es invariante bajo efectos de escala y humedad del suelo. Para vegetación de baja cobertura, el efecto de escala depende fuertemente de la hipótesis de homogeneidad (plantas individuales con propiedades espectrales similares) y geometría asociada a una escala de un píxel. En vegetación de alta cobertura el efecto de escala es menor que la de baja cobertura, pero todavía dependiente de los mismos factores.

La idea central de la discusión fue demostrar que los conceptos de homogeneidad y representatividad estadística usados en los enfoques probabilísticos de escalamiento, depende de las propiedades ópticas y geométricas de los elementos constitutivos de un píxel

- d) Estimate the average foliar albedo corresponding to the scale of the pixel, product of the foliar albedos of the soil-vegetation mixtures present, using relation (2).
- e) With the average foliar albedo of the pixel, estimate infinite reflectance using relation (3) and (4).
- f) Estimate the reflectance of the pixel for any condition of soil-vegetation mixture using the iso-LAI and iso-Soil curves. That is, knowing the infinite reflectance and the soil line (invariant under scale effects), iso-Soil curves can be generated projecting them from their convergence point to the desired values of soil reflectance.

The algorithm that was presented is valid for any arbitrary scale of the pixel and does not assume homogeneity at the level of the objects it is comprised of. The application of the developed algorithm will not be discussed in this work, given that it requires a conversion strategy, simplified and operational, of heterogeneous to homogeneous media, which will be discussed in another publication.

### CONCLUSIONS

In this work, a revision has been made of the different approaches for characterizing and modeling the scale effect of the reflectances in the soil-vegetation mixture. The probabilistic version implies a scale of homogeneity (statistical representativity) which depends on the geometry of the plants in a pixel, their canopy and the optical properties of the soils. Therefore, the concept of probabilistic homogeneity is variant under scale effect.

Using a deterministic formulation of the spectral dynamic associated to the growth of the vegetation, the scale effect was revised in experiments of crops with different canopies. For the case of bare soil, the soil line is invariant under effects of scale and soil moisture. For low canopy cover vegetation, the scale effect strongly depends on the hypothesis of homogeneity (individual plants with similar spectral properties) and geometry associated with a scale of one pixel. In high canopy cover vegetation, the scale effect is less than that of low canopy cover, but it still depends on the same factors.

The central idea of the discussion was to demonstrate that the concepts of homogeneity and statistical representativity used in the probabilistic approaches of scaling, depend on the optical and geometric properties of the constitutive elements of a pixel with respect to a scale where the pixels, within a class of vegetation with relatively equal characteristics (crops or natural vegetation), are assumed to be similar

en relación a una escala donde los píxeles, dentro de una clase de vegetación con características relativamente iguales (cultivos o vegetación natural), son supuestos como similares (estadísticamente). Aunque un cultivo pueda considerarse como físicamente homogéneo (plantas individuales con apariencias similares), esto no implica que la variabilidad de sus propiedades espectrales esté acotada. Las propiedades espectrales son función de los cambios dinámicos que se dan en las componentes de la mezcla suelo-vegetación; particularmente para cultivos con baja cobertura del suelo.

Finalmente, se desarrolló un algoritmo general para resolver el problema de escalamiento para medios heterogéneos y sólo se usó la hipótesis de conservación de la energía en el medio (píxel).

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo del CONACYT, convenio CONACYT-2002-C01-41792, del proyecto Agricultura Asistida por Sensores Remotos.

#### LITERATURA CITADA

- Aplin, P. 2006. On scales and dynamics in observing the environment. *International J. Remote Sensing* 11: 2123-2140.
- Baret, F., S. Jacquemoud, and J. F. Hanocq. 1983. 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 Environ.* 46: 213-222.
- Cracknell, A. P. 1998. Synergy in remote sensing. What's in a pixel? *Int. J. Remote Sensing* 19: 2025-2047.
- Dagan, G. 1986. Statistical theory of groundwater flow and transport: pore to laboratory, laboratory to formation, and formation to regional scale. *Water Resources Res.* 9: 120-130.
- Daughtry, C. S. T., V. C. Vanderbilt, and V. J. Pollard. 1982. Variability of reflectance measurements with sensor altitude and canopy type. *Agron. J.* 71: 744-751.
- Fisher, P. 1997. The pixel: a snare and a delusion. *Int. J. Remote Sensing* 18: 679-685.
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology, A simulation study. *Simulation Monographs*. PUDOC. Wageningen, The Netherlands. 259 p.
- Goudriaan, J., and H. M. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes, textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 238 p.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environ.* 17: 35-53.

(statistically). Although a crop can be considered physically homogeneous (individual plants with similar appearances), this does not imply that the variability of their spectral properties is limited. The spectral properties are a function of the dynamic changes that occur in the components of the soil-vegetation mixture; particularly for crops with low cover of the soil.

Finally, a general algorithm was developed to solve the problem of scaling for heterogeneous media and only the hypothesis of energy conservation in the media (pixel) was used.

—End of the English version—



- Marceau, D. J., D. J. Gratton, R. A. Fournier, and J. P. Fortin. 1994a. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 2. The optimal spatial resolution. *Remote Sensing of Environ.* 49: 105-117.
- Marceau, D. J., P. J. Howarth y D. P. Gratton. 1994b. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 1. The scale and spatial aggregation problem. *Remote Sensing of Environ.* 49: 93-104.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2006. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. *Agrociencia* 40: 99-108.
- Ross, J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. W. Junk, Norwell, MA, 391 p.
- Sinoquet, H., B. Moulin, and R. Bonhomme. 1991. Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: comparison between three-dimensional digitizing and plant profiles. *Agric. For. Meteorology* 55: 233-249.
- Stewart, D. W., C. Costa., L. M. Dwyer, D. L. Smith, R. I. Hamilton, and B. L. Ma. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agron. J.* 93: 1465-1474.
- Tian, Y., Y. Wang, Y. Zhang, Y. Knyazikhin, J. Bogaert, and R. B. Myneni. 2002. Radiative transfer based scaling of LAI retrievals from reflectance data of different resolutions. *Remote Sensing of Environ.* 84: 143-159.
- Wood, E. F., M. Sivapalan, K. Beven, and L. Band. 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrological models. *J. Hydrology* 102: 29-47.
- Woodcock, C. E., and A. H. Strahler. 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environ.* 21: 311-332.