

## INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura de regadío es la actividad humana que consume más agua en el mundo, en competencia directa con el sector industrial y urbano (López-Urrea *et al.*, 2009). Dicha agricultura representa el mayor aporte a la seguridad alimentaria ya que produce cerca del 40 % de los alimentos y de las materias primas agrícolas en 17% de superficie cultivada (FAO, 2002). La superficie irrigada a nivel global ha aumentado casi el doble en las últimas décadas y contribuye significativamente a la producción de alimentos. Sin embargo, un mayor desarrollo de las áreas bajo riego, necesaria para alcanzar los requerimientos alimenticios de los próximos años, está seriamente limitado por la disminución de los recursos hídricos, sobre todo en regiones semiáridas, donde a medida que los recursos existentes alcanzan su plena explotación se produce una escasez grave de agua (Duchemin *et al.*, 2008).

Para explorar nuevas técnicas de ahorro de agua de riego es necesario tener un conocimiento profundo del uso y consumo de agua por parte de los cultivos, también denominado balance hídrico. Al respecto, uno de los componentes más importantes del balance es la evapotranspiración del cultivo (ET), proceso mediante el cual se transfieren grandes volúmenes de agua desde el suelo (evaporación) y la vegetación (transpiración) hacia la atmósfera. Por lo tanto, la ET constituye un factor clave para determinar una calendarización de riego apropiada y para mejorar la eficiencia del uso del agua en la agricultura de regadío. La estimación precisa de la ET constituye una etapa importante en el diseño y planeación del riego; y una determinación espacial correcta es crucial para lograr una agricultura sustentable (Er-Raki *et al.*, 2006; Allen *et al.*, 2009). La medida directa de la ET requiere de instrumentación compleja, por lo cual se han desarrollado varios métodos prácticos para estimarla. En este sentido, la estimación de la ET

mediante sensores remotos, a pesar de la investigación realizada en los últimos años aún presenta diferentes grados de incertidumbre. Por estos motivos, la presente investigación recoge la necesidad de desarrollar nuevas técnicas basadas en sensores remotos, que mejoren la estimación de la ET y puedan ser usadas en un contexto operacional de la programación de los riegos.

Tradicionalmente la estimación de la ET ha sido planteada a partir de la metodología propuesta por FAO-56 (Allen *et al.*, 1998), la cual se define en términos de una evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), multiplicada por un coeficiente de cultivo (*K<sub>c</sub>*). En los últimos años varias investigaciones han sido realizadas para desarrollar metodologías que permitan estimar la ET usando sensores remotos (Kalma *et al.*, 2008). Uno de los enfoques ampliamente aplicado es estimar el *K<sub>c</sub>* mediante índices de vegetación (IV) derivados de medidas de reflectancia del cultivo (Heilman *et al.*, 1982) que son similares a los patrones de los coeficientes del cultivo en el tiempo. Este método permite generar valores de *K<sub>c</sub>* distribuidos espacialmente que reproducen el desarrollo del cultivo en campo (Bausch y Neale, 1989) y son usados para ajustar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) estimada diariamente con datos de una estación meteorológica local (González-Dugo, 2009). Los coeficientes de cultivo provenientes de medidas espectrales son independientes de los parámetros de tiempo (fecha de siembra y cubierta efectiva) y representan un coeficiente de cultivo en tiempo real (Baush y Neale, 1987).

Para el uso de la tecnología de los sensores remotos, es necesario el establecimiento de criterios objetivos que permitan caracterizar las etapas fenológicas bajo la restricción de usar sólo información espectral (reflectancias). Un caso particular a considerar en el análisis, es el de los cultivos energéticos o cultivados en alta densidad para la obtención de biomasa (B<sub>m</sub>), donde el

uso de variables como la fracción de cobertura ( $f_v$ ) o el índice de área foliar (IAF) resultan difíciles de aplicar, ya que estos cultivos alcanzan rápidamente los valores críticos.

En relación a la productividad de los cultivos la etapa más crítica es el periodo entre el comienzo del desarrollo vegetativo hasta un poco después de la floración (Doorenbos and Kassam, 1979), por lo que es determinante establecer el inicio y final de ésta. Los criterios de inicio ( $f_v = 10\%$ ) y fin ( $f_v$  entre 70 y 80 %, IAF = 3 o inicio de la floración) establecidos por FAO-56 resultan aparentemente objetivos, a pesar de las dificultades operacionales para su estimación.

El objetivo general de esta investigación es analizar los alcances y limitaciones del uso de IV generalizados, para la estimación de ET y Bm en cultivos agrícolas con diferentes densidades de follaje; así como desarrollar esquemas de modelación alternativos para el uso de los IV en términos operacionales. Entre los objetivos específicos se planteó revisar los alcances y limitaciones del uso de los IV en la estimación del Kc según el método dual de FAO, en cultivos agrícolas con diferentes densidades de follaje; desarrollar esquemas alternativos de modelación de la relación entre la evapotranspiración y la biomasa con IV generalizados, basados en los parámetros de las líneas iso-IAF espectrales, y por último desarrollar esquemas operacionales para el uso de los IV en la estimación de evapotranspiración y biomasa, en una perspectiva genérica a nivel de zonas de riego.

El presente trabajo consta de tres artículos, el primero aborda las limitaciones de los IV basados en las pendientes de las líneas iso-IAF en la estimación de variables biofísicas usando el modelo expo-lineal de crecimiento de la vegetación. Los dos restantes revisan los criterios usados por FAO-56 para definir la etapa de desarrollo vegetativo de los cultivos cuando se usan

experimentos con mediciones simultáneas de variables biofísicas y de reflectancias en parcelas experimentales, considerando casos de cultivos con densidad media y alta.

#### LITERATURA CITADA

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes, D. y Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 58, FAO, Roma.
- Bausch, W.C. and C.M.U. Neale, 1989, Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling, Trans. ASAE, 46: 1901-1908.
- FAO, 2002. *In: Deficit Irrigation Practices -Foreword.* FAO Technical Papers- Water Reports No. 22. [http://www.fao.org/documents/show\\_cdr.asp?url\\_file%2Fdocrep/004/Y3655E/y3655e01.htm](http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file%2Fdocrep%2F004%2FY3655E%2Fy3655e01.htm).
- Heilman, J.L., W.E. Heilman and D.G. Moore. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance, Agronomy Journal, 74: 967-971.
- Duchemin B., P. Maisongrande, G. Boulet, I. Benhadj. 2008. A simple algorithm for yield estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. Environmental Modelling & Software 23: 876-892.
- Er-Raki S., A. Chehbouni, N. Guemouria, B. Duchemin, J. Ezzahar, R. Hadria. 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. Agricultural Water Manage. 87 (2007) 41–54.
- Allen R.G., M. Tasumi, A. Morse, R. Trezza, J.L. Wright, W. Bastiaanssen, W. Kramber, I. Lorite and C.W. Robison. 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Applications. J. Irrig. and Drain. 133(4):395-406.

- Kalma, J.D., T.R. MacVicar, M.F. McCabe. 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surv. Geophys.* 29(4-5):421-469.
- González-Dugo M.P., C.M.U. Neale, L. Mateos, W.P. Kustas, J.H. Prueger, M.C. Anderson, F. Li. 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(2009) 1843–1853.
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO. Rome, Italy. 193 p.

## **CAPITULO I**

### **LIMITACIONES EN LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES BIOFÍSICAS EN CULTIVOS USANDO SENSORES REMOTOS: EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FOLLAJE**

**LIMITACIONES EN LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES BIOFÍSICAS EN CULTIVOS  
USANDO SENSORES REMOTOS: EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FOLLAJE  
LIMITATIONS ON THE ESTIMATION OF BIOPHYSICAL VARIABLES IN CROPS  
USING REMOTE SENSING: FOLIAGE DENSITY EFFECT**

**RESUMEN**

En cultivos con una densidad alta del follaje, se produce la saturación rápida de la banda del rojo y la reducción de las variaciones en las pendientes de las curvas de igual vegetación (iso-IAF), en las que están basados muchos índices de vegetación (IV). Por ello, es importante el desarrollo de índices alternativos que no presenten problemas de saturación y sean fácilmente parametrizados con información de campo. Con este fin, se evalúan en este trabajo las limitaciones del NDVI<sub>cp</sub> e IV\_CIMAS y se propone un esquema alternativo de IV basados en las constantes aditivas de las líneas iso-IAF. Se analiza la estimación de variables biofísicas: biomasa aérea (Bm), fracción de cobertura (fv) y altura (h) de dos cultivos con diferente densidad del follaje, alta (sorgo) y media (algodón). Al aplicar un modelo expo-lineal, se espera que presenten un patrón bi-lineal siempre que exista coincidencia de las variables en las fases de inicio y final. En general, las fases exponencial y lineal de la Bm no coinciden con las de fv y h, mostrando diferencias entre las características estructurales y de distribución espacial de la vegetación (fv y h) y la función fotosintética (follaje y biomasa). Las relaciones entre las variables biofísicas y espectrales se analizaron dentro del marco teórico de las líneas de igual vegetación en el espacio rojo-infra rojo cercano, mediante los índices de vegetación NDVI<sub>cp</sub> e IV\_CIMAS basados en la constante multiplicativa  $b_0$  (pendiente). El cultivo de densidad media presenta patrones bilineales bien caracterizados en cambio, el de alta densidad muestra una rápida saturación en la fase exponencial de la Bm. Para reducir el problema de saturación, se exploró el uso de la constante

aditiva  $a_0$  (intersección de las líneas de igual vegetación) como alternativa de los índices basados en la pendiente. La relación entre la constante aditiva y Bm presentó patrones de tipo expo-lineal doble con problemas en la definición de sus transiciones; las relaciones con la variable fv fueron bi-lineales (ambas densidades del follaje), permitiendo una parametrización fácil en campo de los índices de vegetación (uso de fv); con la h las relaciones fueron lineal-exponencial.

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

## INTRODUCCION

Los actuales sistemas productivos y de consumo han estimulado un aumento en el consumo de energía. Sin embargo, la necesidad de preservar el medio ambiente y de asegurar un desarrollo sostenible, exigen el uso de fuentes renovables. Entre las energías renovables, se destacan los productos obtenidos a partir de materia orgánica para producir energía. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2007), el 10% de la energía primaria mundial procede de los recursos asociados a la biomasa. La biomasa para energía se obtiene entre otras fuentes de cultivos energéticos. La ventaja fundamental de éstos es la predicción de su disposición y la concentración espacial de la biomasa, asegurando el suministro, lo cual es fundamental para cualquier industria.

En consecuencia, es necesaria una herramienta operativa para monitorear los cultivos energéticos y estimar variables biofísicas como la biomasa aérea seca (Bm), el índice de área foliar (IAF), altura (h) y cobertura de la vegetación (fv) que permitan un manejo estratégico de los mismos.

La tecnología de los sensores remotos, permite el seguimiento del crecimiento y desarrollo de la vegetación, a través de las relaciones empíricas calculadas entre las variables biofísicas de los cultivos y los índices de vegetación espectrales (IV), de los que existe una amplia colección (Verstraete y Pinty, 1996). Orientados a detectar la señal proveniente de la



cubierta vegetal, la mayoría de los IV están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación (Tucker, 1979). Los índices de vegetación están influenciados por numerosos factores, entre los que destacan los efectos atmosféricos, la geometría sol-sensor y la mezcla suelo-vegetación. En particular, la variación en el brillo y color del suelo de fondo reviste mucha importancia para las estimaciones de variables biofísicas. Para reducir el efecto se han diseñado diferentes IV que minimizan la respuesta del índice a una misma cantidad de cubierta vegetal variando las condiciones del suelo de fondo, tales como los índices GESAVI (Gilabert *et al.*, 2002) y el NDVI<sub>cp</sub> (Paz *et al.*, 2007), cuyo rango de validez está limitado hasta una primera fase exponencial de los patrones espectrales asociados al crecimiento de la vegetación (curvas iso-IAF). Romero *et al.* (2009) han generalizado el NDVI<sub>cp</sub> para el caso de las fases exponencial y lineal (hasta el IAF máximo) usando el índice IV\_CIMAS.

En el caso de cultivos energéticos, la densidad del follaje de la vegetación es muy alta, provocando la saturación rápida de la banda del R, así como un efecto de reducción de las variaciones en las pendientes de las curvas iso-IAF, en las que está basado el NDVI<sub>cp</sub>, IV\_CIMAS y muchos otros IV. De esta situación emerge la necesidad del desarrollo de índices alternativos que no presenten los problemas de saturación mencionados, además de que su parametrización sea fácilmente realizada con información de campo (*f<sub>v</sub>*), sin necesidad de recurrir a constantes empíricas generales como en el caso del NDVI<sub>cp</sub> e IV\_CIMAS.

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

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el caso del cultivo de densidad normal, se analizó un cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) donde se midieron las variables Bm, IAF, h y fv; además de mediciones radiométricas usando bandejas deslizables con diferentes suelos debajo del cultivo. Los detalles del experimento se pueden ver en Huete *et al.* (1985).

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

El experimento de radiometría y de variables biofísicas se llevó a cabo en la finca experimental Las Tiesas del Instituto Técnico Agronómico Provincial situada en los términos municipales de Barrax y Albacete, España (39° 14' N, 2° 5' O, 695 msnm). El clima se caracteriza por una acusada variación estacional que se corresponde con su continentalidad, con unas temperaturas medias del mes más frío (enero) de 4-5 °C y del mes más cálido (Julio) de 24 °C aproximadamente. La precipitación media anual es 320 mm año<sup>-1</sup>. La profundidad media del suelo de la parcela del experimento fue de 40 cm limitado por el desarrollo del horizonte petrocálcico que se encuentra más o menos fragmentado. La textura es franco-arcillo-limosa, con un 13.42 % de arena, un 48.89 % de limo y un 37.69 % de arcilla, el pH es básico. El suelo es pobre en materia orgánica y en nitrógeno total, con un alto contenido en caliza activa y potasio.

Las medidas se hicieron en el área del lisímetro de herbáceos, se trata de un lisímetro de pesada continua que se utiliza para la rotación de cultivos estacionales (López-Urrea et al., 2009). Sus dimensiones son de 2.7 m de largo, 2.3 m de ancho y 1.7 m de profundidad, con una masa total de 14.5 Mg. Se encuentra dentro de una parcela de protección de 10,000 m<sup>2</sup> en la que el cultivo en estudio crece en condiciones óptimas, sin restricciones de agua y nutrientes. El sistema automatizado de riego por aspersión, mediante cobertura total enterrada, mantiene un elevado contenido de agua en el suelo, próximo a la capacidad de campo. El contenido de agua a

capacidad de campo (CC) fue 0.34 y en punto de marchitez permanente (PMP) 0.21 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Se ha considerado un nivel de agotamiento permisible (NAP) de 0,5 para valores de ETc de aproximadamente 5 mm día<sup>-1</sup> y para otros valores de ETc se utilizó la siguiente expresión: NAP = 0,5 + 0,04 (5 – ETc) (Allen *et al.*, 1998). Antes de la siembra no se aplicó fertilizante, pero durante el periodo vegetativo se incorporaron 60 kg de N ha<sup>-1</sup>. Para el control de malas hierbas se aplicaron 1.8 l ha<sup>-1</sup> de MCPA. Además, se realizaron dos tratamientos para el control de insectos, aplicando 3.2 l ha<sup>-1</sup> de clorpirifos 48%.

El sorgo se sembró el 23 de mayo de 2007 y se cosechó el 8 de octubre del mismo año. El marco de siembra fue de 50 x 10 cm (20 semillas m<sup>-2</sup>). La densidad final de plantas fue de 115,000 plantas ha<sup>-1</sup> aproximadamente. Es un híbrido de ciclo medio-tardío utilizado para la producción de biomasa, con unos rendimientos medios de 20-30 t de materia seca ha<sup>-1</sup>. La altura promedio de la planta alcanza los 4.0 metros. En el Cuadro 1 se muestra la fenología del cultivo de sorgo.

En la instrumentación radiométrica se utilizó el radiómetro multiespectral HR4000 (Ocean Optics<sup>MR</sup>, Florida, U.S.A.), con un intervalo efectivo que va de 200 a 1100 nm. En el rango 400-900 nm el ancho de banda es de 0.25-0.26 nm, con 1757 canales.

**Cuadro 1. Fenología del cultivo de sorgo**

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

La altura de observación para el sorgo fue de 4 m sobre el suelo (diámetro del círculo de observación de 0.7 m, para un ángulo de campo de visión instantáneo de 10°), utilizando una pértiga con nivel, hasta que la altura del cultivo superó los 3.5 m. Posteriormente la altura de observación fue de 5.8 m sobre el suelo (diámetro del círculo de observación de 1.0 m, para un ángulo de campo de visión instantáneo de 10°) mediante una estructura metálica.

Las mediciones espectrales se tomaron manteniendo la observación vertical sobre la cubierta vegetal estudiada (nadir) y en horario de máxima elevación solar (Milton, 1987), entre las 12:00 y las 14:00 horas. En la zona fuera del lisímetro se realizó un transecto de seis mediciones para garantizar la representatividad de la cubierta. La orientación del transecto de medidas fue perpendicular al recorrido del sol, es decir en dirección Norte-Sur, evitando sombrear la superficie medida ya sea por el operador o por cualquier elemento extraño (Jackson

*et al.*, 1980). Considerando que la configuración de iluminación entre medidas de la superficie y panel de referencia (Spectralon<sup>MR</sup>) no debe variar, las medidas se hicieron rápidamente, tomando una medida del blanco de referencia al inicio de cada transecto (McCoy, 2005).

Dados los niveles de ruidos asociados a las firmas espectrales de las mediciones, para el procesamiento de espectros se usó un promedio móvil de 13 datos, centrado en la longitud de onda de análisis. En el caso de ruidos extremos dentro de una ventana (758–762 nm; que en algunos casos de suelo se extendió hasta 778 nm), todos los datos fueron descartados.

Las mediciones hiperespectrales fueron remuestreadas a las bandas del sensor TM5 del satélite LANDSAT, usando las funciones de respuesta correspondientes. A partir de los 860 nm la señal del radiómetro se degrada considerablemente, por lo cual no se consideraron valores mayores. Para compensar el problema de no usar la parte derecha de la función de respuesta del IRC (860 a 900 nm), no se consideraron los valores de la función de respuesta con valores menores a 0.8. Esto hace razonablemente comparables las bandas del visible y del IRC; al reducir los efectos de los ruidos espectrales de acuerdo a lo discutido.

La cobertura vegetal ( $f_v$ ) fue estimada tomando una fotografía a nadir, sobre los puntos donde se adquirió la medición espectral y procurando evitar la presencia de sombras marcadas dentro de la cubierta que generan dificultades en la clasificación al mezclar suelo sombreado con hojas sombreadas. Se procesaron las imágenes mediante la técnica de clasificación supervisada distinguiendo entre las componentes de vegetación verde y suelo, en este caso se utilizó el programa ENVI<sup>MR</sup> 4.1. La clasificación explota la respuesta espectral de la vegetación en el

visible, el contraste entre el suelo (más brillante en el rojo y verde simultáneamente) y la vegetación (menos brillante en el rojo) (Calera et al., 2001).

Se midió la altura del sorgo desde la base hasta el elemento más alto de la planta escogiendo de forma aleatoria las plantas dentro de la parcela, 6 plantas en el área de protección, construyendo la curva de altura de cultivo.

Se obtuvo un rendimiento final de 66,023 Kg ha<sup>-1</sup> de biomasa fresca que equivalen a 22,374 Kg ha<sup>-1</sup> de biomasa seca. Las muestras para medir biomasa se tomaron cada dos o tres semanas, se utilizó un cuadrado de 0.5 x 0.5 m, en el que cabían 5 plantas, se registró el peso fresco y posteriormente se secaron en estufa entre 70-75 °C hasta peso constante.

### **Modelación de los patrones temporales de las variables biofísicas**

Se analizaron los patrones temporales de las variables biofísicas y espectrales para revisar los problemas asociados a la falta de correlación (patrones temporales desacoplados, es decir, con cambios de fases en tiempos diferentes).

Al modelar el crecimiento de la vegetación en el tiempo (Bm, IAF, fv, h; representadas en forma general por la variable V), se distinguen dos fases: una exponencial y una lineal.

Crecimiento exponencial:

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= rV \\ V(t) &= V(0)\exp(rt)\end{aligned}\tag{1}$$

Crecimiento lineal:

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= C \\ V(t) &= C(t - t_L)\end{aligned}\tag{2}$$

donde  $r$  es una tasa relativa de crecimiento,  $C$  es la tasa máxima de crecimiento y  $t_L$  es el tiempo cuando  $V(t=0)$  en la fase lineal; es decir, es el tiempo en que la fase lineal empieza en forma efectiva.

Las dos fases de la etapa vegetativa pueden ser analizadas en forma independiente haciéndolas compatibles en los puntos de transición o podemos generar un modelo con una transición gradual entre ambos tipos de crecimiento. En el último caso, en el momento de la transición del crecimiento exponencial al lineal las tasas de crecimiento deben ser iguales:

$$rV = C \quad (3)$$

El modelo expo-lineal es simplemente la solución de los dos tipos de crecimiento representados por las ecuaciones diferenciales anteriores sujeta a la condición dada por la relación de igualdad de las tasas de crecimiento (Goudriaan y Van Laar, 1994):

$$V(t) = \frac{C}{r} \ln\{1 + \exp[r(t - t_L)]\} \quad (4)$$

con las siguientes características:

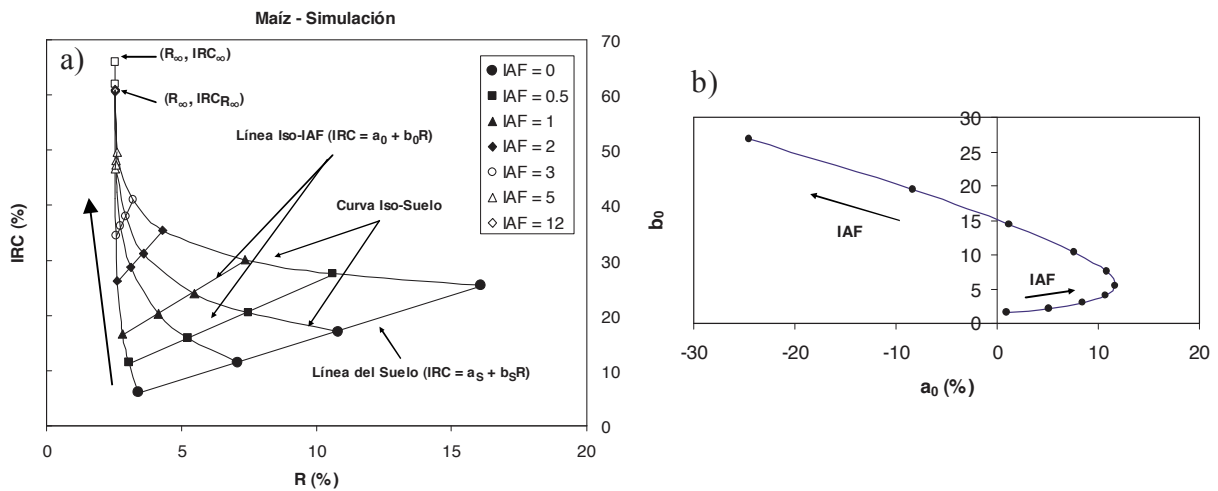
$$\begin{aligned} V(t = t_T) &= \frac{C}{r} \\ t_T &= t_L + \frac{0.541}{r} \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $t_T$  es el tiempo donde la condición (3) se cumple.

El modelo expo-lineal tiene bases biofísicas para el IAF (aproximación de medio homogéneo en términos físicos y de medio turbio en términos radiativos) (Ferrandino, 1989). Usando una relación lineal entre el IAF y la Bm, esta ecuación ha sido extendida para el caso de la Bm (Goudriaan y Monteith, 1990).

## Modelación de los patrones espectrales del crecimiento de los cultivos

Los patrones espectrales asociados al crecimiento del cultivo pueden ser usados para el desarrollo de índices de vegetación óptimos (Paz *et al.*, 2007). Para el espacio espectral del R-IRC, la Figura 1a muestra simulaciones radiativas asociadas al incrementar el IAF, usando diferentes propiedades ópticas (reflectancias) de los suelos. En Paz *et al.* (2005) se detallan las simulaciones de la Figura 1a.



**Figura 1. (a) Espacio espectral IRC-R para las simulaciones en el cultivo maíz y (b) espacio  $a_0$ - $b_0$  de los parámetros de las líneas iso-IAF asociadas.**

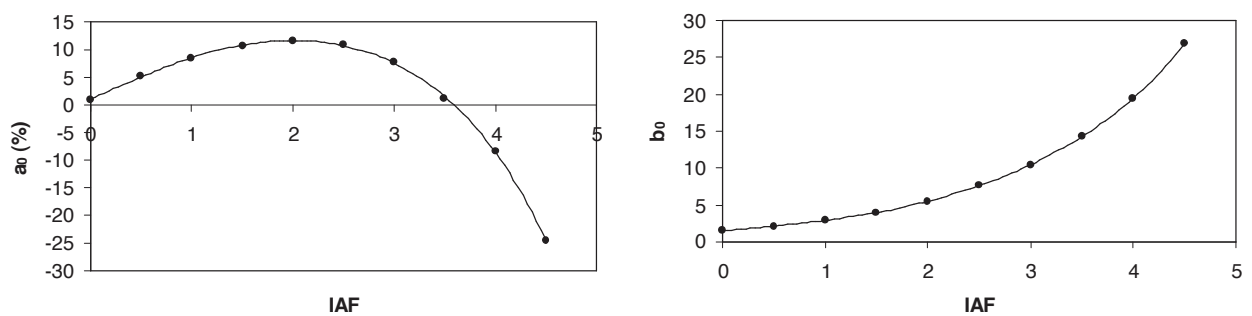
En la Figura 1a, para una reflectancia del suelo, las curvas iso-suelo convergen hasta un punto (ápice del “sombrero de tres picos”) donde la reflectancia del R no cambia (se satura), representando un medio ópticamente denso o de reflectancia en el infinito ( $R_{\infty}$ ). Las bandas del visible se saturan más rápidamente que las del IRC (función fotosintética), por lo que el IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio punto de saturación ( $IRC_{\infty}$ ). En el caso del punto de saturación de la banda del R, el valor asociado del IRC es  $IRC_{R_{\infty}}$  (Figura 1a). Para la misma cantidad de vegetación (iso-IAF, iso-Bm, iso-h o iso-fv), pero con diferentes propiedades del



suelo (textura, materia orgánica, óxidos de fierro o humedad; principalmente), podemos definir líneas rectas con parámetros  $a_0$  y  $b_0$  (constante aditiva y multiplicativa, respectivamente; Figura 1a), los cuales varían en función de la cantidad de vegetación presente. Las curvas de igual vegetación van desde la condición de  $IAF = 0$ , representada por la línea del suelo con  $a_0 = a_s$  y  $b_0 = b_s$ , hasta una línea recta vertical ( $a_0 \rightarrow -\infty$  y  $b_0 \rightarrow +\infty$ ), que representa el punto de saturación de las bandas del R e IRC (línea recta sobre el ápice del sombrero de tres picos, Figura 1a).

La Figura 1b presenta el patrón asociado a los parámetros  $a_0$ - $b_0$ , donde para valores del IAF menores a 2, la relación es de tipo exponencial y para después de una transición de cambio de pendiente, la relación es de tipo lineal ( $IAF > 2.5$ ). Las relaciones entre el IAF y los parámetros  $a_0$  y  $b_0$  esta mostrada en la Figura 2. Yoshioka *et al.* (2000) presentan con mayor detalle estos patrones y su asociación a variables biofísicas.

En la Figura 2b se observa un patrón creciente entre IAF y  $b_0$ , razón por la cual el diseño de índices de vegetación o IV se ha enfocado en aproximar  $b_0$ ; a diferencia del caso del patrón entre el IAF y  $a_0$  que presenta un patrón creciente y uno decreciente, Figura 2a.



**Figura 2. Relación entre IAF- $a_0$  (a) y entre IAF- $b_0$  (b).**

Paz *et al.* (2007) propusieron el índice NDVI<sub>cp</sub> como una aproximación a los cambios de las variables biofísicas asociados a cambios en la pendiente de las líneas de igual vegetación. A diferencia del índice NDVI [= (IRC-R)/(IRC+R)] (Rouse *et al.*, 1974) que trata de aproximar lo

mismo suponiendo un origen de todas las líneas en (0, 0); es decir,  $a_0 = 0$ , Paz *et al.* (2007) propusieron usar una relación entre  $a_0$  y  $b_0$  (parte exponencial), aproximada por una línea recta en el espacio transformado  $a_0-1/b_0$  para definir el NDVI<sub>cp</sub>:

$$\begin{aligned} NDVI_{cp} &= \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \\ \frac{1}{b_0} &= c + da_0 \end{aligned} \quad (6)$$

donde  $c$  y  $d$  son constantes empíricas.

El problema del uso de las relaciones (6) es el requerimiento de estimar  $c$  y  $d$  (relativamente constantes entre los cultivos) y de que sólo son validas para la parte exponencial.

Usando un espacio transformado  $a_1-\beta$  (Paz *et al.*, 2005):

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{90 - \arctan(b_1)}{45} \\ b_1 &= \frac{b_0}{b_0 - b_s} \\ a_1 &= a_0(1 - b_1) + a_s b_1 \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $a_s$  y  $b_s$  corresponden a los parámetros de la línea del suelo.

Romero *et al.* (2009) propusieron el uso de los patrones desde dos perspectivas: fase lineal hasta un poco después de la transición a la exponencial, la cual define una relación ( $q$  y  $r$  son constantes empíricas):

$$\beta = q + ra_1 \quad (8)$$

y la fase exponencial modelada por el NDVI<sub>cp</sub>, de tal forma que pueda aproximar el patrón completo de la Figura 1b (pendientes  $b_0$  y  $\beta$ ) para generar el índice IV\_CIMAS:

$$\begin{aligned} IV\_CIMAS &= NDVI_{cp}(b_0), \text{ si } \beta \leq \beta_c \\ IV\_CIMAS &= NDVI_{cp}(\beta), \text{ si } \beta > \beta_c \end{aligned} \quad (9)$$

donde  $\beta_c$  es un valor umbral (generalmente  $\beta_c = 0.25$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ajuste del modelo expo-lineal a las variables biofísicas

El modelo expo-lineal fue ajustado a los datos experimentales usando regresión no lineal, donde la raíz del error cuadrático medio (RECM) fue minimizado. Para esto se utilizó la función SOLVER<sup>MR</sup> del software Excel<sup>MR</sup>. Las Figuras 3, 4 y 5 muestran los resultados obtenidos en el ajuste del modelo expo-lineal a la Bm, fv y h respectivamente.

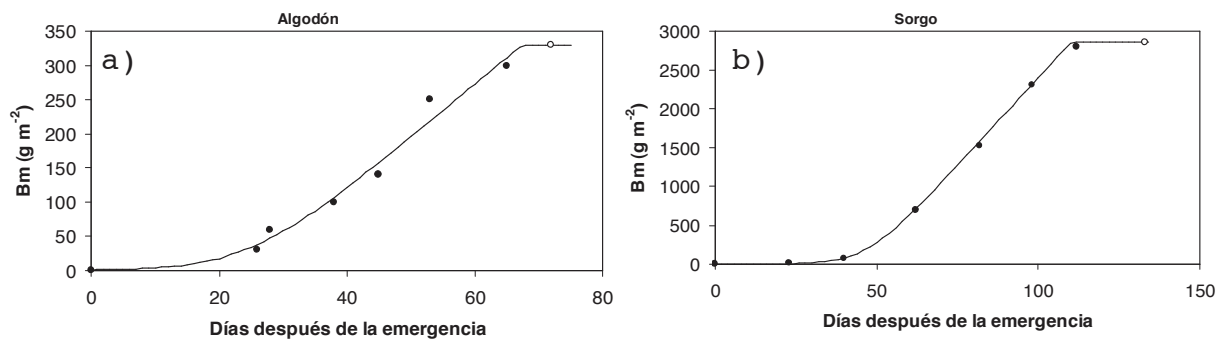


Figura 3. Ajuste de la Bm mediante el modelo expo-lineal para algodón (a) y sorgo (b).

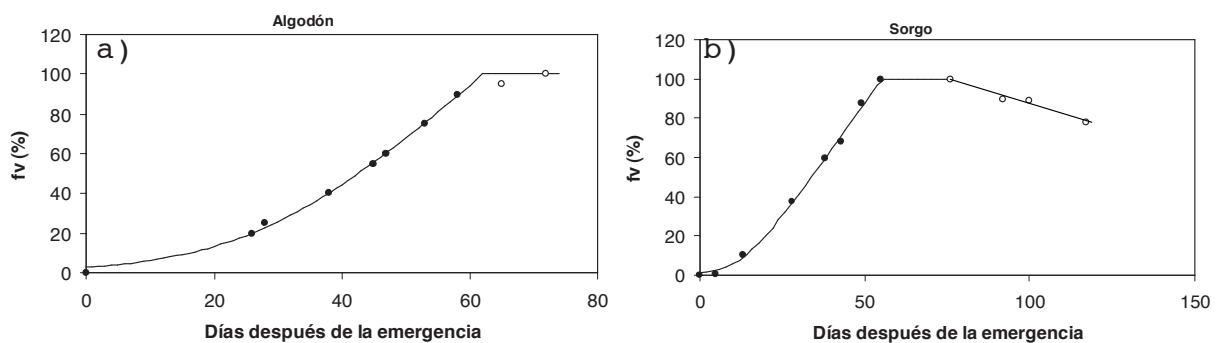
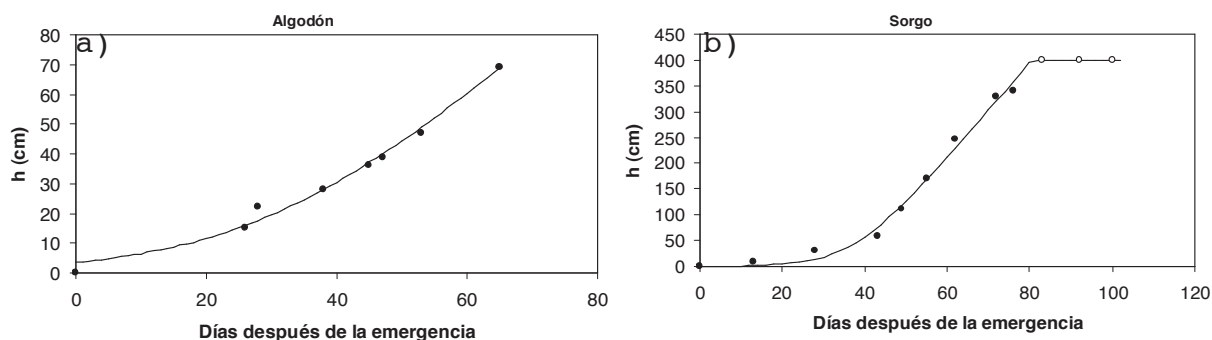


Figura 4. Ajuste de la fracción de la fv mediante el modelo expo-lineal para algodón (a) y sorgo (b).



**Figura 5. Ajuste de la altura del cultivo mediante el modelo expo-lineal para algodón (a) y sorgo (b).**

Los parámetros del ajuste del modelo expo-lineal están mostrados en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Parámetros del ajuste del modelo expo-lineal) de las variables Bm, fv y h.**

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

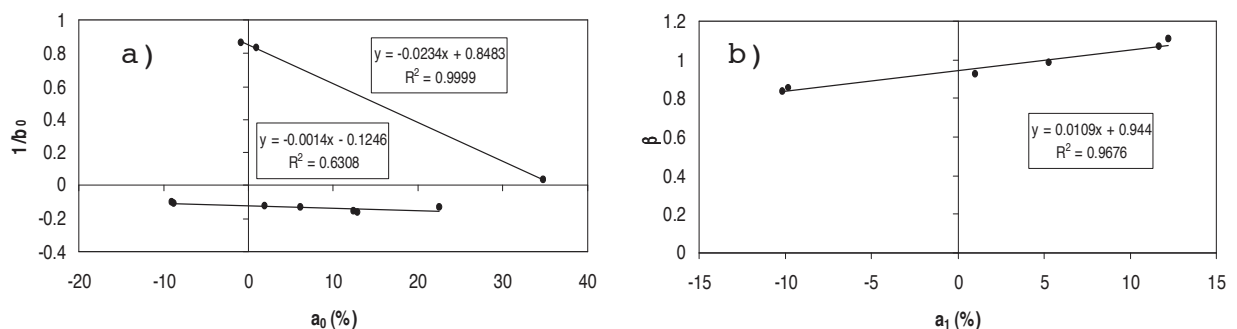
$t_L$ = crecimiento cero;  $t_T$ = tasas de crecimiento iguales; r: tasa relativa de crecimiento; C: tasa máxima de crecimiento

La determinación de relaciones (lineales, dado un modelo común) entre un par de variables es dependiente de que los patrones de inicio y termino de las fases del modelo exponencial coincidan, en caso contrario las relaciones serán del tipo no lineal. Solamente en el caso del cultivo algodón, variables  $f_v$  y  $h$ , se da aproximadamente esta condición. Dentro de una fase (tiempos de traslape entre dos variables), si ambas variables tienen funciones matemáticas similares, entonces se obtendrá una relación lineal. En lo general, dadas las diferencias en  $r$  y  $C$ , se esperan patrón bi-lineales en casos donde los tiempos de inicio y término de las fases más o menos coincidan.

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

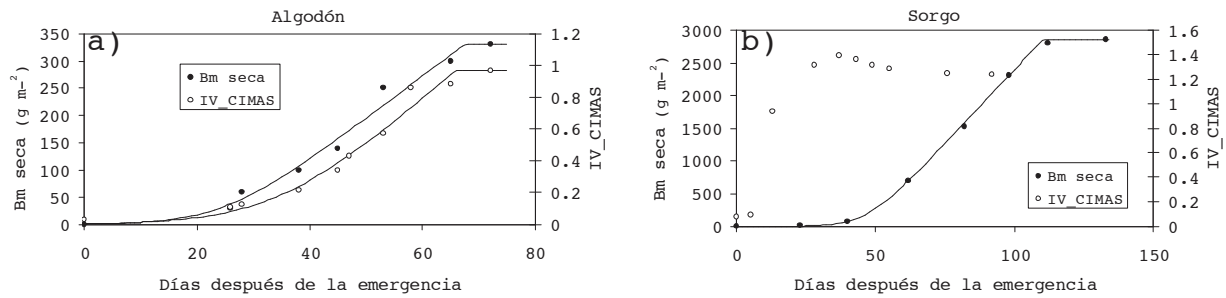
### Patrones espectrales de los cultivos

La Figura 6 muestra el espacio  $1/b_0-a_0$  y  $\beta-a_1$  de los parámetros de las líneas de igual vegetación en el espacio espectral del R-IRC para las mediciones radiométricas en el sorgo, donde se observa que las relaciones utilizadas en el NDVIcp e IV\_CIMAS resultan correctas.



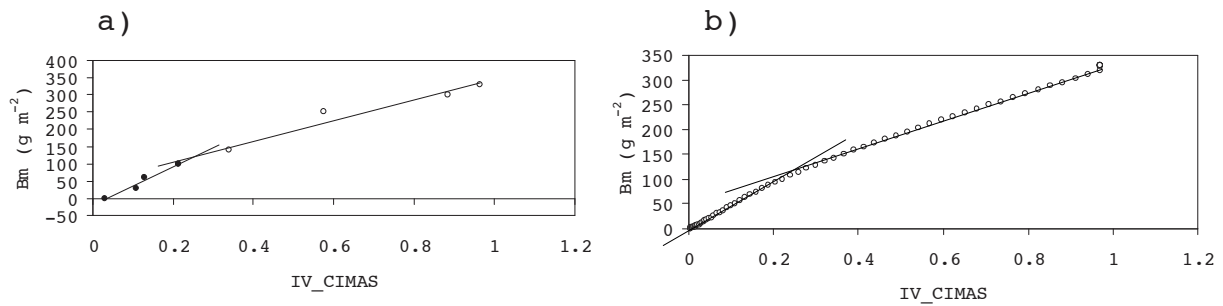
**Figura 6. Relaciones paramétricas en los espacios  $1/b_0-a_0$  (a) y  $\beta-a_1$  (b) para sorgo.**

En la Figura 7 se muestra el grafico del modelo expo-lineal ajustado a la Bm (aérea seca) y al IV\_CIMAS (estimado directamente de las pendientes  $b_0$  ajustadas a los datos experimentales de las líneas de igual vegetación), tanto para el caso del cultivo con densidad normal (media) del follaje (algodón), como para el de alta densidad (sorgo).



**Figura 7. Patrones temporales de la Bm e IV\_CIMAS para el algodón (a) y sorgo (b), con modelos expo-lineales ajustados.**

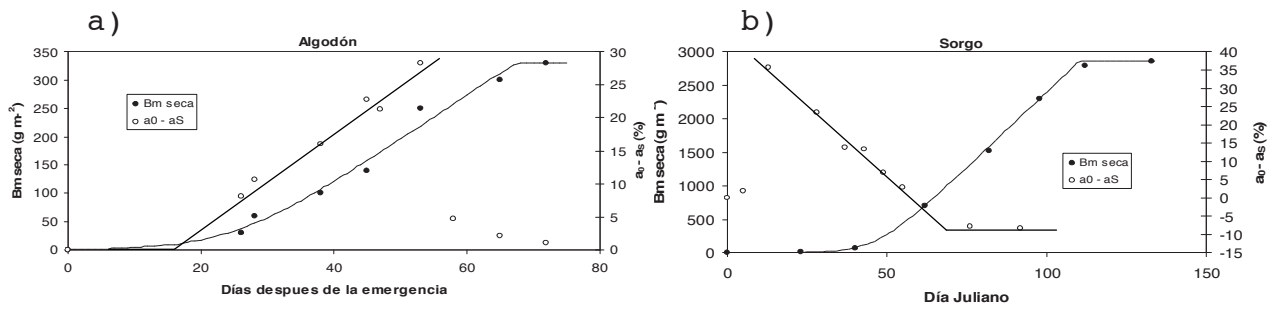
En cultivos de alta densidad del follaje, el IV\_CIMAS (basado en  $b_0$ ) resulta inadecuado para modelar la dinámica de la Bm, ya que se satura rápidamente. Así, en el caso del sorgo (Figura 7), el IV\_CIMAS llega a sus valores máximos en la fase exponencial y después refleja pequeños cambios debido al mayor espesor de la cubierta vegetal, caracterizada por valores altos de IAF. Por el otro lado, el cultivo de algodón de densidad normal no presenta el problema de saturación del IV\_CIMAS y tiene una dinámica similar a la Bm (Figura 7). Considerando que los inicios y finales de las fases de los modelos expo-lineales ajustados al algodón, Bm e IV\_CIMAS, son relativamente similares, en la Figura 8 se muestra la relación entre ambas variables, tanto a nivel de datos experimentales como de los modelos expo-lineales ajustados. En ambos casos se presenta una relación bi-lineal (fase exponencial y fase lineal), tal como es esperado.



**Figura 8. Relación entre IV\_CIMAS y Bm, datos experimentales (a) y modelo expo-lineal ajustado (b), para algodón.**

Una alternativa al uso de  $b_0$  para la construcción de índices de vegetación es el uso de  $a_0$  como parámetro básico ( $a_0 - a_s$ , para forzar las relaciones a pasar por el origen), aunque éste presenta un patrón bi-fásico (fase creciente y decreciente) al relacionarlo con el IAF (Figura 2a).

En la Figura 9 se muestran los patrones temporales de la Bm (con el modelo expo-lineal ajustado) y de  $a_0 - a_s$ . En el algodón, la relación de  $a_0 - a_s$  es del tipo lineal proporcional hasta donde la etapa vegetativa termina e inicia la reproductiva (Figura 9). Después los valores se reducen y reflejan cambios asociados a las propiedades ópticas del follaje y la floración. En el caso del sorgo para  $a_0 - a_s$ , después de una fase creciente rápida dentro de la fase exponencial de la Bm, el patrón es lineal e inversamente proporcional, hasta un valor cercano a  $t_T$  y después permanece constante.

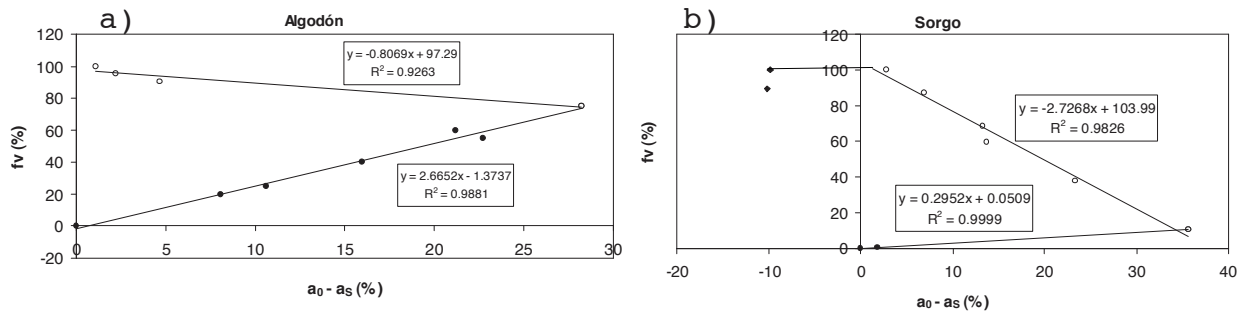


**Figura 9. Patrones y ajustes temporales: biomasa seca y  $a_0$ - $a_5$  para el algodón (a) y biomasa seca y  $a_0$ - $a_5$  para el sorgo (b).**

De la Figura 2a y 9, y usando al tiempo como un indicador de IAF, el patrón temporal de  $a_0$ - $a_5$  sería al inicio un patrón expo-lineal creciente y después se presentaría uno expo-lineal decreciente. Para un cultivo de densidad de follaje normal como el algodón, el cambio de un patrón a otro esta relacionado con el término de la etapa vegetativa e inicio de la reproductiva (Bm). Para un cultivo de alta densidad de follaje como el sorgo, el cambio se da rápidamente y dentro de la fase exponencial de la etapa vegetativa (Bm). Esto está asociado a la arquitectura de la cubierta vegetal, para lo que tradicionalmente se ha utilizado el IAF. Como se aprecia en la Figura 9 cuando la biomasa alcanza un valor en torno a 300 g m<sup>-2</sup> se observa el cambio de pendiente  $a_0$ - $a_5$  frente al tiempo (se alcanza un valor umbral de IAF). Este comportamiento se reproduce en el sorgo, si atendemos a los rangos de valor en la biomasa, el máximo de Bm en algodón coincide con su valor al inicio de la etapa vegetativa del sorgo. Por ello, el comportamiento de  $a_0$ - $a_5$  frente al tiempo está asociado a la Bm y a la arquitectura de la cubierta vegetal.

Para entender los patrones observados entre la Bm y  $a_0 - a_5$ , se revisaron los patrones temporales de  $f_v$  y  $a_0 - a_5$  (Figura 10). Los círculos rellenos representan la fase exponencial (expo-lineal) de la etapa vegetativa y los círculos vacíos la fase lineal (reproductiva).



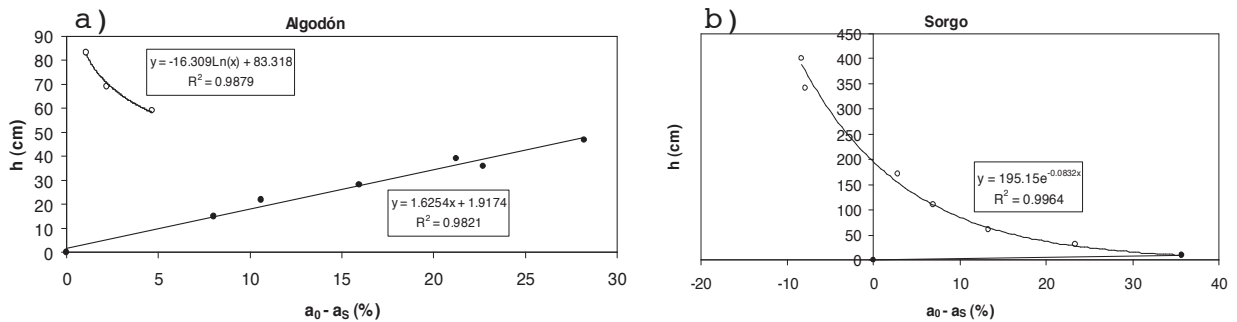


**Figura 10. Patrones temporales de fv y a<sub>0</sub>-a<sub>s</sub> para el algodón y sorgo.**

Si analizamos la Figura 10 usando como referencia la Figura 6 ( $a_0-1/b_0$ ), en un formato inverso, entonces observamos un patrón bi-lineal entre  $a_0-a_s$  y fv, donde el cambio de pendiente esta asociado al cambio observado a los patrones de la Figura 2a y 6 (fase exponencial a lineal o fase expo-lineal a reproductiva). Este modelo bi-lineal entre  $a_0-a_s$  y fv permite realizar estimaciones de  $b_0$  para el NDVIcp e IV\_CIMAS con información de campo fácilmente obtenible (fv).

Respecto a la altura h de los cultivos, parámetro importante en la estimación de la evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998), la Figura 11 muestra las relaciones entre  $a_0-a_s$  y h para algodón y sorgo, donde el patrón observado es lineal-exponencial, con un cambio de pendiente asociado a un cambio de fase similar al de la Figura 2a ó 6. Los círculos rellenos representan la fase exponencial (expo-lineal) de la etapa vegetativa y los vacíos la fase lineal (reproductiva). Este comportamiento es similar al observado entre  $a_0-a_s$  y fv, pero con un patrón exponencial para la fase lineal o reproductiva, permitiendo su modelación en forma simple y la

parametrización del NDVIcp ó IV\_CIMAS en forma más simplificada.



**Figura 11. Patrones temporales de  $h$  y  $a_0 - a_S$  para el algodón y sorgo.**

## CONCLUSIONES

De la modelación temporal de las variables biofísicas biomasa aérea seca (Bm), cobertura de la vegetación (fv) y altura (h), usando un modelo expo-lineal, es posible inferir las relaciones esperadas entre pares de variables, donde un patrón bi-lineal se presenta cuando los inicios y finales de las fases del modelo coinciden entre ambas variables. En general, las fases exponencial y lineal de la Bm no coinciden con las de fv y h, mostrando diferencias entre las características estructurales y la distribución espacial de la vegetación (fv y h) y la función fotosintética (follaje y biomasa).

En el caso de las relaciones entre las variables biofísicas y las espectrales, se utilizó el marco teórico genérico de las líneas de igual vegetación en el espacio del R-IRC, caracterizadas por la constante multiplicativa  $b_0$  (pendiente) y la aditiva  $a_0$  (intersección). Los índices de vegetación NDVIcp e IV\_CIMAS, basados en  $b_0$ , fueron analizados en su relación con las variables biofísicas. Para el caso del cultivo algodón de densidad de follaje normal, las relaciones del IV\_CIMAS con la Bm resultaron en patrones bi-lineales bien caracterizados, lo contrario al caso del cultivo sorgo de alta densidad de follaje, donde el IV\_CIMAS mostró una rápida

saturación en la fase exponencial de Bm debido a los altos valores de IAF alcanzados por esta cubierta vegetal.

Se exploró el uso de  $a_0$  ( $a_0 - a_s$ ) como métrica espectral para evitar los problemas de saturación de los índices de vegetación basados en  $b_0$ . Para el caso de la relación entre ( $a_0 - a_s$ ) y Bm, las relaciones fueron de tipo expo-lineal doble, con problemas en la definición de sus transiciones. No obstante lo anterior, para la variable  $f_v$ , las relaciones fueron bi-lineales (cultivo de densidad normal y alta del follaje), permitiendo una parametrización fácil en campo de  $a_0 - a_s$  (y NDVI<sub>cp</sub> e IV\_CIMAS). Algo similar se presentó en la relación con la  $h$ , donde el patrón fue lineal-exponencial.

Los análisis presentados muestran que la definición de fases en un formato expo-lineal, deben estar relacionadas con el cambio observado del comportamiento exponencial al lineal en el espacio  $a_0 - b_0$  ó  $a_0 - 1/b_0$ , de tal forma que pueda asociarse estos patrones con los de  $f_v$  y  $h$ . Esto es válido tanto para cultivos de densidad normal o alta.

#### LITERATURA CITADA

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Calera, A., C. Martínez, and J. Meliá. 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *Int. J. Remote Sensing*, 22, 3357-3362.
- Ferrandino, F.J. 1989. Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield. *Agric. and Forest Meteorol.* 47: 273-289.

- Gilabert, M.A., J. González-Piqueras, F.J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environ.* 82:303-310.
- Goudriaan, J., and J.L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann. of Bot.* 66: 695-701.
- Goudriaan, J., and H.H. 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.
- IEA (International Energy Agency). 2007. Potencial contribution of bioenergy to the world's future energy demand. *Implementing agreement on bioenergy*, International Energy Agency. 12 p.
- Jackson, R.D., P.J. Pinter, R.J. Reginato, and S. B. Idso. 1980. Hand-held radiometry. A set of notes developed for use at the workshop on hand-held radiometry. Phoenix, Arizona, February 25-26. US Department of Agriculture. *Agricultural Reviews and Manuals*. 66 p.
- López-Urrea, R., A. Montoro, P. López-Fuster, and E. Fereres. 2009. Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli. *Agric. Water Manage.* 96: 1155-1161.
- McCoy, R. M. 2005. *Fields methods in remote sensing*. The Guilford Press New York London. 159 p.
- Milton, E. J. 1987. Principles of field spectroscopy. *Int. J. Remote Sensing* 8:12, 1807-1827
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39:293-301.

- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41: 539-554
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43(3):291-307.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, MASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp: 1-371.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographics infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environ.* 8: 127-150.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE transactions in Geoscience and Remote Sensing* 34: 1254-1265.
- Yoshioka, H., T. Miura, A.R. Huete, y B.D Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. *Remote Sensing of Environ.* 74:313-326.

## **CAPITULO II**

### **SOBRE LA DEFINICIÓN DE LAS ETAPAS DE DESARROLLO DE LOS CULTIVOS CON FINES DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN USANDO LA METODOLOGÍA FAO-56 Y SENSORES REMOTOS**

**SOBRE LA DEFINICIÓN DE LAS ETAPAS DE DESARROLLO DE LOS CULTIVOS  
CON FINES DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN USANDO LA  
METODOLOGÍA FAO-56 Y SENSORES REMOTOS  
ON THE DEFINITION OF CROP DEVELOPMENT STAGES FOR  
EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION USING FAO-56 METHODOLOGY AND  
REMOTE SENSING**

**RESUMEN**

Se analizó la dinámica asociada a las variables biofísicas y espectrales: índice de área foliar (IAF), fracción de cobertura ( $f_v$ ) e índice de vegetación cinemáticamente modificado y ajustado por suelo (IV\_CIMAS) de cultivos con densidad foliar media (algodón y maíz) y densidad alta (sorgo); así como la asociación de estos patrones temporales y sus transiciones con los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) en el caso del sorgo. El ajuste estadístico de los modelos exponenciales truncado (ELT) y asimétrico (ELA) a  $f_v$ , IAF e IV\_CIMAS de los tres cultivos fue similar, sin embargo el modelo ELT resulta más adecuado al no requerir el valor máximo de la variable. De las tres variables modeladas, el IV\_CIMAS por diseño representa mejor la cantidad y calidad del follaje en un píxel o parcela experimental ya que es función de la cantidad de área foliar, de su distribución espacial, de las propiedades ópticas de las hojas y del suelo de fondo de la vegetación (línea del suelo).

Para estimar la evapotranspiración del cultivo en función del coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) (metodología FAO-56), se analizaron tres métodos distintos para caracterizar la etapa de desarrollo del cultivo, dos establecidos por FAO-56 (FAO-56 - Cobertura, FAO-56 – Floración) y uno que utiliza la información espectral mediante el IV\_CIMAS. Se analizaron los errores de las

estimaciones de  $K_{cb}$  de la etapa de desarrollo vegetativo por los tres métodos en relación a las estimaciones de  $K_{cb}$  del lisímetro de pesada obteniendo los mejores resultados para el método IV\_CIMAS y los peores para el método FAO-56 – Floración.

**Palabras clave:** evapotranspiración, etapas de desarrollo, FAO-56, índices de vegetación, sorgo

## INTRODUCCIÓN

Una aproximación operacional para la estimación de la evapotranspiración en los cultivos es la propuesta metodológica de FAO (Allen *et al.*, 1998), en lo siguiente denominada FAO-56. El método FAO-56 se fundamenta en la definición de etapas de crecimiento de los cultivos, asociadas a parámetros para la estimación de la evapotranspiración. Estos parámetros, relacionados con propiedades del crecimiento de los cultivos, requieren de su estimación en condiciones de campo.

La determinación operacional de las etapas del crecimiento para aplicar el método FAO-56 se dificulta a nivel de superficies con una alta diversidad de cultivos, como sucede en las zonas de regadío. La tecnología de los sensores remotos, bajo un esquema de asistencia, ha sido propuesta para este fin (Calera *et al.*, 2005).

La tecnología de los sensores remotos, permite el seguimiento del crecimiento y desarrollo de la vegetación, mediante la aplicación de relaciones empíricas calculadas entre las variables biofísicas de los cultivos ( $f_v$  ó fracción de cobertura vegetal, IAF ó índice de área foliar, coeficiente basal del cultivo ó  $K_{cb}$ ) y los índices de vegetación espectrales (IV), de los cuales se encuentra una vasta recopilación (Verstraete y Pinty, 1996; Paz *et al.*, 2007). La mayoría de los IV están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) proveniente de la vegetación (Tucker, 1979). Los efectos atmosféricos, la geometría sol-sensor y la mezcla suelo-vegetación son factores que influyen intensamente en los índices de vegetación.



En particular, la variación en el brillo y color del suelo de fondo reviste mucha importancia para las estimaciones de variables biofísicas. Para reducir el efecto se han diseñado diferentes IV que minimizan la respuesta del índice a una misma cantidad de cubierta vegetal variando las condiciones del suelo de fondo, tales como los índices GESAVI (Gilabert *et al.*, 2002) y el NDVIcp (Paz *et al.*, 2007), cuyo rango de validez se limita hasta una primera fase exponencial de los patrones espectrales asociados al crecimiento de la vegetación (curvas iso-IAF). Romero *et al.* (2009) han generalizado el NDVIcp para el caso de las fases exponencial y lineal (hasta el IAF máximo) mediante el índice IV\_CIMAS.

La problemática asociada a las estimaciones satelitales de la evapotranspiración actual (ETc), para definir los requerimientos de agua de los cultivos, requiere de enfoques pragmáticos, pero fundamentados en teoría y evidencia experimental.

La estimación de la ETc ha sido planteada en términos de una evapotranspiración de referencia (pasto o alfalfa), ETr, multiplicada por un coeficiente de cultivo (Kc) (Doorenbos y Pruitt, 1977). Partiendo de que las trayectorias temporales de los IV asemejan los patrones de los coeficientes del cultivo en el tiempo, se ha propuesto el uso de los IV para estimar Kc (Heilman *et al.*, 1982). Así, se han desarrollado relaciones lineales entre el Kc y diferentes IV (Bausch and Neale, 1987 y 1989; Bausch, 1993 y 1995), para ser usadas en un contexto operacional de la programación de riegos.

### **Planteamiento del problema**

La estimación de la evapotranspiración actual del cultivo ETc ha sido propuesta en función del coeficiente del cultivo Kc promedio (Doorenbos and Pruitt, 1977) y de la evapotranspiración de referencia ETr:

$$ETc = Kc \cdot ETr \quad (1)$$

La relación (1) se refiere a condiciones promedio, por lo que Wright (1982) propuso el método dual de estimación de  $K_c$ :

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (2)$$

donde  $K_{cb}$  es el coeficiente basal del cultivo (sin estrés) y  $K_e$  es el coeficiente asociado a la evaporación del suelo.

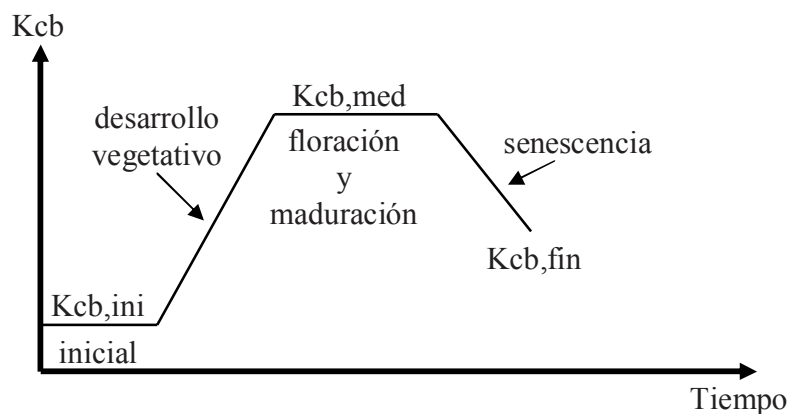
En el caso de cultivos sujetos a estrés hídrico, el coeficiente basal del cultivo ajustado,  $K_{cb_{ajustado}}$ , está dado por:

$$K_{cb_{ajustado}} = (K_s)(K_{cb} + K_e) \quad (3)$$

donde  $K_s$  es el coeficiente de estrés hídrico.

El método dual, y su ajuste por estrés hídrico, forman parte de la metodología actual propuesta por FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) para la estimación de  $ET_c$  mediante el uso de un coeficiente del cultivo. En el caso de FAO-56, la  $ET_r$  se ha reemplazado por  $ET_o$  que usa parámetros fijos de un cultivo hipotético de pasto.

FAO-56 ha desarrollado valores de  $K_{cb}$  para las etapas inicial (ini), media (med) y final (fin) para condiciones generales de distintos cultivos (Allen *et al.*, 1998). Para utilizar estos valores es necesario caracterizar el inicio y duración de las etapas de desarrollo de los cultivos, tal como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Etapas de desarrollo de los cultivos y Kcb, FAO-56.**

De acuerdo a FAO-56 (Allen *et al.*, 1998), las etapas mostradas en la Figura 1 están definidas por:

(a) Etapa inicial: Comprende desde la fecha de siembra hasta que un cultivo tiene un valor de aproximadamente  $f_v = 10\%$ . El valor de Kcb asociado depende de la intensidad y la frecuencia de los eventos de precipitación/riego.

(b) Etapa de desarrollo del cultivo. Va desde  $f_v = 10\%$  hasta una  $f_v$  efectiva completa. Para la mayoría de cultivos, la  $f_v$  completa ocurre al inicio de la floración. Para cultivos sembrados en hileras la  $f_v$  completa ocurre cuando algunas hojas en hileras adyacentes empiezan a traslaparse, lo que produce el sombreado casi completo del suelo. En lo general, se ha propuesto utilizar una  $f_v$  entre 70 y 80 %, o un IAF = 3, para caracterizar la ocurrencia de la  $f_v$  efectiva completa.

(c) Etapa de mediados del ciclo. Va desde la cobertura efectiva completa hasta el comienzo de la maduración (vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas).

(d) Etapa de final del ciclo. Va desde el comienzo de la maduración hasta el momento de la cosecha o la senescencia completa.

La etapa más crítica en relación a la productividad de los cultivos es la de desarrollo vegetativo hasta un poco después de la floración (Doorenbos and Kassam, 1979), por lo que es determinante establecer el inicio y terminación de esta etapa. Los criterios de inicio ( $f_v = 10\%$ ) y terminación ( $f_v$  entre 70 y 80 %,  $IAF = 3$  o inicio de la floración) establecidos por FAO-56 resultan aparentemente objetivos, independientemente de dificultades de su estimación en términos operacionales.

En el caso del uso de la tecnología de los sensores remotos, es necesario el establecimiento de criterios objetivos para caracterizar la etapa de desarrollo vegetativo, particularmente bajo la restricción de usar solo información espectral (reflectancias). Un caso a considerar en el análisis, es el de los cultivos energéticos o cultivados en alta densidad para la obtención de biomasa. En esta situación el uso de variables como la  $f_v$  o el  $IAF$  resulta difícil de aplicar, ya que estos cultivos rápidamente alcanzan los valores críticos.

En este trabajo se revisan los criterios usados por FAO-56 para definir la etapa de desarrollo vegetativo de los cultivos mediante experimentos con mediciones simultáneas de variables biofísicas y de reflectancias en parcelas experimentales, considerando los casos de cultivos con densidad media y alta. El objetivo principal de estos análisis es el de definir en forma operacional el inicio y final de la etapa discutida, con el uso de sensores remotos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizó la dinámica asociada a las variables biofísicas y espectrales de cultivos con densidad media de follaje, algodón (*Gossypium hirsutum* L.) (Huete *et al.*, 1985) y maíz (*Zea mays* L.) (Bausch, 1993), además de un cultivo con densidad alta de follaje, sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. H-133). Adicionalmente, se analizó la asociación de estos patrones temporales y sus transiciones con los  $K_c$  medidos para el cultivo de alta densidad.

### **Cultivos de densidad media de follaje: algodón y maíz**

En los cultivos con densidad media de follaje, se midieron las variables Bm, IAF, h y fv (no en ambos casos); además de mediciones radiométricas usando bandejas deslizables con diferentes suelos debajo del cultivo. Paz *et al.* (2005, 2007) y Romero *et al.* (2009) analizan a detalle estos cultivos en relación a sus patrones espectrales y del desarrollo de IV.

### **Cultivo de densidad alta de follaje: sorgo cv. H-133**

Las mediciones de radiometría y de variables biofísicas (Bm, h y fv) del sorgo, se realizaron en el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, España. Sus coordenadas geográficas son: 2° 5' 10'' longitud Oeste, 39° 14' 30'' latitud Norte, y su altitud sobre el nivel del mar es de 695 m. El clima local se clasifica como semiárido (D), mesotérmico (B'2), con nulo o escaso exceso de humedad (d), y con moderada concentración de necesidades de agua en verano (b'3) (Thornthwaite, 1948), con unas temperaturas medias del mes más frío (enero) de 4-5 °C y del mes más cálido (Julio) de 24 °C aproximadamente. La precipitación media anual es 320 mm año<sup>-1</sup>. Según el Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2006), el suelo de la parcela experimental se cataloga como Petrocalcic Calcixerepts. La profundidad media del suelo fue de 40 cm limitado por el desarrollo del horizonte petrocálcico que se encuentra más o menos fragmentado. La textura es franco-arcillo-limosa (13.42 % arena, 48.89 % limo y 37.69 % arcilla), pH básico, pobre en materia orgánica y en nitrógeno total y con un alto contenido en caliza activa y potasio.

Las medidas de las variables biofísicas se hicieron sobre un lisímetro de pesada continua que se utiliza para la rotación de cultivos estacionales, ubicado en el centro de una parcela de 100 x 100 m (López-Urrea *et al.*, 2009). Está provista de un sistema automatizado de riego por aspersión mediante cobertura total enterrada. De esta forma se mantuvo un contenido de agua en el suelo próximo a la capacidad de campo. Además se realizó una fertilización adecuada de 60 kg de N ha<sup>-1</sup> durante el período vegetativo; se aplicaron 1.8 l ha<sup>-1</sup> de herbicida MCPA para el control

de malezas y se hicieron dos aplicaciones de clorpirifos 48% ( $3.2 \text{ l ha}^{-1}$ ) para el control de insectos. Así, el cultivo de sorgo creció sin restricciones de agua y nutrientes, manteniendo las mismas condiciones de desarrollo en el lisímetro y el resto de la parcela de protección para que las medidas de evapotranspiración fueran representativas.

Las dimensiones del recipiente del lisímetro son de  $2.3 \times 2.7 \text{ m}$  de lado y  $1.7 \text{ m}$  de profundidad, con una masa total de  $14.5 \text{ Mg}$ . La precisión de la célula de carga es de  $250 \text{ g}$  lo que equivale a  $0.04 \text{ mm}$  de agua. Las medidas lisimétricas se recogen de manera automática cada  $15 \text{ min}$  en un datalogger. También se registraron las medias horarias y diarias. Estas mediciones se revisaron diariamente, eliminando las variaciones bruscas que no pudieron ser explicadas por procesos naturales de aporte y pérdida de agua. De esta manera, después de realizar el balance global, se obtuvo una medida directa y precisa de la evapotranspiración del sorgo (ETc) para las condiciones climáticas de la zona.

El sorgo dulce es un híbrido de ciclo medio-tardío, con gran capacidad de adaptación a climas áridos y semiáridos. Alcanza rendimientos medios de  $20\text{-}30 \text{ t}$  de materia seca  $\text{ha}^{-1}$  y una altura promedio de la planta de  $4.0 \text{ metros}$ . La siembra se llevó a cabo el  $23 \text{ de mayo}$  y la cosecha el  $8 \text{ de octubre de } 2007$ . La dosis de siembra fue de  $20 \text{ semillas m}^{-2}$ , con un marco de plantación de  $50 \times 10 \text{ cm}$ . La densidad final de plantas fue de  $115,000 \text{ plantas ha}^{-1}$  aproximadamente. En el Cuadro 1 se muestra la fenología del cultivo de sorgo.

**Cuadro 1. Fenología del cultivo de sorgo**

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

Las medidas espectrales se hicieron con un radiómetro HR4000<sup>MR</sup> fabricado por Ocean Optics, Inc. en Florida, U.S.A., el cual usa un intervalo efectivo que va de 200 a 1100 nm; sin embargo, por debajo de 400 nm y sobre los 900 nm el ruido es muy elevado. En este rango (400-900 nm) el ancho de banda es de 0.25-0.26 nm, con 1757 canales.

La altura de observación del radiómetro varió de 4 a 5.8 m sobre el suelo, que permite un círculo de observación con diámetro de 0.7 y 1.0 m respectivamente, para un ángulo de campo de visión instantáneo de 10°. Siguiendo la metodología propuesta por Milton (1987) se hizo un seguimiento periódico del cultivo, tomando las medidas espectrales a nadir y en horario de máxima elevación solar. Se hizo un transecto de seis medidas dentro y fuera del lisímetro para garantizar la representatividad de la cubierta. El transecto se trazó en dirección Norte-Sur, evitando sombrear la superficie medida (Jackson *et al.*, 1980). Para evitar que la configuración de iluminación entre medidas de la superficie y panel de referencia (Spectralon<sup>MR</sup>) variara, las

medidas se hicieron rápidamente tomando una medida del blanco de referencia al inicio de cada transecto (McCoy, 2005).

En el procesamiento de espectros se usó un promedio móvil de 13 datos, centrado en la longitud de onda de análisis. La ventana de datos 758–762 nm fue descartada por presentar ruidos extremos. Mediante una convolución se remuestrearon las medidas hiperespectrales tomadas en campo a las bandas del sensor LANDSAT5 TM, usando las funciones de respuesta correspondientes.

La cobertura vegetal ( $f_v$ ) se estimó mediante la técnica de clasificación supervisada de fotografías digitales tomadas a nadir sobre la cubierta vegetal en los puntos donde se hicieron las medidas espectrales (Calera *et al.*, 2001). La clasificación distingue entre los componentes de vegetación verde y suelo desnudo. Se utilizó el programa ENVI<sup>MR</sup> 4.1 para hacerla.

La biomasa se calculó tomando muestras de 0.5 x 0.5 m (5 plantas) cada dos o tres semanas. Después de registrar el peso fresco se secaron en estufa a 70-75°C hasta peso constante para obtener peso seco. El rendimiento a cosecha fue de 22,374 Kg ha<sup>-1</sup> de biomasa seca.

### **Modelación de los patrones temporales de las variables biofísicas y espectrales**

En el caso de los sensores remotos, análisis multi-temporal, la información disponible consiste en patrones temporales de IV, la cual puede usarse en forma objetiva al relacionarla con modelos dinámicos que tengan una base biofísica. En lo siguiente se utiliza a V para denotar cualquier variable biofísica o espectral.

El modelo expo-lineal discutido por Goudriaan y van Laar (1994) resulta atractivo de utilizar, ya que modela en forma gradual la transición de una fase exponencial a una lineal. Este modelo está definido por:



$$V(t) = \frac{C}{r} \ln\{1 + \exp[r(t - t_L)]\} \quad (4)$$

donde V es el crecimiento de la vegetación (Bm, IAF, fv, h); r es una tasa relativa de crecimiento; C es la tasa máxima de crecimiento y  $t_L$  es el tiempo cuando  $V(t)=V(t=0)$  en la fase lineal; es decir, el tiempo en que la fase lineal empieza en forma efectiva.

El modelo expo-lineal tiene las siguientes características:

$$\begin{aligned} V(t = t_T) &= \frac{C}{r} \\ t_T &= t_L + \frac{0.541}{r} \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $t_T$  es el tiempo donde la condición  $rV = C$  se cumple.

El modelo expo-lineal tiene bases biofísicas para el IAF (aproximación de medio homogéneo en términos físicos y de medio turbio en términos radiativos) (Ferrandino, 1989). Usando una relación lineal entre el IAF y la biomasa aérea ó Bm, esta ecuación ha sido extendida para el caso de la Bm (Goudriaan y Monteith, 1990).

El modelo expo-lineal captura la dinámica del crecimiento del follaje de los cultivos (Goudriaan y van Laar, 1994), donde al inicio del crecimiento el espacio disponible para las planta no esta limitado y cada nueva hoja formada contribuye a mas intersección de radiación y por lo tanto al crecimiento (fase exponencial), ya que no hay autosombreado entre las hojas y la contribución de cada nueva hoja es similar a la previa. Así, la tasa relativa de crecimiento (r) es constante. Al continuar el crecimiento del follaje de la vegetación, las hojas empiezan a autosombrarse y mas allá de un valor umbral máximo las contribuciones de las nuevas hojas en la captura de radiación del follaje son marginales (fase lineal). El inicio de la fase lineal del crecimiento se da cuando el cultivo alcanza la tasa máxima de crecimiento ( $C = rV$ ). En este punto, o cercano a él, las plantas mantienen una densidad de follaje constante y continúan

creciendo hasta llegar a su límite máximo que se asocia a un cambio de estrategia en la etapa de desarrollo (floración). Así, el IAF crece, pero la densidad del follaje a nivel de planta es constante. El crecimiento del IAF está referido a una parcela (población de plantas) y la densidad del follaje, en nuestro caso se refiere a nivel de planta.

Considerando que el  $K_{cb}$  es función de la altura del cultivo, del albedo (reflectancia) y de la resistencia aerodinámica del cultivo, principalmente (Allen *et al.*, 1998), y que esta última depende del área foliar (cantidad de estomas), edad y condición de las hojas y el grado de control estomático, el inicio de la etapa de desarrollo vegetativo que se asocia a la cobertura efectiva de los cultivos puede plantearse en términos objetivos como el punto de  $f_v$  ó IAF (ó un índice espectral) donde  $t = t_L$ , ya que define los requerimientos de agua necesarios para mantener la tasa máxima de crecimiento. El fin de esta etapa y el punto donde se presenta la cobertura efectiva completa es cuando la fase lineal termina. Esta definición objetiva y estrictamente fisiológica es independiente de los valores particulares del IAF y  $f_v$  asociados, ya que estos varían en función de la densidad de siembra (Ball *et al.*, 2000), principalmente.

El modelo expo-lineal de la relación (4) no tiene límite superior por lo que requiere ser truncado para un valor de  $V > V_{mx}$  (valor máximo). Así, en lo siguiente a este modelo se le denominará modelo expo-lineal truncado (modelo ELT).

La transición entre la fase exponencial y la reproductiva (representada por una función exponencial o de otro tipo) puede ser modelada de forma similar que la transición exponencial a la lineal (Goudriaan, 1994); aunque el modelo es un sigmoide simétrico que puede generalizarse a uno asimétrico (Yin *et al.*, 2003), pero con una pérdida de interpretación biofísica. Los modelos expo-lineales y sus generalizaciones utilizan la hipótesis de medios ambientes relativamente similares (principalmente la radiación).

El modelo expo-lineal asimétrico (en lo siguiente modelo ELA) (Yin *et al.*, 2003) está dado por:

$$V(t) = \frac{C}{r} \ln \left\{ \frac{1 + \exp[r(t - t_L)]}{1 + \exp[r(t - t_L - Vmx/C)]} \right\} \quad (6)$$

### Modelación de los patrones espectrales del crecimiento de los cultivos

Los patrones espectrales, en el espacio del R-IRC, asociados al crecimiento del cultivo pueden ser usados para el desarrollo de índices de vegetación óptimos (Gilbert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009). La Figura 2a muestra simulaciones radiativas asociadas al incremento del IAF, usando diferentes propiedades ópticas (reflectancias) de los suelos. Se indica la línea de suelo ( $IRC = a_s + b_s \cdot R$ ) así como las líneas iso-IAF ( $IRC = a_0 + b_0 \cdot R$ ). En Paz *et al.* (2005) se detallan las simulaciones de la Figura 2a.

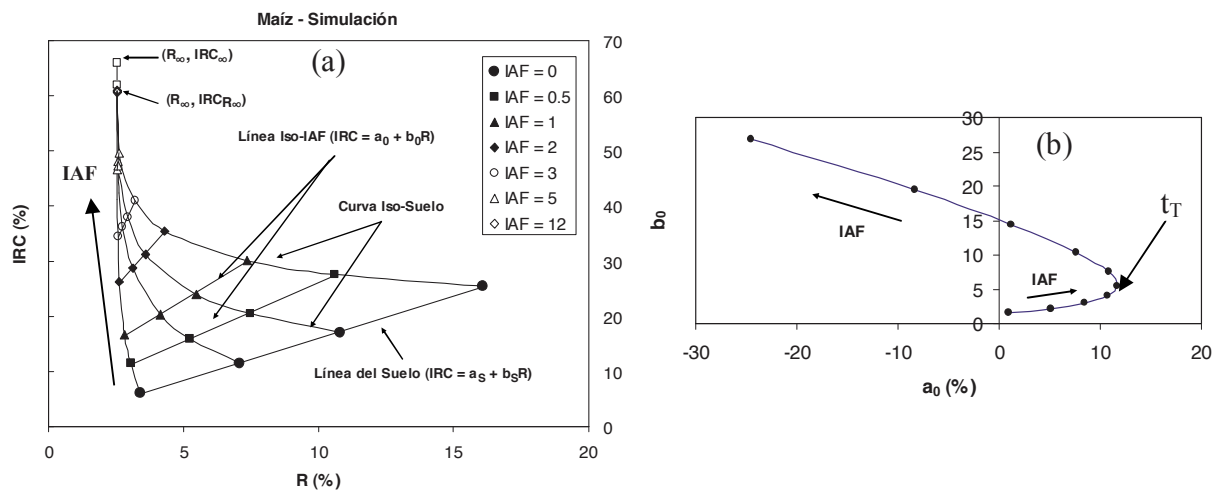


Figura 2. (a) Dinámica del crecimiento de la vegetación en el espacio espectral R-IRC.

En la Figura 2a, se observa que las curvas iso-suelo convergen hasta un punto (ápice del “sombrero de tres picos”) donde la reflectancia del R no cambia (se satura), lo cual representa un medio ópticamente denso o de reflectancia en el infinito ( $R_{\infty}$ ). Las bandas del visible se saturan

antes que las del IRC debido a la función fotosintética. El IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio punto de saturación ( $IRC_{\infty}$ ). El valor del IRC asociado al punto de saturación de la banda del R es  $IRC_{R_{\infty}}$ . Para la misma cantidad de vegetación (iso-IAF, iso-Bm, iso-h o iso-fv), pero con diferentes propiedades del suelo (textura, materia orgánica, óxidos de fierro ó humedad, principalmente), se puede definir líneas rectas con parámetros  $a_0$  y  $b_0$  (constante aditiva y multiplicativa respectivamente, Figura 2a), los cuales varían en función de la cantidad de vegetación presente. Las curvas de igual vegetación van desde la condición de  $IAF = 0$ , representada por la línea del suelo con  $a_0 = a_s$  y  $b_0 = b_s$ , hasta una línea recta vertical ( $a_0 \rightarrow -\infty$  y  $b_0 \rightarrow +\infty$ ), que representa el punto de saturación de las bandas del R e IRC (línea recta sobre el ápice del sombrero de tres picos).

La Figura 2b presenta el patrón asociado a los parámetros  $a_0$ - $b_0$ , donde para valores de IAF menores a 2, la relación es de tipo exponencial y para valores del IAF mayores a 2.5 existe un cambio de pendiente y la relación es de tipo lineal. Este patrón expo-lineal de la relación entre  $a_0$ - $b_0$  se puede asociar con los modelos expo-lineales discutidos. Así, la transición entre el patrón exponencial al lineal establece el punto cuando  $t = t_T$  (Figura 2b).

Paz *et al.* (2007) propusieron el índice NDVI<sub>cp</sub> como una aproximación a los cambios de las variables biofísicas que se asocian a cambios en la pendiente de las líneas de igual vegetación. A diferencia del índice NDVI = [(IRC-R)/(IRC+R)] (Rouse *et al.*, 1974) que trata de aproximar lo mismo suponiendo un origen de todas las líneas en (0,0), Paz *et al.* (2007) propusieron usar una relación entre  $a_0$  y  $b_0$  (fase exponencial), aproximada por una línea recta en el espacio transformado  $a_0 - 1/b_0$  para definir el NDVI<sub>cp</sub>:

$$NDVI_{cp} = \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \tag{7}$$

$$\frac{1}{b_0} = c + da_0$$

donde c y d son constantes empíricas.

Al utilizar un espacio transformado  $a_1$ - $\beta$  (Paz *et al.*, 2005):

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{90 - \arctan(b_1)}{45} \\ b_1 &= \frac{b_0}{b_0 - b_s} \\ a_1 &= a_0(1 - b_1) + a_s b_1\end{aligned}\tag{8}$$

donde  $a_s$  y  $b_s$  corresponden a los parámetros de la línea del suelo, Romero *et al.* (2009) propusieron el uso de los patrones desde dos perspectivas: fase lineal hasta un poco después de la transición a la exponencial, la cual define una relación:

$$\beta = q + r a_1\tag{9}$$

donde q y r son constantes empíricas; y la fase exponencial modelada por el NDVI<sub>cp</sub>, de tal forma que pueda aproximar el patrón completo de la Figura 1b (pendientes  $b_0$  y  $\beta$ ) para generar el índice IV\_CIMAS:

$$\begin{aligned}IV\_CIMAS &= NDVI_{cp}(b_0), \text{ si } \beta \leq \beta c \\ IV\_CIMAS &= NDVI_{cp}(\beta), \text{ si } \beta > \beta c\end{aligned}\tag{10}$$

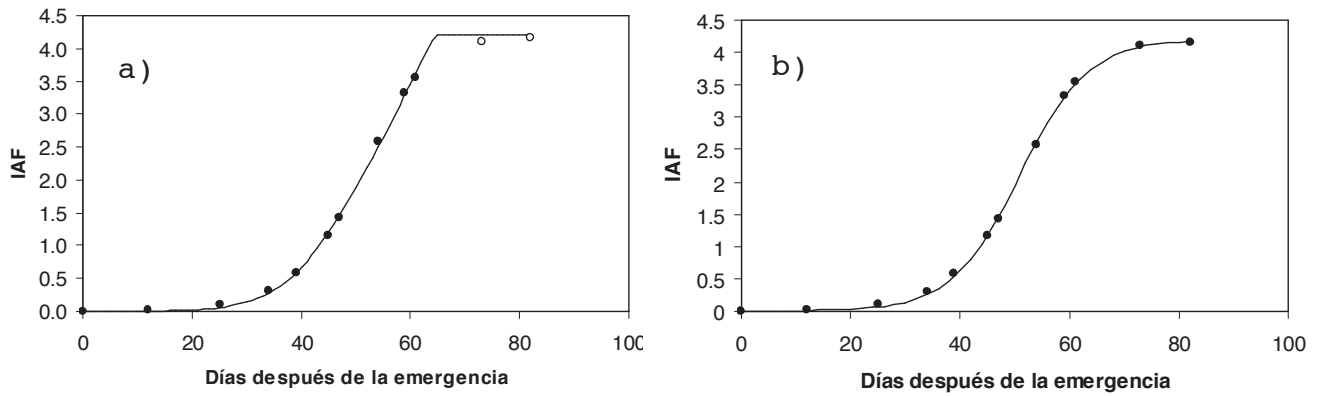
donde  $\beta c$  es un valor umbral (generalmente  $\beta c = 0.25$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ajuste de los modelos expo-lineales a las variables biofísicas y espectrales

Los modelos ELT y ELA fueron ajustados a los datos experimentales usando regresión no lineal, donde la raíz del error cuadrático medio (RECM) fue minimizado. Para esto se utilizó la función SOLVER<sup>MR</sup> del software Excel<sup>MR</sup>. La Figura 3 muestra el ajuste estadístico de los dos modelos expo-lineales a la variable IAF del cultivo de maíz. Los círculos rellenos representan los

puntos usados en los ajustes estadísticos de los modelos. El ajuste de ambos modelos expo-lineales fue similar y representa la dinámica del crecimiento asociada al IAF.



**Figura 3. Ajuste del IAF mediante los modelos expo-lineales ELT (a) y ELA (b) para maíz.**

El Cuadro 2 muestra los resultados de los modelos expo-lineales ajustados a  $f_v$ , IAF e IV\_CIMAS de los tres cultivos analizados, que en general, presentaron buenos resultados estadísticos.

**Cuadro 3. Parámetros de los modelos expo-lineales ajustados a los experimentos.**

Cultivo	Variable	Modelo ELT					Modelo ELA					
		$t_T$	r	C	$V(t=t_T)$	RECM	Máximo (DJ, Valor)	$t_T$	r	C	Vmx	RECM
	fv	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maíz	IAF	42.30	0.186	0.170	0.91	0.044	(65, 4.20)	53.6	0.161	3.46	4.20	0.030
	IV_CIMAS	39.40	0.231	0.026	0.11	0.015	(67, 0.78)	55.2	0.143	3.01	0.78	0.016
Algodón	fv	34.80	0.086	2.930	34.07	1.360	(62, 100)	18.7	0.385	2.10	100.00	2.483
	IAF	52.70	0.077	0.190	2.47	0.146	(62, 3.60)	51.5	0.108	5.94	3.80	0.160
	IV_CIMAS	59.30	0.093	0.079	0.85	0.017	(61, 0.94)	53.8	0.138	2.01	1.00	0.033
Sorgo	fv	11.80	0.030	2.090	69.67	1.419	(58, 100)	10.6	0.981	2.10	100.00	1.842
	IAF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IV_CIMAS	19.60	0.136	0.041	0.30	0.019	(38, 0.89)	18.9	0.184	0.07	0.89	0.030

$t_L$ = crecimiento cero;  $t_T$ = tasas de crecimiento iguales; r: tasa relativa de crecimiento; C: tasa máxima de crecimiento

Del análisis de los parámetros del Cuadro 3, las estimaciones de  $t_T$  usando el IAF y el IV\_CIMAS resultan muy cercanas entre sí, reflejando el diseño del IV\_CIMAS para tener una relación lineal (origen en 0) con el IAF (Romero *et al.*, 2009). En el caso de la fv, los valores de  $t_T$  son diferentes a los del IAF e IV\_CIMAS. Esto se puede explicar debido a que la fv es función de un corte bidimensional del follaje (vista aérea) y no considera al follaje en términos tridimensionales, tal como lo hace el IAF y el IV\_CIMAS. Por esta razón, en términos de Kcb, el uso de fv tiene limitaciones en relación a la estimación de la evapotranspiración, ya que es una medida restringida de la cantidad de estomas del follaje.

En el modelo ELT, se observa que los valores de IAF asociados al punto  $t=t_T$  tienen valores que van de 0.91 (maíz) a 2.47 (algodón), reflejando el arquetipo del cultivo y su densidad de siembra por lo que el considerar un valor umbral arbitrario para definir la cobertura completa efectiva resulta inestable. En el caso de  $f_v$ , los valores van de 34.07 % (algodón) a 69.07 % (sorgo) para los valores asociados a  $t_T$ . Algo similar ocurre para el caso del IV\_CIMAS.

En relación a los parámetros de los modelos ELT y ELA, estos discrepan entre sí en algunos casos, reflejando las hipótesis con que fueron desarrollados. Ahora bien, al considerar los errores de los ajustes (RECM), los resultados del Cuadro 3 muestran que el modelo ELA no mejora substancialmente las estimaciones, por lo que el modelo ELT resulta una mejor opción al no requerir del valor máximo de la variable, haciéndolo más adecuado para los ajustes del modelo expo-lineal en tiempos previos al valor máximo de la variable biofísica o espectral de interés.

Las variables biofísicas  $f_v$  e IAF son función del follaje “verde” de los cultivos, por lo que resultan difíciles de definir a nivel de curva completa del crecimiento, por otra parte, sólo incorporan criterios de cantidad y no consideran las propiedades foliares (control estomático). El IV\_CIMAS está basado en las relaciones entre los parámetros  $a_0$  y  $b_0$  con las propiedades biofísicas de los cultivos (Yoshiaka *et al.*, 2000):

$$\begin{aligned} a_0 &= f_v IRC_v + a_s [f_v T_{IRC}^2 + (1 - f_v)] - f_v R_v b_0 \\ b_0 &= b_s \left( \frac{f_v T_{IRC}^2 + (1 - f_v)}{f_v T_R^2 + (1 - f_v)} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

donde  $R_v$  e  $IRC_v$  se refieren a las reflectancias de la vegetación (suelo negro totalmente absorbente como fondo de la vegetación) y  $T$  son las transmitancias de la vegetación). Los parámetros  $a_s$  y  $b_s$  son las constantes de la línea del suelo, Figura 2a.



Las transmitancias están dadas por la Ley de Beer-Lambert, para hojas no negras (Goudriaan y van Laar, 1994):

$$\begin{aligned} T_R &= \exp\left\{(1 - \omega_R)^{1/2} K_R \cdot IAF\right\} \\ T_{IRC} &= \exp\left\{(1 - \omega_{IRC})^{1/2} K_{IRC} \cdot IAF\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

donde  $\omega$  es el albedo foliar (reflectancia más transmitancia) y K es un coeficiente de extinción global (radianza directa y difusa).

Las reflectancias de la vegetación pueden ser expresadas como (Bonhomme y Varlet-Grancher, 1977; Goudriaan, 1977; Ross, 1981):

$$\begin{aligned} R_V &\approx R_\infty - R_\infty T_R^2 \\ IRC_V &\approx IRC_\infty - IRC_\infty T_{IRC}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

donde las reflectancias en el infinito se muestran en la Figura 2a y pueden ser estimadas de (Goudriaan, 1977):

$$\begin{aligned} R_\infty &= qR_{\infty, h} \\ q &= \frac{2K_{dir, n}}{K_{dir, n} + K_{dif, n}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$R_{\infty, h} = \frac{1 - [1 - \omega_R]^{1/2}}{1 + [1 - \omega_R]^{1/2}} \quad (15)$$

donde K es un coeficiente de extinción, *dir* se refiere a radianza directa, *dif* a radianza difusa, n a hojas negras (absorbentes) y h a hojas con distribución angular horizontal. R se refiere a cualquier banda espectral (R o IRC). La relación (15) solo es válida para el caso de hojas donde la transmitancia foliar es igual a la reflectancia.

Los desarrollos mostrados implican que el IV\_CIMAS es función de la cantidad de área foliar (IAF), de su distribución espacial (fv y K), de las propiedades ópticas de las hojas ( $\omega$ ) y del suelo de fondo de la vegetación (parámetros de la línea del suelo). Así, el IV\_CIMAS es una

mejor representación de la cantidad y “calidad” del follaje en un píxel o parcela experimental, ya que considera en forma explícita el concepto de “verdor” del follaje. Los coeficientes de extinción K (global, difuso y directo) son función de la distribución angular de las hojas en las plantas (Ross, 1981). La  $f_v$  es función implícita de K, por lo que para un mismo IAF pueden obtenerse valores diferentes de  $f_v$ , dependientes de K.

### **Aproximaciones a la modelación del Kc del método FAO-56**

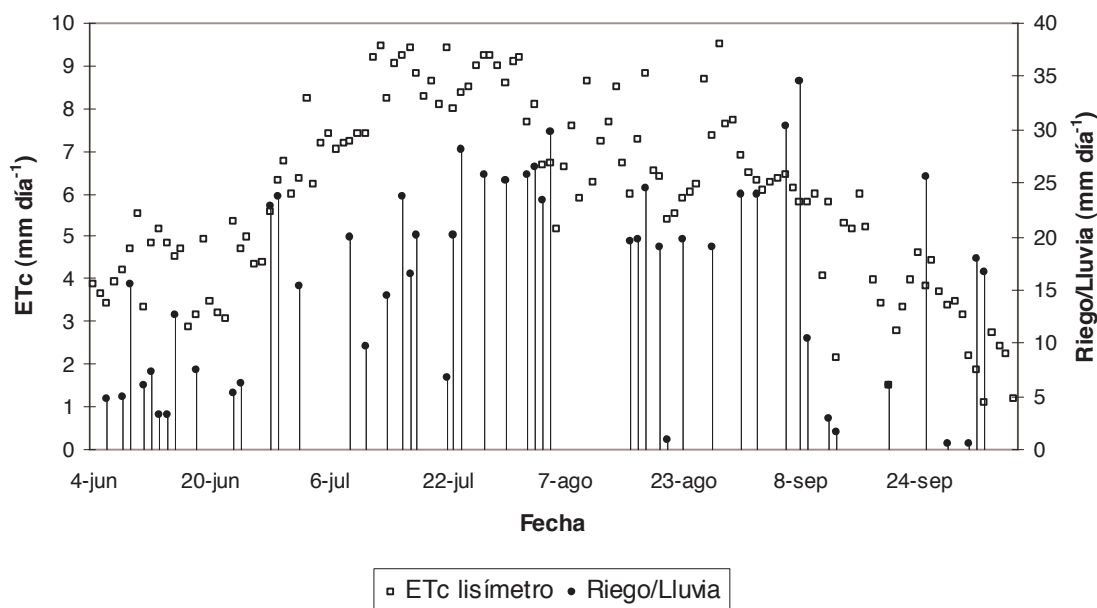
Para el cálculo de los valores diarios de la evapotranspiración del sorgo dulce (ETc) se utilizó la metodología propuesta por la FAO (Allen *et al.*, 1998):

$$ETc = ETo \cdot Kc$$

donde ETo es la evapotranspiración de referencia (cultivo hipotético) en mm día<sup>-1</sup> y Kc el coeficiente de cultivo (adimensional). La ETo se calculó mediante la ecuación de Penman-Monteith FAO-56, por ser la que mejor se adapta a la zona de trabajo (López-Urrea *et al.*, 2006). Los datos climáticos utilizados se tomaron de una estación agrometeorológica situada en la estación de lisimetría.

La medida de evapotranspiración del sorgo dulce se estimó a partir de los datos de peso del lisímetro, que representan una medida directa del flujo de agua que entra y sale del mismo. Se trabajó con los datos horarios para obtener el dato diario de agua evaporada. Cuando no se pudo obtener el valor diario, por diferentes motivos (lluvia, riego, corte del césped) se hizo un promedio entre el valor anterior y siguiente a ese día. Otras fuentes de error que condujeron a la eliminación de datos fueron: la verificación del peso, calibraciones por pérdida de contacto en la celda de carga, baja de voltaje en el sistema, pérdida de contacto del cable a tierra y falla en el registro de datos (López-Urrea *et al.*, 2006).

La Figura 4 muestra la ETc calculada y los eventos de riego/lluvia durante el ciclo de crecimiento del sorgo.



**Figura 4. Variación temporal del ETC y los eventos de riego/lluvia del experimento de sorgo.**

De las estimaciones de  $K_c$  a nivel diario, se utilizó una ventana móvil de 5 días y dentro de ésta se seleccionó el valor más bajo para representar  $K_{cb}$  (límite inferior de  $K_c$ , ver relación 2). Estos datos fueron revisados a detalle en relación a sus vecinos, para finalmente seleccionar los valores de  $K_{cb}$  que se utilizaron en los análisis siguientes.

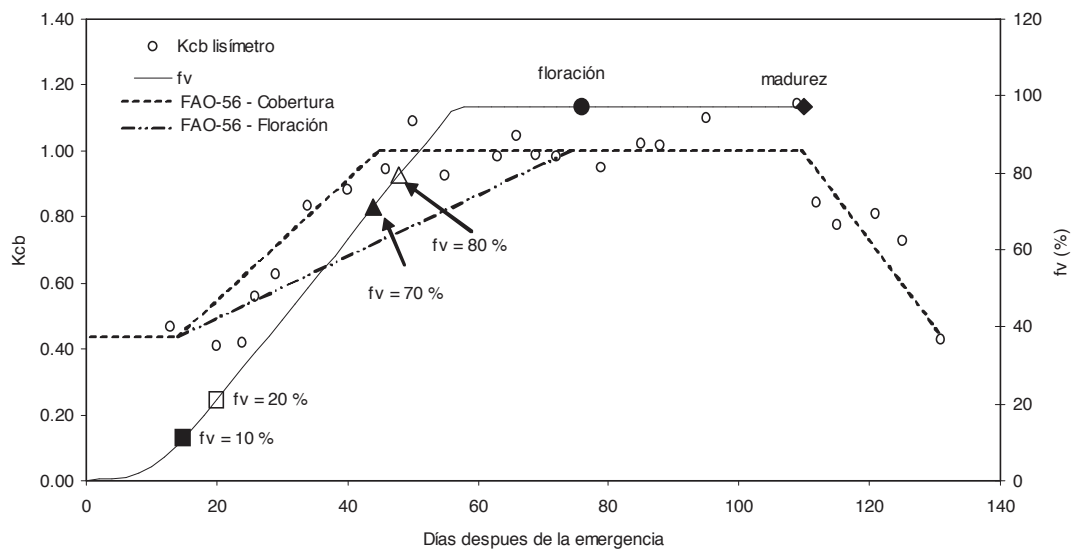
Para evaluar el inicio y fin de la etapa de desarrollo del cultivo se analizaron tres métodos: FAO-56 – cobertura, la cual inició cuando  $f_v = 10\%$  y terminó cuando  $f_v = 75\%$ ; FAO-56 – floración, comenzó cuando  $f_v = 10\%$  y terminó cuando la floración se presentó; IV\_CIMAS, inició cuando  $t = t_T$  y terminó cuando  $t = t_P$  (tiempo cuando se presenta el máximo).

Usando la información de  $K_c$  (Doorenbos and Kassam, 1979) y  $K_{cb}$  (Allen *et al.*, 1998), se estimaron los  $K_{cb}$  del sorgo dulce de FAO-56, después de su corrección por la humedad relativa mínima y velocidad del viento (Allen *et al.*, 1998). El Cuadro 4 muestra los parámetros utilizados para las etapas de desarrollo del sorgo, definidas por un valor de  $K_{cb}$  para un tiempo dado (días después de la emergencia ó DDE).

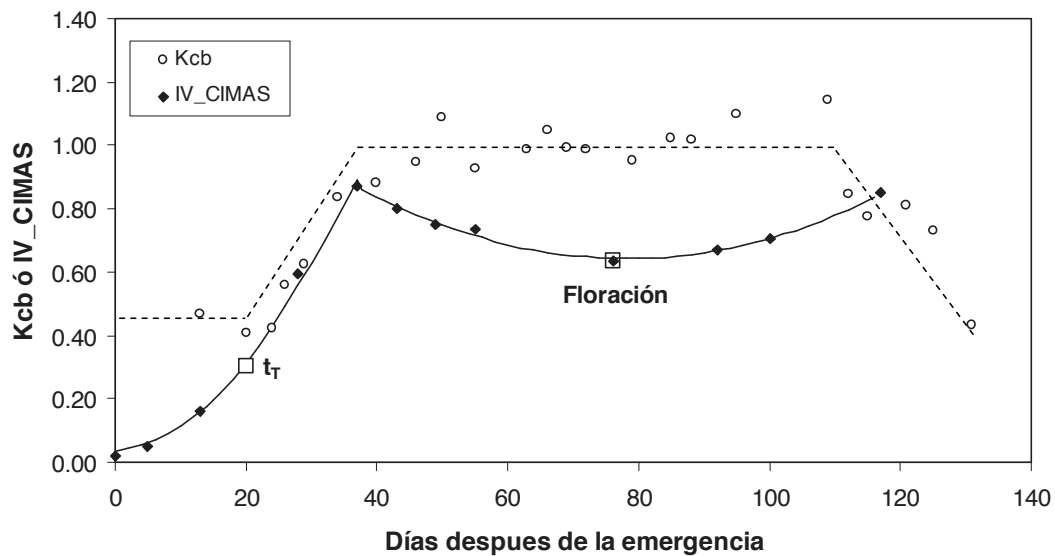
**Cuadro 4. Días después de emergencia para las etapas de desarrollo del sorgo.**

Etapa	Variable	FAO-56	FAO-56	IV_CIMAS
		Cobertura	Floración	
Inicial	DDE	0-15	0-15	0-20
	Kcb	0.45	0.45	0.45
Media	DDE	47-110	76-110	38-110
	Kcb	0.98	0.99	0.99
Final	DDE	110-131	110-131	110-131
	Kcb	0.42	0.42	0.42

La Figura 5 muestra los Kcb medidos por lisimetría y el de los métodos de FAO-56 – cobertura y FAO-56 – floración, usando los valores del Cuadro 4. En la Figura 6 se muestra esta información para el método del IV\_CIMAS.



**Figura 5. Kcb estimado por los métodos FAO-56 de cobertura y floración comparados con el Kcb medido por lisimetría.**



**Figura 6. Kcb estimado por el método del IV\_CIMAS, comparado con el Kcb medido por lisimetría.**

Mediante el uso de los Kcb de la etapa del desarrollo vegetativo, se analizaron los errores de las estimaciones por los tres métodos ( $K_{cb,método}$ ) en relación a las mediciones del lisímetro ( $K_{cb,lisímetro}$ ) de acuerdo a la relación:

$$K_{cb,método} = a + bK_{cb,lisímetro} \quad (16)$$

Otras medidas de error utilizadas fueron la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el error relativo medio (ERM). El Cuadro 5 muestra los resultados obtenidos de los análisis, donde el método del IV\_CIMAS presenta la mejor correlación, mientras que el método de FAO-56 – Floración la más baja, tal como se puede apreciar en las Figuras 5 y 6.

**Cuadro 5. Errores de estimación de Kcb de los tres métodos.**

Método	a	b	R <sup>2</sup>	RECM	ERM (%)
FAO-56 - Cobertura	0.203	0.744	0.912	0.082	10.2
FAO-56 - Floración	0.188	0.655	0.789	0.148	24.1
IV_CIMAS	0.123	0.883	0.938	0.017	8.6

### CONCLUSIONES

La modelación temporal de las variables biofísicas y espectrales (IAF,  $f_v$  y IV\_CIMAS) de los tres cultivos analizados, utilizando los modelos expo-lineales truncado (ELT) y asimétrico (ELA) presentaron buenos ajustes estadísticos. Las estimaciones de  $t_T$  usando el IV\_CIMAS y el IAF presentaron valores cercanos, lo cual refleja el diseño del índice de vegetación para tener una relación lineal con el IAF. En cambio, la  $f_v$  presenta valores diferentes ya que no considera al follaje en términos tridimensionales, por lo que en términos de Kcb, presenta limitaciones en la estimación de la evapotranspiración al ser una medida limitada de la cantidad de estomas. El IV\_CIMAS a diferencia de la  $f_v$  e IAF representa mejor la cantidad y calidad del follaje en un píxel o parcela, debido a su diseño que es función del IAF, de su distribución espacial ( $f_v$  y K), de las propiedades ópticas de las hojas ( $\omega$ ) y del suelo de fondo de la vegetación.

Respecto a los modelos expo-lineales, los errores de los ajustes (RECM) muestran que el modelo ELA no mejora substancialmente la estimación de los parámetros, por tanto el modelo ELT resulta una mejor opción pues no requiere del valor máximo de la variable biofísica o espectral de interés.

De cara al uso de la tecnología de los sensores remotos para estimar la evapotranspiración de cultivos usando la metodología FAO-56, el método IV\_CIMAS para evaluar el inicio y final de la etapa de desarrollo del sorgo presentó el mejor coeficiente de determinación (0.93), así

como los menores valores de error (RECM y ERM), seguido por el método FAO-56 – Cobertura. El método FAO-56 – Floración presentó la correlación más baja de los 3 métodos, lo cual demuestra que en el caso de cultivos de densidad foliar alta, el uso de variables como la  $f_v$  o el IAF son de difícil aplicación, ya que estos cultivos alcanzan rápidamente los valores críticos.

### LITERATURA CITADA

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 298 p.
- Ball, R.A., L.C. Purcell, and E.D. Vories. 2000. Optimizing soybean plant population for a short-season production system in the Southern USA. *Crop Science* 40: 757-764.
- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environ.* 46: 213-222.
- Bausch W.C. 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.*, 27, 55-68.
- Bausch, W.C. and C.M.U. Neale, 1987, Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept, *Trans. ASAE*, 30: 703-709
- Bausch, W.C. and C.M.U. Neale, 1989, Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling, *Trans. ASAE*, 46: 1901-1908.
- Bonhomme, R., and C. Varlet-Grancher. 1977. Application aus couverts vegetaux de lois rayonnement en milieu diffusant I Etablissement des lois et verifications experimentales. *Annales Agronomie* 28: 567-582.
- Calera, A., C. Martínez, and J. Meliá, 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *Int. J. Remote Sensing*, 22, 3357-3362.

- Calera, A., A.M. Jochum, A. Cuesta, A. Montoro, and P.L. Fuster. 2005. Irrigation management from space: towards user-friendly products. *Irr. Drain. Systems*, 19: 337-353
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO. Rome, Italy. 193 p.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, Vol. 24, FAO, Rome. 179 p.
- Ferrandino, F.J. 1989. Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield. *Agric. Forest Meteorol.* 47: 273-289.
- Gilabert, M.A., J. González-Piqueras, F.J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environ.* 82:303-310.
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology. A simulation study. Simulation Monographs. PUDOC. Wageningen, The Netherlands 259 p.
- Goudriaan, J. 1994. Using the exponential growth equation to analyze resource capture. *In*: J.L. Monteith, R.K. Scott, and M.H. Unsworth (Eds.). *Resource Capture by Crops*. Nottingham University Press. Nottingham. pp. 99-110
- Goudriaan, J., and J.L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Annals of Botany* 66: 695-701.
- Goudriaan, J., and H.H. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 238 p.
- Heilman, J.L., W.E. Heilman and D.G. Moore. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance, *Agronomy Journal*, 74: 967-971.



- 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.
- Jackson, R.D., P.J. Pinter, R.J. Reginato, and S. B. Idso. 1980. Hand-held radiometry. A set of notes developed for use at the workshop on hand-held radiometry. Phoenix, Arizona, February 25-26. US Department of Agriculture. *Agricultural Reviews and Manuals*. 66 p.
- López-Urrea, R. Martín de Santa Olalla, F. Fabeiro, and C. Moratalla. 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Manage.* 85: 15-26.
- López-Urrea, R., A. Montoro, P. López-Fuster, and E. Fereres. 2009. Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli. *Agricultural Water Manage.* 96: 1155-1161.
- McCoy, R. M. 2005. *Fields methods in remote sensing*. The Guilford Press New York London. 159 p.
- Milton, E. J. 1987. Principles of field spectroscopy. *Int. J. Remote Sensing* 8:12, 1807-1827
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L.A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia*, 39:293-301.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41: 539-554
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43(3):291-307.
- Ross, J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. W. Junk, Norwell, MA. 391 p.

- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, MASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp: 1-371.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograph.Rev.*, 38: 55-94.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographics infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environ.* 8: 127-150.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE transactions in Geoscience and Remote Sensing* 34: 1254-1265.
- Wright, J.L., 1982, New evapotranspiration crop coefficients, *J. Irrig. and Drain.*, 108: 57-74
- Yin, X., J. Goudriaan, E.A. Latinga, J. Vos, and H.J. Spiertz. 2003. A flexible sigmoid function of deterministic growth. *Annals of Botany.* 91: 361-371.
- Yoshioka, H., T. Miura, A.R. Huete, and B.D Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. *Remote Sensing of Environ.* 74:313-326.

## **CAPITULO III**

### **ASISTENCIA SATELITAL EN RIEGO USANDO EL METODO DUAL DE FAO-56: ALCANCES Y LIMITACIONES**

## **ASISTENCIA SATELITAL EN RIEGO USANDO EL MÉTODO DUAL DE FAO-56:**

### **ALCANCES Y LIMITACIONES**

## **IRRIGATION SATELLITAL ASISTANCE USING FAO-56 APPROACH: SCOPE AND LIMITATIONS**

### **RESUMEN**

Se analizaron los alcances y limitaciones del uso de índices de vegetación (IV) para estimar el coeficiente de cultivo basal (Kcb) usando el método FAO-56 en un contexto operacional de la programación de riegos. Con este fin, se hicieron medidas espectrales y de evapotranspiración en un lisímetro, además se midieron las variables índice de área foliar (IAF), fracción de cobertura (fv), biomasa seca (Bm) y altura (h) para los cultivos de maíz y trigo. Se estimaron las pendientes ( $b_0$ ) de las líneas de igual vegetación (iso-IAF) directamente de los datos espectrales para evitar el efecto del suelo, calculando el IV\_CIMAS que representa de forma completa todo el ciclo de crecimiento de los cultivos. Se obtuvieron relaciones lineales diferentes entre el IV\_CIMAS y Kcb para las etapas vegetativa y de senescencia del cultivo, por lo que no se puede usar una relación única para todo el ciclo de crecimiento. Las relaciones entre IV\_CIMAS y la fv ó el IAF fueron similares a las de Kcb, por tanto la parametrización de Kcb en función de estas variables es equivalente a la del IV\_CIMAS. Sin embargo, el uso de una variable (IAF ó fv) en forma independiente, genera soluciones múltiples a la definición del inicio y final de las etapas del Kc de acuerdo a FAO-56. Para evitar esto, se hizo una estimación directa del inicio y final de la etapa vegetativa usando los patrones temporales del IV\_CIMAS mediante un modelo expo-lineal y se definieron a partir de una metodología auto-calibrable los valores de Kcb asociados a la etapa. La relación entre los Kcb estimados con IV\_CIMAS y los medidos con el lisímetro mostró resultados adecuados ( $R^2 = 0.98$  y  $0.968$  para maíz y trigo respectivamente) para usarse en

términos operacionales. Para la etapa vegetativa se obtuvo una relación exponencial entre el IV\_CIMAS y la Bm.

## INTRODUCCIÓN

La asistencia satelital en riego usando productos amigables es una de las tareas actuales de mayor interés en las aplicaciones de la tecnología de los sensores remotos (Calera *et al.*, 2005). La problemática asociada a las estimaciones satelitales de la evapotranspiración actual (ET<sub>c</sub>), para definir los requerimientos de agua de los cultivos, requiere de enfoques pragmáticos fundamentados en teoría y evidencia experimental.

La tecnología de los sensores remotos permite dar seguimiento al crecimiento y desarrollo de la vegetación, a través de relaciones empíricas entre las variables biofísicas de los cultivos y los índices de vegetación espectrales (IV) (Verstraete y Pinty, 1996). La mayoría de los IV están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación (Tucker, 1979). Los índices de vegetación están influenciados por numerosos factores, entre los que destacan los efectos atmosféricos, la geometría sol-sensor y la mezcla suelo-vegetación. En lo particular, el efecto del suelo (fondo de la vegetación) reviste gran importancia para las estimaciones de variables biofísicas y el coeficiente del cultivo. En este sentido se han utilizado diferentes IV que minimizan el efecto del suelo, tales como los índices GESAVI (Gilabert *et al.*, 2002) y NDVI<sub>cp</sub> (Paz *et al.*, 2007), cuyo rango de validez está limitado hasta una primera fase exponencial de los patrones espectrales asociados al crecimiento de la vegetación (curvas iso-IAF). Romero *et al.* (2009) han generalizado el NDVI<sub>cp</sub> para el caso de las fases exponencial y lineal (hasta el IAF máximo) usando el índice IV\_CIMAS.

Tradicionalmente, la estimación de la ET<sub>c</sub> ha sido planteada en términos de una evapotranspiración de referencia (pasto o alfalfa) y un coeficiente del cultivo ( $K_c = ET_c/ET_o$ ) que

multiplica a esta ETo de referencia (Doorenbos y Pruitt, 1977). La evapotranspiración de referencia ha sido estandarizada actualmente en relación a un cultivo virtual con características biofísicas y aerodinámicas definidas (Allen *et al.*, 1998).

Partiendo de que las trayectorias temporales de los IV asemejan los patrones de los coeficientes del cultivo en el tiempo (Jackson *et al.*, 1980), se ha propuesto el uso de los IV para estimar Kc (Heilman *et al.*, 1982). Así, se han propuesto relaciones lineales entre el Kc y diferentes IV (Bausch y Neale, 1987 y 1989; Bausch, 1993 y 1995), para ser usadas en un contexto operacional de programación de riego.

En un contexto general y desde el punto de vista de eficiencia hídrica, es necesario realizar estimaciones del índice de área foliar (IAF), altura (h) y cobertura de la vegetación (fv) para caracterizar el intercambio de masa y energía entre la atmósfera y vegetación, tanto para el uso de modelos de transferencia de dos o más fuentes (Shuttleworth y Wallace, 1985; Choudhury y Monteith, 1988), como para aproximaciones operacionales del balance de energía como el modelo SEBAL o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Bastiaansen *et al.*, 1998) y el METRIC o *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration* (Allen *et al.*, 2005), incluyendo los métodos simplificados propuestos por FAO (Allen *et al.*, 1998).

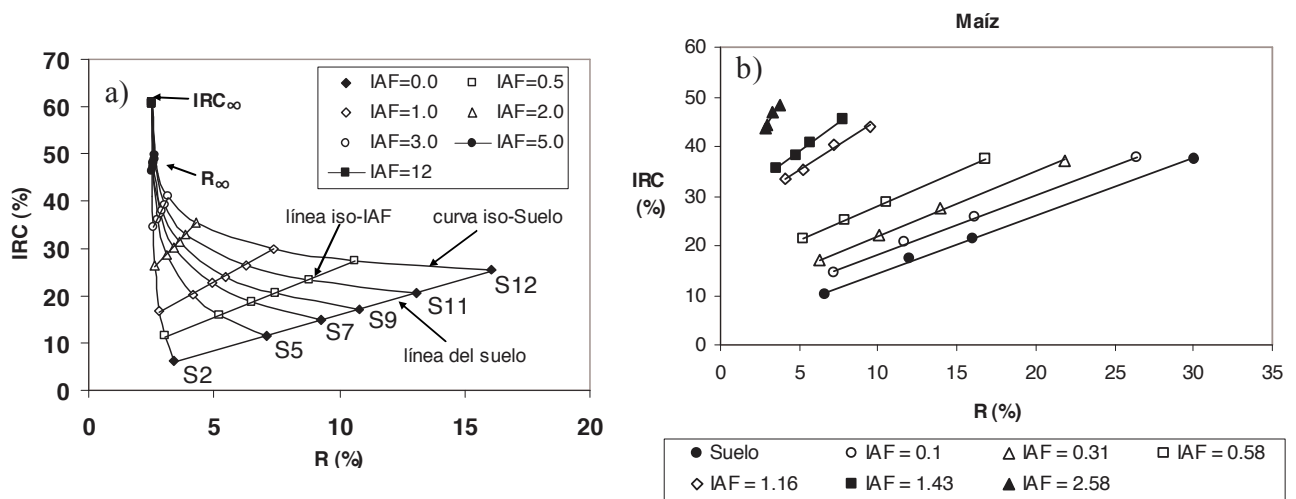
En este trabajo se analizan los alcances y limitaciones de la metodología de usar IV para estimar coeficientes del cultivo y se introduce un esquema operacional para el uso de los IV optimizados en las estimaciones de Kc.

### **Índices de vegetación espectrales, variables biofísicas y kc**

Para analizar los patrones matemáticos asociados a los índices espectrales de la vegetación o IV, es necesario establecer un marco teórico de referencia que nos permita revisar

su congruencia en relación a la teoría de la transferencia radiativa en la vegetación. Este formato de análisis evita el uso de consideraciones empíricas relacionadas al desempeño de los IV.

En la Figura 1a se muestra el patrón temporal de crecimiento de un cultivo, en el espacio espectral R-IRC, representado por curvas de igual índice de área foliar (iso-IAF), misma cantidad de vegetación y suelos ópticamente diferentes, la cual se generó usando seis tipos de suelos (S2, S5, S7, S9, S11 y S12; del más oscuro al más claro). Las simulaciones radiativas mostradas en la Figura 1a se detallan en Paz *et al.* (2005). En la Figura 1b, se muestran los resultados de un experimento de maíz donde se usaron bandejas de suelo deslizables debajo del cultivo para simular propiedades ópticas diferentes de suelos (Bausch, 1993).



**Figura 1. Patrones espectrales en el espacio del R-IRC. (a) Simulaciones radiativas y (b) experimento de maíz.**

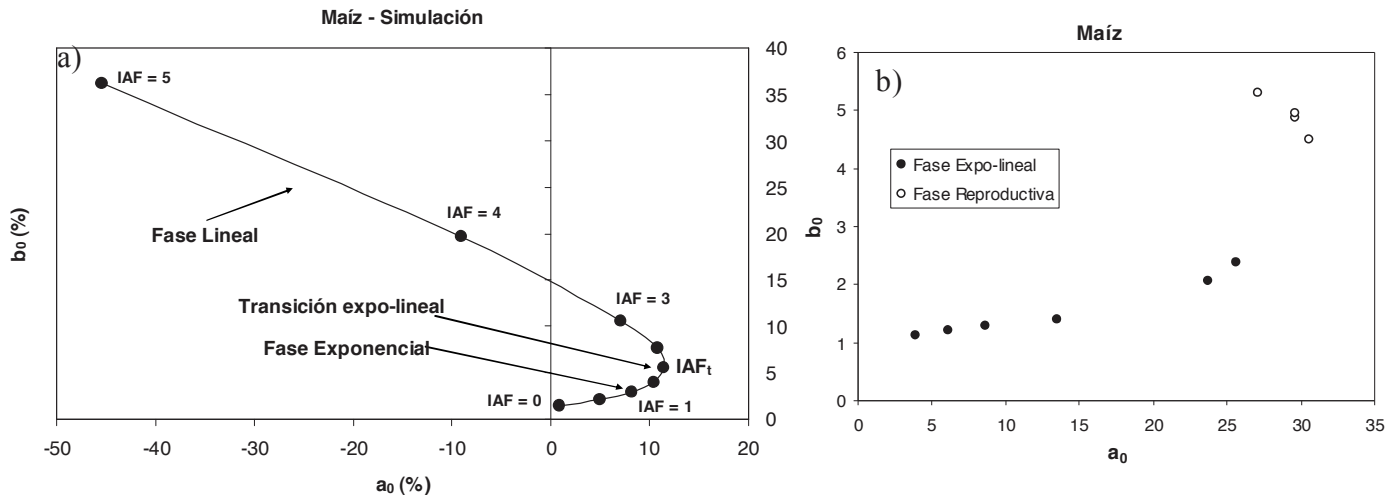
En la Figura 1 se han ajustado líneas rectas (interacciones radiativas de primer orden) a los valores iso-IAF de la reflectancia de la vegetación, donde las reflectancias del suelo varían (línea del suelo). El análisis de la Figura 1 define varios patrones importantes para entender el comportamiento de la reflectancia y de los IV durante el desarrollo de los cultivos: i) si se unen

los valores de igual índice de área foliar (iso-IAF) correspondientes a cada curva de igual suelo (iso-Suelo), se obtiene un patrón casi lineal. Así, el estado de crecimiento de un cultivo (IAF) se refleja en una línea recta, independientemente del tipo de suelo de fondo en el cultivo; ii) la pendiente ( $b_0$ ) e intersección ( $a_0$ ) de las líneas rectas de iso-IAF varían con el valor del IAF. 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); iii) todas las curvas de iso-Suelo 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 la banda del R 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 ( $R_\infty$  o  $IRC_\infty$ ) o de medio denso, es función de las propiedades ópticas de las hojas y de su distribución angular.

En la Figura 2a, caso de las simulaciones radiativas, 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 desnudo hasta la condición de cubrimiento completo del suelo por la vegetación. Se observa también que en la etapa inicial hay un patrón de comportamiento tipo exponencial, hasta un punto donde la banda R aparentemente se satura. Después del punto de saturación aparente 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 de la etapa de crecimiento vegetativo de la vegetación. El



punto final del patrón lineal de la curva  $a_0$ - $b_0$  representa la situación donde la banda del IRC se puede o no saturar, lo cual ocurre cuando el IAF alcanza su valor máximo.



**Figura 2. Patrones de los parámetros  $a_0$  y  $b_0$  de las líneas iso-IAF. (a) Simulaciones radiativas y (b) experimento con maíz.**

En la Figura 2b, para datos experimentales del maíz, se observa que el patrón entre  $a_0$  y  $b_0$  es similar al caso de las simulaciones radiativas, pero con diferencias importantes en función de las fases del crecimiento de los cultivos.

En el caso de las simulaciones radiativas, la aproximación de medio turbio (Ross, 1981) supone un cubrimiento homogéneo y completo del suelo por la vegetación, además de que se usó la hipótesis de que las propiedades ópticas y geométricas de las hojas no cambian durante el crecimiento (incremento en el IAF) del cultivo. Bajo estas consideraciones, el patrón temporal del IAF puede modelarse con una función expo-lineal que suaviza la transición de la fase exponencial a la lineal (Goudriaan and Monteith, 1990), Figura 3a. La Figura 2a muestra que en este caso la fase expo-lineal tiene un patrón similar en el espacio  $a_0$ - $b_0$ . El modelo expo-lineal está definido como:

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

donde  $V$  es el crecimiento de la vegetación (Bm, IAF, fv, h);  $r$  es una tasa relativa de crecimiento;  $C$  es la tasa máxima de crecimiento y  $t_L$  es el tiempo cuando  $V(t)=V(t=0)$  en la fase lineal; es decir, el tiempo en que la fase lineal empieza en forma efectiva. Con las siguientes características:

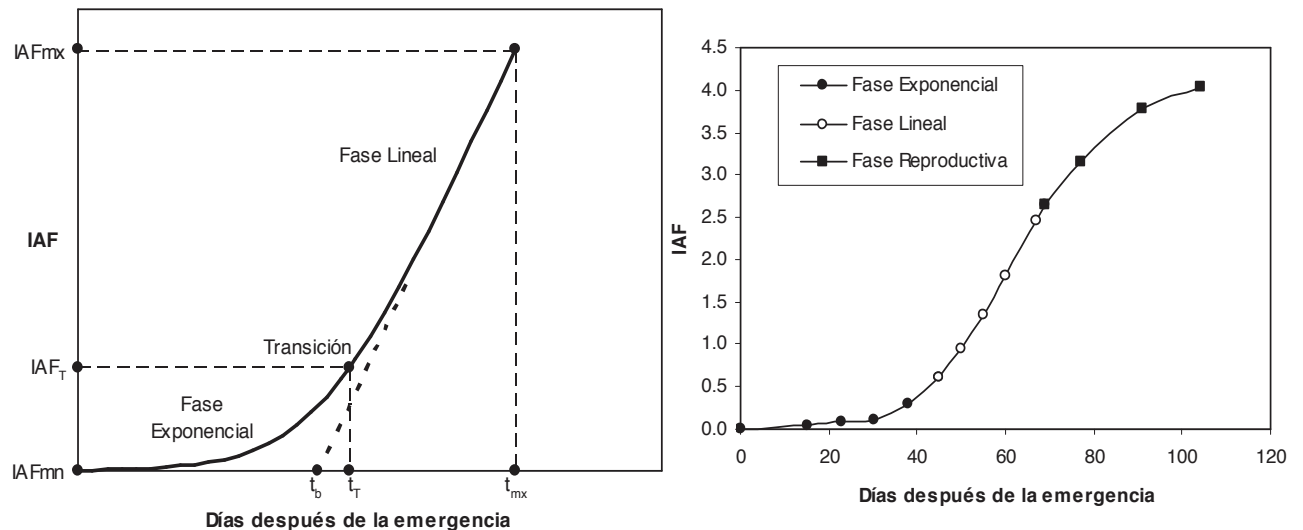
$$\begin{aligned} V(t = t_T) &= \frac{C}{r} \\ t_T &= t_b + \frac{0.541}{r} \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $t_T$  es el tiempo donde la condición  $rV = C$  se cumple.

En el modelo expo-lineal el punto de transición entre la fase exponencial y la lineal ó  $IAF_T$  tiene un tiempo asociado  $t_T$  (Figura 3a), La fase lineal extendida hasta cortar el eje del tiempo, Figura 3a, está definida por el “tiempo perdido” o  $t_b$ . Es el tiempo que se pierde por la etapa exponencial hasta que se alcanza la tasa máxima de crecimiento, la cual se mantiene durante la fase lineal. El tiempo  $t_{mx}$  está asociado al IAF máximo,  $IAF_{mx}$ , de la fase lineal (no es el IAF máximo de toda la etapa vegetativa). El modelo expo-lineal tiene bases biofísicas para el IAF (aproximación de medio homogéneo en términos físicos y de medio turbio en términos radiativos) (Ferrandino, 1989).

Para los datos experimentales del maíz, el patrón lineal del espacio  $a_0$ - $b_0$  de la Figura 2b representa la fase reproductiva, donde las propiedades ópticas de las hojas (mezcla hojas y órganos reproductivos) y/o las geométricas (distribución angular de las hojas y órganos reproductivos) muestran cambios. Así, se observa en la Figura 3b que el patrón temporal del IAF presenta una fase reproductiva después de la fase expo-lineal, antes de alcanzar el IAF máximo ( $IAF_{mx}$ ).

Al analizar las fases de los cultivos en la etapa vegetativa del crecimiento, las diferencias entre los patrones mostrados en la Figura 2 son fundamentales para entender los errores asociados a los modelos radiativos y para el diseño de índices de vegetación generalizados.



**Figura 3. Patrones temporales del IAF. (a) Simulaciones radiativas y (b) Experimento de maíz.**

El problema fundamental del espacio del R-IRC es que induce un cambio de pendiente en la curvatura del patrón entre  $a_0$ - $b_0$ , que muchos IV interpretan como una saturación de las bandas. En realidad no hay tal saturación, sólo es una consecuencia de que los patrones lineales de algunos índices difieren de los valores del segmento, aproximadamente lineal, asociado a  $a_0$ - $b_0$  cuando el IAF es mayor que 2. Esta saturación es consecuencia del formato de razones usado en la mayoría de los IV con patrones lineales en el espacio paramétrico  $a_0$ - $b_0$ .

## Índices espectrales de la vegetación

Uno de los índices espectrales de la vegetación más utilizados es el NDVI, el cual está definido como (Rouse *et al.*, 1974):

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

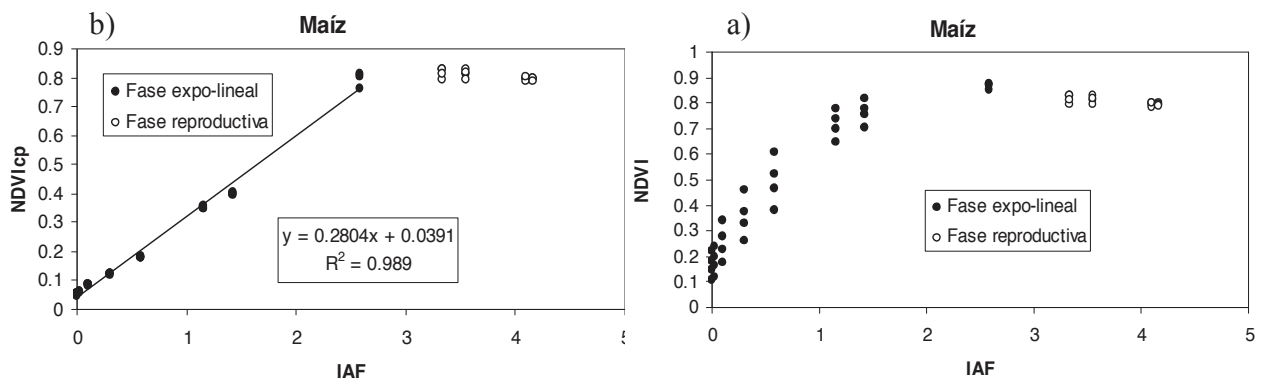
que implica una relación en el espacio  $a_0$ - $b_0$  de  $a_0 = 0$  y  $b_0 = f(NDVI)$  (Paz *et al.*, 2009b); esto es, supone que todas las líneas iso-IAF tienen origen en (0, 0) en el espacio R-IRC. De la Figura 1 y 2, resulta evidente que esta hipótesis es incorrecta, tanto para el caso de las simulaciones radiativas como para los datos experimentales.

Para evitar las hipótesis del NDVI, Paz *et al.*, (2007) diseñaron un IV que toma en cuenta los cambios de la pendiente  $b_0$  en función de  $a_0$ :

$$NDVI_{cp} = \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \quad (4)$$
$$\frac{1}{b_0} = c + da_0$$

donde  $c$  y  $d$  son dos constantes empíricas asociadas al patrón mostrado en la Figura 2b.

La Figura 4 muestra los resultados de aplicar el NDVI y el  $NDVI_{cp}$  al experimento de maíz presentado en la Figura 1b.



**Figura 4. Resultados de aplicar índices espectrales al experimento del maíz. (a) NDVIcp y (b) NDVI.**

Paz *et al.*, (2009b) han revisado la mayoría de los IV publicados en la literatura y han concluido que ninguno aproxima de forma correcta el patrón expo-lineal definido en la Figura 2; incluido el NDVIcp, el cual fue diseñado considerando solo el patrón exponencial y su transición en el espacio  $a_0$ - $b_0$ . Para aproximar en forma completa el patrón expo-lineal entre  $a_0$  y  $b_0$  (Figura 2), Romero *et al.* (2009) usaron una transformación de los espacios espectrales para el diseño del IV\_CIMAS, el cual fue planteado para aproximar el patrón lineal hasta la transición al exponencial (lo contrario al NDVIcp). Bajo esta perspectiva, el IV\_CIMAS está definido en un formato similar al NDVIcp (en función de las pendientes  $b_0$ ; ecuación 2), donde se tiene  $IV\_CIMAS = NDVIcp$  cuando el valor de  $b_0$  está debajo de un umbral dado e  $IV\_CIMAS$  se obtiene del espacio espectral transformado cuando  $b_0$  está arriba del umbral (Romero *et al.*, 2009).

### Índices espectrales de la vegetación y $K_c$

La estimación de la evapotranspiración actual del cultivo ha sido propuesta en función del coeficiente del cultivo  $K_c$  promedio (Doorenbos and Pruitt, 1977) y de la evapotranspiración de referencia  $ETo$ :

$$ETc = Kc \cdot ET_o \quad (5)$$

La relación (5) se refiere a condiciones promedio, por lo que Wright (1982) propuso el método dual de estimación de Kc:

$$Kc = Kcb + Ke \quad (6)$$

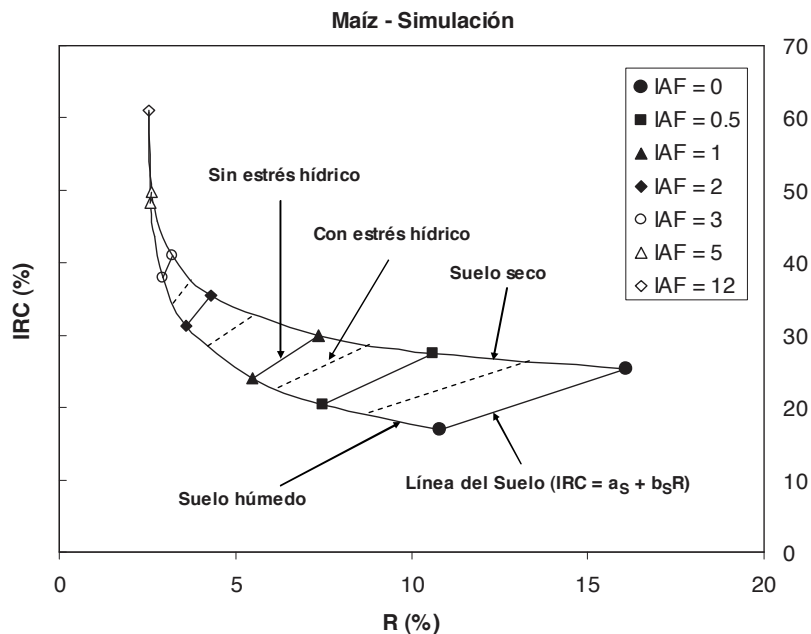
donde Kcb es el coeficiente del cultivo de base sin estrés y Ke es el coeficiente asociado a la evaporación del suelo.

En el caso de cultivos sujetos a estrés hídrico, el coeficiente del cultivo de base ajustado,  $Kcb_{ajustado}$ , está dado por:

$$Kcb_{ajustado} = Kcb \cdot Ks \quad (7)$$

El método dual, y su ajuste por estrés hídrico, forman parte de la metodología actual propuesta por la FAO (Allen *et al.*, 1998), que usa un cultivo de referencia virtual, y es la base de las aproximaciones a la estimación de ETc usando el coeficiente del cultivo.

Para entender las limitaciones de las relaciones entre los diferentes IV y el Kc (Kcb, Ke y Ks), la Figura 5 muestra el caso de las simulaciones radiativas del maíz para la condición de un suelo seco y uno húmedo, del cultivo con y sin estrés hídrico.



**Figura 5. Simulaciones radiativas del cultivo de maíz bajo dos condiciones de humedad del suelo y de estrés hídrico.**

La humedad del suelo ( $K_e$ ) se manifiesta en curvas iso-Suelo diferentes, donde se observa que en suelos más húmedos, el R e IRC disminuyen sus valores, mientras que el estrés hídrico ( $K_s$ ) se visualiza como una menor pendiente en las curvas iso-IAF. Ahora bien, considerando que la mayoría de los IV tratan de aproximar la pendiente ó la intersección de las líneas iso-IAF (Paz et al., 2009a), es claro de la Figura 5 que un IV “perfecto”, en el sentido de obtener una estimación directa y precisa de la pendiente, no puede diferenciar entre  $K_{cb}$  y  $K_e$  (ó  $K_c$ ), puesto que la pendiente  $b_0$  ó bien la intersección  $a_0$  de las líneas iso-IAF no contiene información del contenido de humedad del suelo. Así, el uso de un IV que aproxima  $b_0$  ó  $a_0$ , genera relaciones similares para  $K_{cb}$  y  $K_c$  ( $K_{cb} + K_e$ ). Esto impone restricciones en el uso de los IV para estimar el estado de la humedad del suelo, por lo que es necesario usar las líneas iso-Suelo para este fin (Paz et al., 2009a).

### Medios radiativos equivalentes

En una parcela de cultivo, el IAF estimado experimentalmente representa un IAF global:

$$IAF_G = \left( \frac{\text{área foliar promedio}}{\text{planta}} \right) \left( \frac{\text{número de plantas}}{\text{m}^2 \text{ de la parcela}} \right) \quad (8)$$

Sin considerar efectos de borde, el IAF de plantas individuales ó IAF local ( $IAF_l$ ), está relacionado con el IAF global como:

$$IAF_l = IAF_G f_v \quad (9)$$

donde  $f_v$  es la fracción de vegetación y esta dado en proporción de 0 a 1. Así, la fracción de cobertura del suelo es  $f_s = 1 - f_v$ .

En la Figura 6 se muestra el  $IAF_l$ , donde la fracción de huecos ( $f_h$ ) dentro del límite del follaje en una proyección horizontal, estará dado por la Ley de Beer-Lambert, para hojas no negras (Goudriaan y van Laar, 1994):

$$\begin{aligned} f_h &= 1 - T_l \\ T_l &= \exp\left\{(1 - \omega)^{1/2} KxIAF_l\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

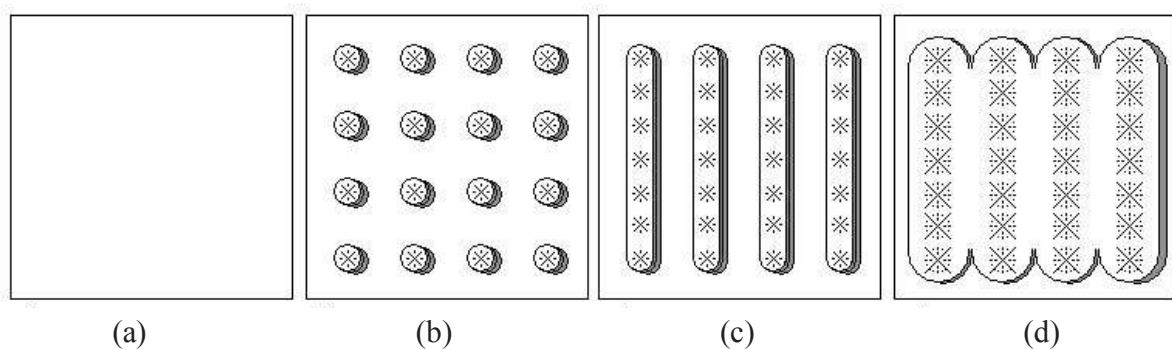
donde  $T_l$  es la transmitancia local de la radianza directa solar,  $\omega = \rho + \tau$  es el albedo foliar, suma de la reflectancia y transmitancia foliar respectivamente y  $K$  es un coeficiente de extinción total. Cabe hacer notar que  $f_v \neq f_h$ , ya que  $f_v$  se refiere a la fracción de vegetación fuera de los límites de las plantas individuales aunque en la practica (fotografías digitales)  $f_v$  incorpora a  $f_h$ .





**Figura 6. Área foliar y huecos para un medio local o planta individual.**

En la Figura 7 se muestra el caso de un cultivo sembrado en surcos, donde al principio de la etapa de crecimiento se observa un patrón de plantas individuales, donde las plantas no se tocan entre sí. Al avanzar el crecimiento, las plantas en un mismo surco se tocan entre sí y forman un cultivo en hileras o surcos. Cuando las plantas de diferentes surcos se solapan, se presenta una situación de cobertura total del suelo. Esta dinámica de crecimiento requiere de una estrategia genérica de modelación que tome en cuenta, razonablemente, la complejidad geométrica de los cultivos en parcelas y la vegetación natural.



**Figura 7. Geometría de un cultivo sembrado en surcos. (a) suelo desnudo; (b) plantas individuales sin traslape; (c) plantas traslapadas en surcos; (d) vegetación densa traslapada.**

De acuerdo a lo anterior, un medio equivalente en términos físicos es aquel que cumple:

$$IAF_G = \frac{IAF_l}{fv} \quad (11)$$

Es decir, para una medición de  $IAF_G$  hay un número infinito de combinaciones equivalentes de  $IAF_l$  y  $fv$  que satisfacen la relación (11).

Aunque un medio radiativo equivalente contiene la misma cantidad de fitoelementos, las reflectancias pueden ser diferentes dependiendo de la cantidad de suelo expuesto y su condición de humedad. Así, los IV estimados y su relación a  $fv$  e  $IAF_G$  es dependiente de la configuración geométrica del elemento suelo y vegetación en una parcela, así como de las propiedades ópticas asociadas.

La discusión de medios radiativos equivalente, representados por la relación (11), es importante para entender las limitaciones del uso de  $fv$  o  $IAF_G$  para estimar en forma indirecta  $K_c$  (ó  $K_{cb}$ ), tal como se propone en FAO-56 (Allen *et al.*, 1998). En este método se usa un valor de  $fv = 10\%$  para definir el inicio de la etapa vegetativa del crecimiento, cuyo final está dado por un  $fv$  de 70-80% ó un  $IAF$  de 2 ó 3 (Allen *et al.*, 1998). De acuerdo a la relación (11), es necesario definir un  $IAF_l$  ( $fv$  e  $IAF_G$ ), para poder asociar en forma única la geometría y cantidad de vegetación (estomas) en una parcela, ya que la definición de un solo valor,  $fv$  ó  $IAF_G$ , no es suficiente para caracterizar el medio. Este problema se manifiesta en la definición de la etapa de “cobertura efectiva” del cultivo (fin de la etapa vegetativa), donde el hecho de asociar valores fijos de  $fv$  o  $IAF_G$  (Allen *et al.*, 1998) implica que se tiene un cultivo estandarizado en relación a su geometría de siembra y no se capta la arquitectura y la distribución geométrica de las plantas en una parcela. En consecuencia, es posible encontrar que la etapa de cobertura efectiva se puede presentar con valores de  $fv$  ó  $IAF_G$  que pueden diferir substancialmente de los recomendados por FAO-56 (Allen *et al.*, 1998).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron dos cultivos con densidad media de follaje, maíz (*Zea mays* L.) var. Dracma 700 (Calera *et al.*, 2004; González-Piqueras *et al.*, 2004) y trigo (*Triticum aestivum* L.) var. Estero (López-Urrea *et al.*, 2009a). Se midieron las variables IAF, fv, Bm (biomasa) y h; además de medidas espectrales y evapotranspiración del cultivo en un lisímetro de pesada.

Los experimentos se realizaron en el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, España (39° 14' N, 2° 5' O, 695 msnm) en los años 2001 y 2003 para maíz y trigo, respectivamente. El clima es continental semi-árido, con una precipitación anual promedio de 320 mm concentrada en primavera y otoño. Las temperaturas media, máxima y mínima son 13.7, 24.0 y 4.5 °C respectivamente (López-Urrea *et al.*, 2006a y 2009a). El suelo fue clasificado como Petrocalcic Calcixerepts (Soil Survey Staff, 2006). La profundidad media es de 40 cm limitado por un horizonte petrocálcico que se encuentra más o menos fragmentado. La textura es franco-arcillo-limosa, con un 13.42 % de arena, un 48.89 % de limo y un 37.69 % de arcilla, el pH es básico. El suelo es pobre en materia orgánica y en nitrógeno total, con un alto contenido en caliza activa y potasio. El contenido de agua a capacidad de campo (CC) fue 0.34 y en punto de marchitez permanente (PMP) 0.21 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. En el caso del trigo, la humedad aprovechable (HA) estimada para una zona de raíces de 35 cm fue 45.5 mm y para la calendarización del riego se utilizó un nivel de agotamiento permisible de 0.55 recomendado por Allen *et al.* (1998) para trigo para valores de ETc de 5 mm d<sup>-1</sup>.

Los cultivos crecieron en condiciones óptimas, sin restricciones de agua y nutrientes. El trigo se fertilizó después de la siembra con 28 Kg ha<sup>-1</sup> de N, 112 Kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 70 Kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O; en la etapa vegetativa se aplicó fertilizante líquido (170 Kg ha<sup>-1</sup> de N). El sistema de riego de la parcela es por aspersión mediante cobertura total enterrada. Se hizo lo posible para que el

cultivo del lisímetro mantuviera la misma tasa de crecimiento y densidad de plantas que la parcela de protección.

Para determinar la evapotranspiración del cultivo, se utilizó un lisímetro de pesada con registro continuo de datos que se encuentra en el centro de una parcela de 100 x 100 m (López-Urrea *et al.*, 2006a). El lisímetro mide 2.7 m de largo, 2.3 m de ancho y 1.7 m de profundidad, con una masa total de 14.5 Mg. La celda de carga tiene una resolución de 0.25 Kg que equivale a 0.04 mm de agua. La medida de evapotranspiración se estimó a partir de los datos de peso del lisímetro. Se trabajó con los datos horarios para obtener el dato diario de agua evaporada. Cuando no se pudo obtener el valor diario, por diferentes motivos (lluvia, riego, corte del césped) se hizo un promedio entre el valor anterior y siguiente a ese día. Otras fuentes de error que condujeron a la eliminación de datos fueron: la verificación del peso, calibraciones por pérdida de contacto en la celda de carga, baja de voltaje en el sistema, pérdida de contacto del cable a tierra y falla en el controlador de dato (López-Urrea *et al.*, 2006a).

La ETo se calculó mediante la ecuación FAO-56 de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), que ha tenido mejores resultados para la zona en estudios previos (López-Urrea *et al.*, 2006a,b). Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica situada en la finca experimental. Los datos faltantes de radiación neta, velocidad del viento y humedad relativa se estimaron usando el dato previo. El paso de integración fue de una hora y a partir de estos datos se obtuvo el dato diario.

Las medidas espectrales se hicieron con un radiómetro GER 3700 (Spectra Vista Corporation, NY, USA) que tiene un intervalo espectral de 300 a 2500 nm, con una resolución espectral máxima de 1.5 nm. La altura de observación de la cubierta en el caso de trigo fue 1.80 m y en el maíz 5 m que permite un diámetro de observación de 21 y 58 cm respectivamente, para un campo de visión (FOV) de 6.6°.

Se hizo un seguimiento periódico de cada cultivo (entre 7 y 10 días). En maíz se midió un transecto de seis puntos dentro y fuera del lisímetro para asegurar su representatividad respecto a la parcela, mientras que en trigo se hizo un barrido de 5 medidas sobre el lisímetro. Las medidas se hicieron en horario de máxima elevación solar y en días claros (sin nubes), manteniendo la observación a nadir (Milton, 1987). Se tomó la reflectancia de un panel de referencia Spectralon (Labsphere<sup>MR</sup>) antes de cada medida de la superficie para evitar que la configuración de iluminación variara (McCoy, 2005).

Se registró la fenología de cada cultivo. En el Cuadro 1 se detallan las fases de desarrollo.

**Cuadro 1. Fenología de maíz y trigo.**

MAIZ 2001		TRIGO 2003	
Día jul.	Fenología	Día jul.	Fenología
104	Siembra	41	Siembra
116	Emergencia	56	Emergencia
164	V5	71	Dos hojas
171	V6	77	Tres hojas
178	V7	84	Inicio ahijado
185	V9	92	Ahijamiento
193	V11	114	Enderezamiento-un nudo
201	V14	120	Dos nudos
207	Flor masculina	134	Emergencia espiga
213	Fecundación	141	Espiga libre
219	Fecundación	148	Madurez lechosa
225	Lechoso	153	Madurez pastosa
241	Lechoso-pastoso	163	Sobre maduración
249	Pastoso	171	Grano duro
256	Vítreo		
263	Vítreo		
272	Vítreo		
277	Maduración fisiológica		

La fracción de cobertura  $f_v$  se estimó mediante la técnica de clasificación supervisada (máxima probabilidad) de fotografías digitales de la cubierta tomadas a nadir. La clasificación se hizo con el programa ENVI<sup>MR</sup> distinguiendo entre vegetación verde y suelo.

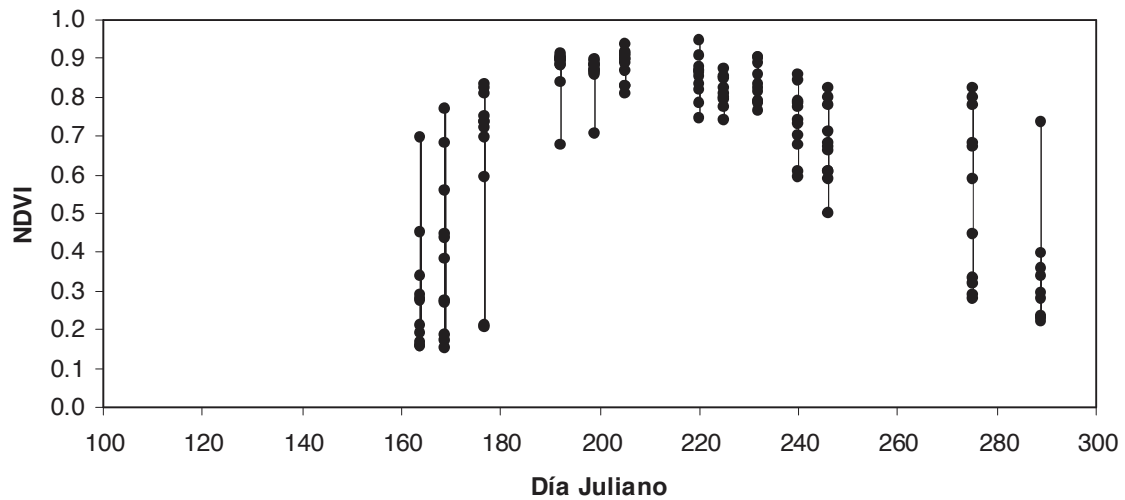
Para calcular el índice de área foliar IAF, se recogió una muestra de  $1 \text{ m}^2$  de la parcela de protección y se midió una cara de las hojas con un equipo LI-COR<sup>MR</sup> LAI 3000.

De acuerdo a las recomendaciones de FAO, se midió la altura del cultivo para adaptar los valores del coeficiente de cultivo  $K_c$  a lo largo del ciclo de crecimiento. La altura del cultivo se midió desde la base hasta el elemento más alto de la planta, seleccionando de forma aleatoria las plantas dentro de la parcela de protección.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La estimación de  $K_c$  ( $K_{cb} + K_e$ ) ó  $K_{cb}$  (que en términos de los IV no se pueden distinguir) a nivel de predio o parcela agrícola requiere que el efecto del suelo, que puede interpretarse como humedad, sea minimizado. En la perspectiva de un esquema de riego de precisión, es importante conocer la variabilidad espacial de  $K_c$  para la estimación de  $ET_c$  de manera de lograr un uso eficiente del agua.

La Figura 8 muestra las estimaciones del NDVI para los diferentes días julianos. Para un día en particular, la condición de humedad del suelo en el tiempo de la medición permanece más o menos constante, en consecuencia, las variaciones se pueden atribuir a que este índice no reduce adecuadamente los efectos del suelo y/o a variaciones en la condición del cultivo.

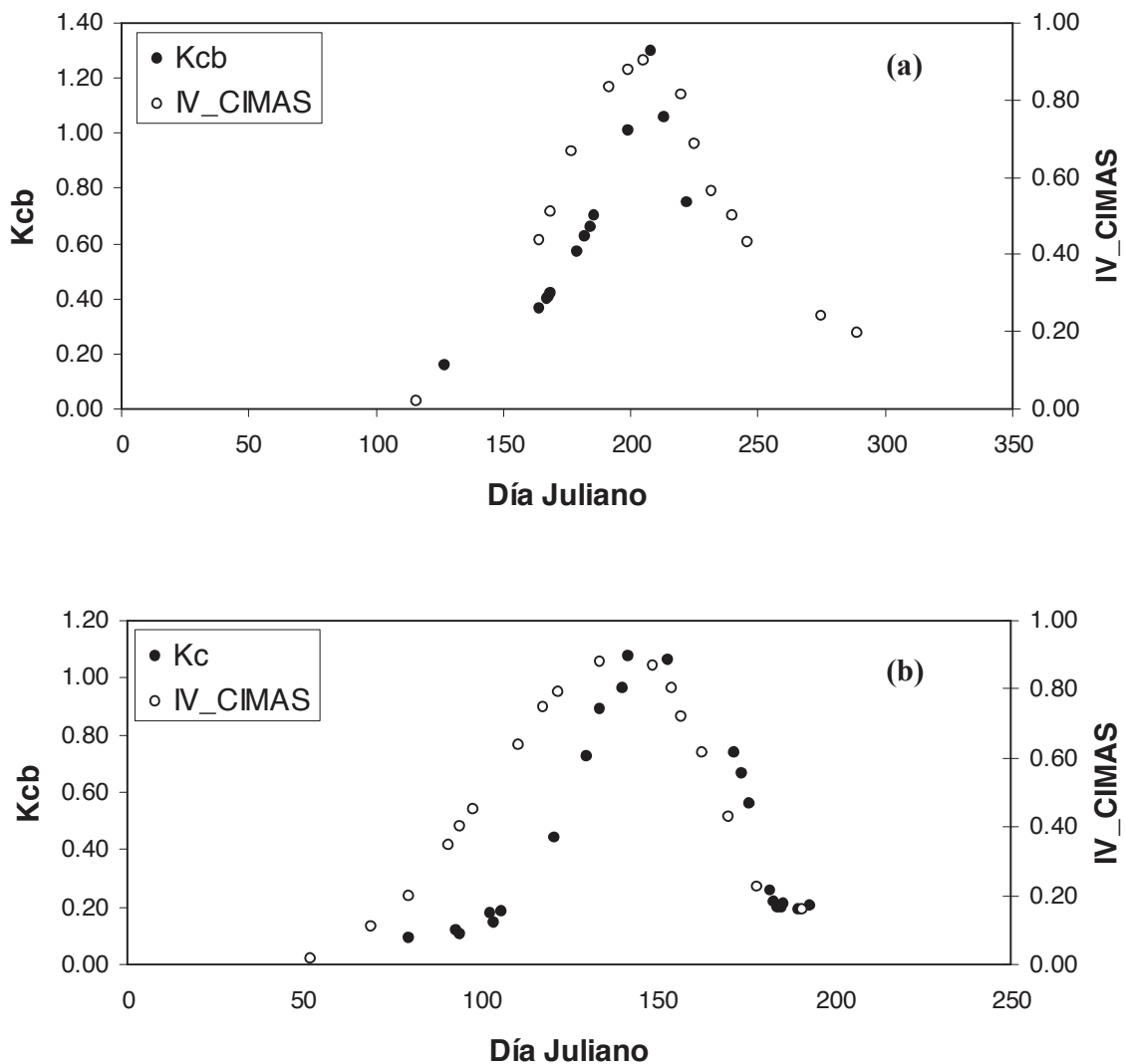


**Figura 8. Variación del NDVI en el tiempo de las mediciones en el lisímetro para el maíz.**

Las mayores variaciones al inicio y final del ciclo del crecimiento del maíz, mostradas en la Figura 8, reflejan la condición de vegetación con baja cobertura del suelo, por lo que el efecto de este último predomina.

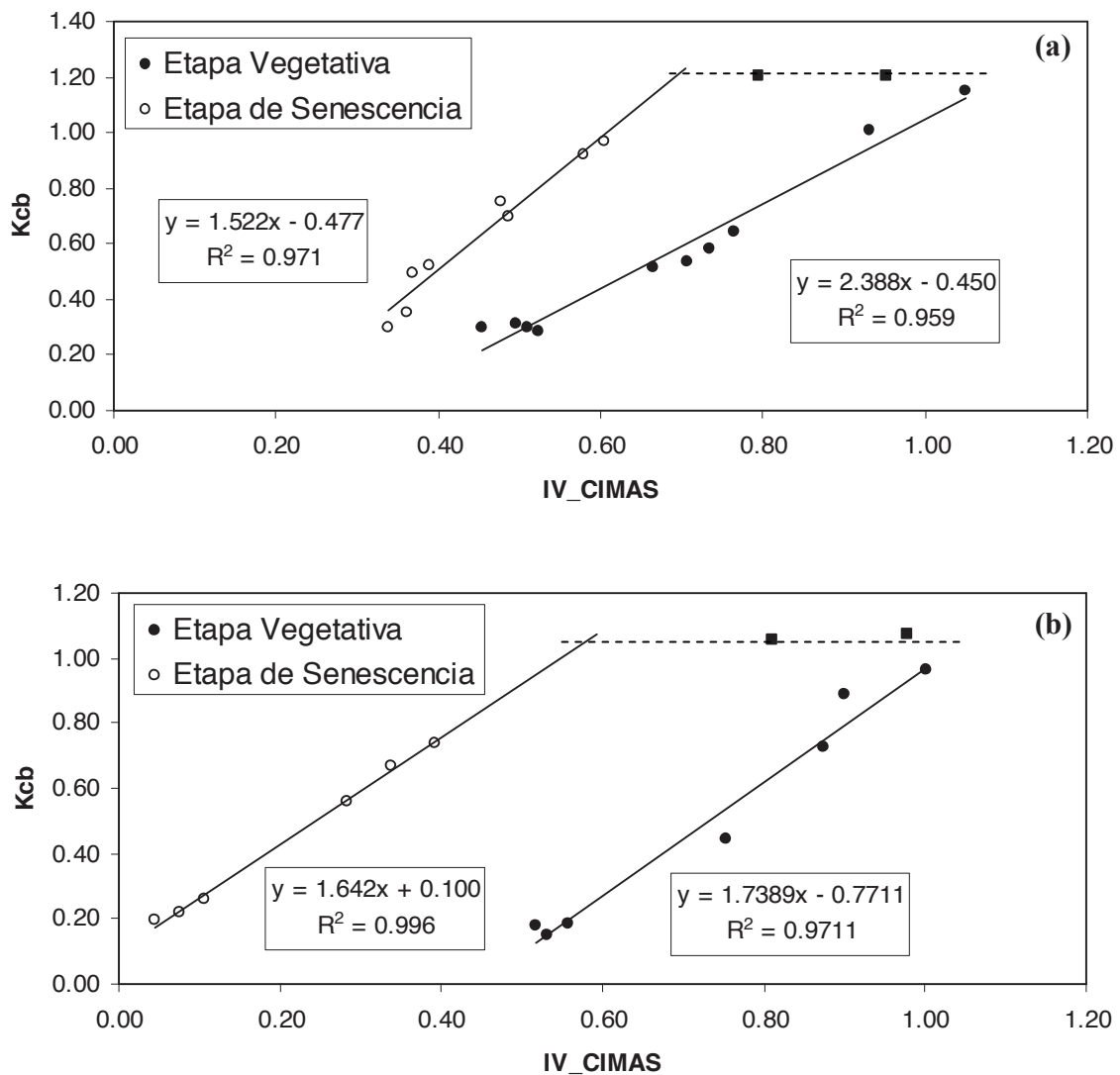
Para evitar el problema de aproximar las pendientes de las líneas iso-IAF en el espacio del R-IRC, éstas fueron estimadas directamente de los datos espectrales (sin efecto del suelo). Con las pendientes  $b_0$  estimadas para cada día juliano del ciclo de crecimiento del maíz y trigo, se estimó el IV\_CIMAS, el cual representa en forma completa todo el ciclo. Asimismo, se revisaron las mediciones de  $K_c$  en el lisímetro y se seleccionaron los valores más bajos como valores de  $K_{cb}$ . La Figura 9 muestra los patrones temporales de  $K_{cb}$  e IV\_CIMAS para el cultivo de maíz y trigo, donde se observa que hay un desfase en tiempo entre el crecimiento biofísico y el asociado a la evapotranspiración actual. El crecimiento está representado por el IV\_CIMAS, debido a la relación lineal que éste índice presenta con la  $f_v$  y el IAF (Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009).





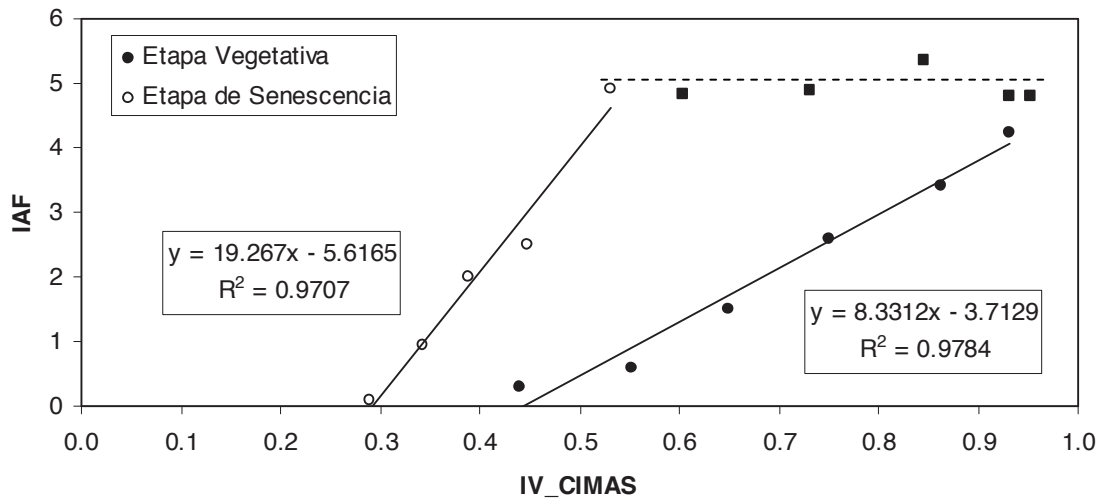
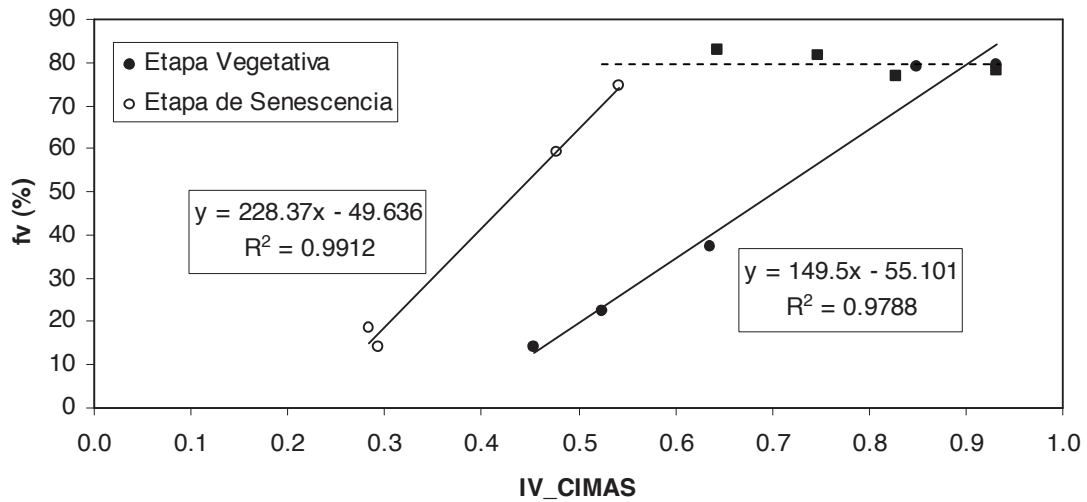
**Figura 9. Patrones temporales de Kcb e IV\_CIMAS: (a) maíz y (b) trigo.**

En la Figura 10 se observan las relaciones lineales entre el IV\_CIMAS y Kcb, donde resulta claro que hay una relación para la etapa vegetativa y otra para la de senescencia, además de una meseta de valores constantes de Kcb entre las dos etapas, representada por cuadrados rellenos. Los parámetros de las relaciones lineales son diferentes para la etapa vegetativa y la de senescencia, por lo que no se puede usar una relación lineal única, como se ha propuesto por diferentes autores (Bausch, 1994; González-Piqueras *et al.*, 2004; López-Urrea *et al.*, 2009).



**Figura 10. Relaciones entre el IV\_CIMAS y el Kcb: (a) maíz y (b) trigo.**

Las relaciones del IV\_CIMAS con la fv y el IAF observadas en la Figura 11 para el cultivo de maíz, son similares a la relación del IV\_CIMAS con el Kcb. Así, la parametrización de Kc ó Kcb en función de la fv ó el IAF es equivalente a la del IV\_CIMAS. Dados los problemas de usar solo fv ó IAF, las relaciones con Kc ó Kcb son localmente dependientes; es decir, los parámetros de las relaciones lineales varían en función de la geometría de siembra de los cultivos.



**Figura 11. Relaciones entre el IV\_CIMAS y fv e IAF.**

De la problemática asociada al uso de fv y IAF en forma separada, se necesita definir el inicio y final (cobertura efectiva) de la etapa vegetativa para parametrizar la relación con el IV\_CIMAS. Dada la relación lineal del IV\_CIMAS con el IAF, se puede utilizar el modelo exponencial (ecuación 1) usando los patrones temporales del IV\_CIMAS para una estimación directa del inicio de la etapa vegetativa en el tiempo  $t_T$  y el final en  $t_{mx}$ . De esta forma, con los valores

del IV\_CIMAS en esos tiempos, se puede definir el Kcb ó Kc asociado a la etapa (con datos de FAO-56 ó medidas de lisimetría) y determinar con el par de puntos los parámetros de la relación lineal. Ahora bien, considerando que en términos del IV\_CIMAS la etapa vegetativa está representada por la fase lineal (con un inicio de la transición exponencial a lineal) y que la relación temporal del Kc ó Kcb tiende a ser no lineal (exponencial, Figura 9), se puede usar una transformación logarítmica-exponencial para hacer equivalentes ambos patrones:

$$f = \frac{\ln(Kcb_{ini}) - \ln(Kcb_{fin})}{IV\_CIMAS_{ini} - IV\_CIMAS_{fin}}$$

$$e = \ln(Kcb_{fin}) - f \cdot IV\_CIMAS_{fin} \quad (13)$$

$$Kcb = \exp(e + f \cdot IV\_CIMAS)$$

En la Figura 12 se puede observar la relación entre los Kcb estimados con la ecuación (13) y los Kcb medidos en el lisímetro para el maíz y el trigo. Como parámetros de la ecuación (13) se han usado los valores medidos en el lisímetro.

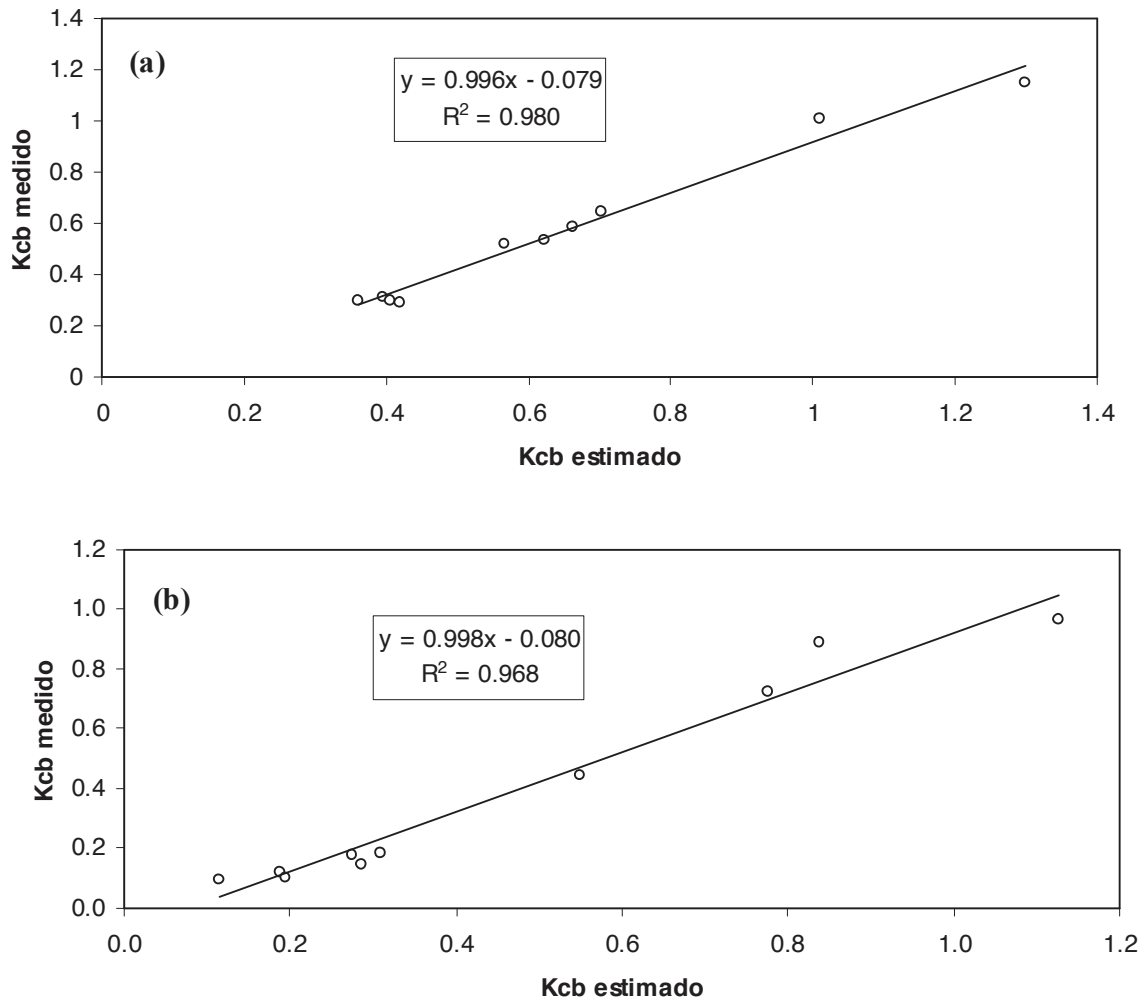
La relación entre los Kcb estimados con la ecuación (13) y los medidos con lisímetro muestra que la auto-calibración del IV\_CIMAS con un par de datos da buenos resultados ( $R^2=0.98$  y  $0.968$  para maíz y trigo respectivamente) y puede usarse en términos operacionales.

La relación entre el IV-CIMAS y Kcb es similar para Kc, por lo tanto, es posible usar los valores de Kc en la relación (13) para obtener valores estimados de Kc en la etapa vegetativa. El valor de inicio (tiempo antes de  $t_T$ ) tiene un valor constante igual a  $Kcb_{ini}$  ó  $Kc_{ini}$ .

Algo similar al caso de la etapa vegetativa puede aplicarse a la etapa de senescencia, definiendo así una metodología de auto-calibración con valores de los cuadros de FAO-56 ó mediciones de campo para definir la relación entre el IV\_CIMAS y Kcb ó Kc.

Una ventaja de la metodología propuesta es que es independiente de efectos atmosféricos, ya que se calibra con las estimaciones locales del IV\_CIMAS y los valores de Kcb ó Kc de inicio y final de una etapa (vegetativa ó senescencia). Bajo la consideración de efectos relativamente

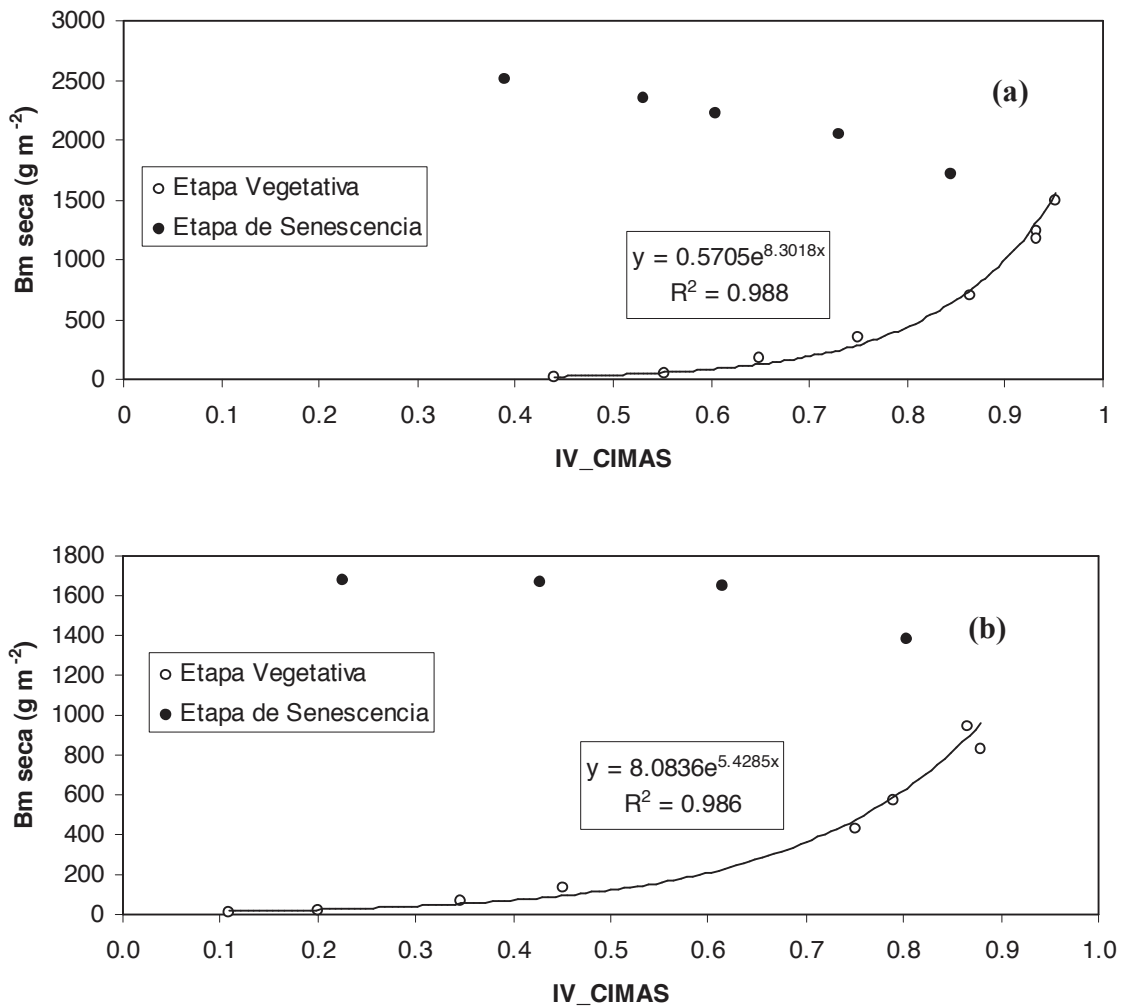
similares en un ciclo de crecimiento, o bien de su minimización, las estimaciones resultan adecuadas para aplicaciones en tiempo casi real, bajo las hipótesis o restricciones asociadas a la metodología FAO-56.



**Figura 12. Relaciones entre el Kcb estimado y medido: (a) maíz y (b) trigo.**

Respecto a la estimación de biomasa seca (Bm), la Figura 13 muestra la relación entre la Bm y el IV\_CIMAS para maíz y trigo, donde la etapa vegetativa (incluyendo la de meseta) del IV\_CIMAS presenta una relación exponencial con la Bm. Algo similar sucede en la etapa de

senescencia. Por tanto, al usar el IV\_CIMAS versus  $\ln(Bm)$  se obtienen dos relaciones lineales que se intersectan en el inicio de la senescencia.



**Figura 13. Relaciones entre el IV\_CIMAS y la Bm seca: (a) maíz y (b) trigo.**

## CONCLUSIONES

Los desarrollos mostrados en este trabajo presentan un panorama de los alcances y limitaciones del uso de índices espectrales de la vegetación (IV) para la estimación de los coeficientes del cultivo ( $K_c$  ó  $K_{cb}$ ) de la metodología FAO-56.

Considerando que los IV tratan de aproximar la pendiente  $b_0$ , o bien la intersección  $a_0$ , de las líneas iso-IAF de los cultivos, se aclaró que la relación entre los IV y  $K_{cb}$  ó  $K_c$  es igual, ya que por definición las líneas iso-IAF no pueden estimar la humedad del suelo. Para esto último se requiere el uso de las líneas iso-Suelo, tal como lo propone Paz *et al.* (2009a).

Bajo la consideración de medios radiativos equivalentes (espacios espectrales), extendibles a medios biofísicos o de balance de energía, el uso de la fracción de cobertura ( $f_v$ ) o el índice de área foliar global (IAF) en forma independiente, genera soluciones múltiples a la definición del inicio y final de las etapas del  $K_c$  de acuerdo a FAO-56. Para parametrizar estos tiempos es necesario considerar de forma conjunta el IAF y la  $f_v$  de manera que se refleje la geometría de siembra de los cultivos.

Usando el formato genérico del índice IV\_CIMAS y las estimaciones directas de las pendientes de las líneas iso-IAF en experimentos de maíz y trigo, se obtuvieron relaciones lineales entre el  $K_{cb}$  y el IV\_CIMAS para la etapa vegetativa y la de senescencia. Esto implica que no puede usarse una relación única entre los IV y  $K_c$  ó  $K_{cb}$ . De esta restricción que requiere de calibraciones locales con mediciones de campo, se introdujo una metodología para la estimación directa de la relación del IV\_CIMAS y  $K_{cb}$  ó  $K_c$  para ser aplicada en términos operacionales.

Los análisis mostrados en este trabajo definen la limitación intrínseca de los IV en la estimación de  $K_c$  ó  $K_{cb}$  (mismas relaciones), debido a su diseño convencional para aproximar las pendientes de las líneas iso-IAF. Bajo esta consideración, no es posible utilizar los IV para aproximar  $K_e$  (humedad del suelo). No obstante lo anterior, la estimación de  $K_{cb}$  afectado por estrés hídrico evaluado de alguna manera,  $K_{cb} \cdot K_s$ , puede realizarse en forma similar al  $K_{cb}$  sin

estrés, siempre y cuando se tengan los valores iniciales y finales de  $K_{cb} \cdot K_s$  asociados a las etapas de la metodología FAO-56. Ésto requiere ser explorado con mayor detalle.

#### LITERATURA CITADA

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 298 p.
- Allen, R.G., M. Tasumi, AND R. Trezza. 2005. METRIC: mapping evapotranspiration at high resolution – Applications manual for LANDSAT satellite image. University of Idaho. 130 p.
- Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1: Formulation. Journal of Hydrology 212-213: 198–212.
- Bausch W.C. 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. Agric. Water Manage., 27, 55-68.
- Bausch, W.C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. Remote Sensing of Environ. 46: 213-222.
- Bausch, W.C. and C.M.U. Neale. 1989. Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling, Trans. ASAE, 46: 1901-1908.
- Bausch, W.C. and C.M.U. Neale. 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept, Trans. ASAE, 30: 703-709
- Calera, A., A.M. Jochum, A. Cuesta, A. Montoro, and P.L. Fuster. 2005. Irrigation management from space: towards user-friendly products, Irr. Drain. Systems, 19: 337-353.



- Calera, A., J. Gonzalez-Piqueras and J. Meliá. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sensing* 25: 97-109
- Choudhury B.J. and J.L. Monteith. 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 114: 373-398.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, Vol. 24, FAO, Rome. 179 p.
- Ferrandino, F.J. 1989. Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield. *Agric. Forest Meteorol.* 47: 273-289.
- Gilabert, M.A., J. González-Piqueras, F.J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environ.* 82:303-310.
- González-Piqueras, J., A. Calera, M.A. Gilabert, A. Cuesta, and F. de la Cruz. 2004. Estimation of crop coefficients by means of optimized vegetation indices for corn. *Proceedings SPIE* 5232:110-118.
- Goudriaan, J., and H.H. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 238 p.
- Goudriaan, J., and J.L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Annals of Botany* 66: 695-701.
- Heilman, J.L., W.E. Heilman and D.G. Moore. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance, *Agronomy Journal*, 74: 967-971.
- Jackson, R.D., P.J. Pinter, R.J. Reginato, and S. B. Idso. 1980. Hand-held radiometry. A set of notes developed for use at the workshop on hand-held radiometry. Phoenix, Arizona, February 25-26. US Department of Agriculture. *Agricultural Reviews and Manuals*. 66 p.

- López-Urrea, A. Montoro, J. González-Piqueras, P. López-Fuster, and E. Fereres. 2009a. Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agricultural Water Management*, 96: 1305-1310.
- López-Urrea, R., A. Montoro, P. López-Fuster, and E. Fereres. 2009b. Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli. *Agricultural Water Manage.* 96: 1155-1161.
- López-Urrea, R. Martín de Santa Olalla, F. Fabeiro, and C. Moratalla. 2006a. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Manage.* 85: 15-26.
- López-Urrea, R., F. Martín de Santa Olalla, C. Fabeiro, A. Moratalla. 2006b. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Manage.* 86: 277-282.
- McCoy, R. M. 2005. *Fields methods in remote sensing.* The Guilford Press New York London. 159 p.
- Milton, E. J. 1987. Principles of field spectroscopy. *Int. J. Remote Sensing* 8:12, 1807-1827.
- Paz, F., M.A. Marin, E. López, A. Zarco, M.A. Bolaños, J.L. Oropeza, M. Martínez, E. Palacios Y E. Rubiños. 2009a. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: mezcla suelo-vegetación. *Ingeniería Hidráulica en México.* XXIV: 69-80.
- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009b. Mitos y falacias de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices actuales de banda ancha. Aceptado para publicación en *Ciencia Forestal, México.*
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L.A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41: 539-554.

- 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.
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43(3):291-307.
- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk, Norwell, MA. 391 p.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, MASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp: 1-371.
- Shuttleworth, W.J. and J.S. Wallace. 1985. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 111:839-855.
- Soil Survey Staff, 2006. Keys to Soil Taxonomy, 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environ.* 8: 127-150.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE transactions in Geoscience and Remote Sensing* 34: 1254-1265.
- Wright, J.L., 1982, New evapotranspiration crop coefficients, *J. Irrig. and Drain.*, 108: 57-74.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

La modelación temporal de las variables biofísicas ( $B_m$ ,  $f_v$ , IAF y  $h$ ) con el modelo expo-lineal permite inferir relaciones esperadas entre pares de variables. En un cultivo de densidad alta como el sorgo, las fases exponencial y lineal de la  $B_m$  no coinciden con las de  $f_v$  y  $h$ , mostrando diferencias entre las características estructurales y la distribución espacial de la vegetación ( $f_v$  y  $h$ ) y la función fotosintética (follaje y biomasa).

Las relaciones entre el IV\_CIMAS (basado en  $b_0$ ) y la  $B_m$  para un cultivo de algodón con densidad foliar media, resultan en patrones bi-lineales bien caracterizados, a diferencia del cultivo de densidad alta (sorgo) donde el IV\_CIMAS muestra una rápida saturación en la fase exponencial de la  $B_m$  debido al elevado IAF que alcanza este tipo de cultivo.

Para evitar los problemas de saturación se evaluó el uso de la constante aditiva  $a_0$  ( $a_0$ - $a_s$ ) como alternativa a  $b_0$ . Ésta presentó relaciones bi-lineales con la  $f_v$  en los dos casos de densidad foliar, lo que permite una parametrización fácil en campo de  $a_0$ - $a_s$ , NDVI<sub>cp</sub> e IV\_CIMAS. En cambio, las relaciones entre ( $a_0$ - $a_s$ ) y  $B_m$  fueron de tipo expo-lineal doble, con problemas en la definición de sus transiciones.

El ajuste de los modelos expo-lineal truncado (ELT) y expo-lineal asimétrico (ELA) a las variables biofísicas ( $f_v$  e IAF) y espectrales (IV\_CIMAS) presentaron buenos resultados estadísticos en maíz y algodón (densidad foliar media), y sorgo (densidad alta). Sin embargo, el modelo ELT resulta una mejor opción para estimación de variables al no requerir del valor máximo de la variable biofísica o espectral de interés. La estimación de  $t_T$  mediante el

IV\_CIMAS y el IAF usando el modelo expo-lineal truncado, presentaron valores cercanos; esto refleja que el IV está diseñado para tener una relación lineal con el IAF. En cambio, la  $f_v$  presentó valores de  $t_T$  diferentes a los del IAF e IV\_CIMAS. Esto se explica porque la  $f_v$  representa un corte bi-dimensional del follaje, es decir, no considera al follaje como tridimensional, siendo una medida limitada de la cantidad de estomas, lo que representa una limitante en la estimación de la evapotranspiración. Por diseño, el IV\_CIMAS es función de la cantidad de IAF, de su distribución espacial ( $f_v$  y coeficiente de extinción  $K$ ), de las propiedades ópticas de las hojas ( $\omega$ ) y del suelo de fondo de la vegetación (línea del suelo), por tanto representa mejor la cantidad y calidad del follaje en un píxel o parcela, ya que considera explícitamente el verdor del follaje. El  $K$  es función de la distribución angular de las hojas en las plantas y la  $f_v$  es función implícita de  $K$ , por lo que para un mismo IAF existen valores diferentes de  $f_v$ , dependientes de  $K$ .

Para calcular la evapotranspiración de los cultivos (metodología FAO-56) utilizando información espectral, se analizaron los alcances y limitaciones del uso de los índices de vegetación (IV) para estimar los coeficientes de cultivo ( $K_{cb}$  ó  $K_c$ ), para cultivos con diferente densidad foliar. En el caso del sorgo (densidad foliar alta) es determinante establecer el inicio y final de la etapa de desarrollo del cultivo, considerada como la más crítica en relación a la productividad del cultivo. De los tres métodos analizados para definir esta etapa (cobertura, floración e IV\_CIMAS), el método del IV\_CIMAS resulta ser el más adecuado para evaluar el inicio y final de la etapa de desarrollo ( $R^2= 0.93$  y  $RECM= 0.017$ ), seguido por el método FAO-56 – Cobertura. En este tipo de cultivos que alcanzan rápidamente los valores críticos, el uso de variables como la  $f_v$  ó el IAF se ve limitado.

En los experimentos de maíz y trigo (cultivos con densidad foliar media) se aclaró que la relación entre los IV y el Kcb ó el Kc es la misma, ya que por definición las líneas iso-IAF no contienen información del contenido de humedad del suelo. La mayoría de los IV tratan de aproximar la pendiente  $b_0$ , o intersección  $a_0$ , de las líneas iso-IAF de los cultivos, por tanto no pueden diferenciar entre Kcb y Ke (humedad del suelo) ya que ésta se manifiesta en curvas iso-suelo diferentes (R e IRC disminuyen su valores). Esto implica que no puede usarse una relación única entre los IV y Kc ó Kcb.

La estimación de Kcb ó Kc requiere que el efecto del suelo sea minimizado. Del experimento con maíz se demuestra que el NDVI no reduce adecuadamente los efectos del suelo, presentando gran variabilidad de valores para un mismo día de medida, al inicio y final del ciclo de crecimiento (condición de baja cobertura vegetal). Considerando que la condición de humedad del suelo en el tiempo de las mediciones permanece más o menos constante, estas variaciones se atribuyen al efecto del suelo y/o a variaciones en la condición del cultivo. El IV\_CIMAS no presenta problemas de efecto del suelo ya que las pendientes de las líneas iso-IAF son estimadas directamente de los datos espectrales.

Se obtuvieron relaciones lineales diferentes entre el IV\_CIMAS y el Kcb para la etapa vegetativa y la de senescencia, esto implica que no se puede usar una relación única para todo el ciclo de crecimiento. En este sentido, la estimación directa del inicio y final de la etapa vegetativa usando patrones temporales del IV\_CIMAS mediante el modelo expo-lineal (inicio de la etapa en el tiempo  $t_T$  y final en  $t_{mx}$ ) permite definir el Kcb ó Kc asociado a la etapa con los datos

reportados por FAO-56 o de las estimaciones con lisímetro, de tal forma de determinar los parámetros de la relación lineal con un par de puntos.

En vista de que la etapa vegetativa está representada por la fase lineal en términos del IV\_CIMAS y que la relación temporal del  $K_{cb}$  ó  $K_c$  es exponencial, se introdujo una transformación logarítmica-exponencial para hacer equivalentes ambos patrones. Para parametrizar esta ecuación es posible usar los valores medidos en el lisímetro. La relación entre los  $K_{cb}$  estimados con la ecuación y los medidos en el lisímetro mostraron que la estimación con un par de datos para auto-calibrar el IV\_CIMAS da resultados adecuados y puede usarse en términos operacionales.

La metodología propuesta es independiente de efectos atmosféricos ya que se calibra con las estimaciones locales del IV\_CIMAS y los valores de  $K_{cb}$  ó  $K_c$  usados como inicio y final de una etapa.

Dentro de las recomendaciones se puede mencionar el replanteamiento de los esquemas de generación de índices espectrales de la vegetación más generalizados, que no dependan de constantes empíricas de manera que sean válidos para cultivos con diferente densidad foliar y vegetación natural. Hasta el momento ningún índice de vegetación modela en forma adecuada las dos fases asociadas a los patrones entre  $a_0$  y  $b_0$ , ya sea que representen una fase exponencial y lineal en la etapa vegetativa o bien, una fase expo-lineal y reproductiva. En el caso de los cultivos de densidad foliar alta es necesario explorar otras métricas espectrales para evitar los problemas de saturación de los IV basados en  $b_0$ .

La mayoría de los IV tratan de aproximar la pendiente o la intersección de las líneas iso-IAF, sin embargo éstas no contienen información del contenido de humedad del suelo, lo que genera relaciones similares para  $K_{cb}$  y  $K_c$ . En este sentido se recomienda el uso de las líneas iso-suelo para estimar humedad del suelo ( $K_e$ ), el aumento de la humedad del suelo se manifiesta en una disminución de los valores del R e IRC.

De la estimación de  $K_{bc}$  ó  $K_c$  mediante IV se recomienda seguir explorando otros IV que minimicen el efecto del suelo además de considerar las variables IAF y  $f_v$  de forma conjunta para reflejar la geometría de siembra de los cultivos. La estimación de la evapotranspiración mediante  $K_{cb}$  ó  $K_c$  (metodología FAO-56) derivados de medidas espectrales presenta algunas ventajas para ser aplicado en términos operacionales, ya que solo requiere de datos de reflectancia del R e IRC, no requiere proceso adicional de extrapolación de datos instantáneos ya que proporciona datos diarios. Sin embargo, también presenta algunas desventajas ya que se necesita la disponibilidad de la precipitación efectiva y de los datos climáticos para el cálculo de la  $E_{To}$  con una resolución espacial que solucione la típica heterogeneidad en la distribución de la humedad del suelo.

Por último se recomienda examinar modelos de balance de energía como otra alternativa para estimar la evapotranspiración de los cultivos usando sensores remotos. Estos modelos explican intrínsecamente la disminución en la  $E_{Tc}$  debido a un estrés hídrico, por lo tanto son más adecuados para estimar  $E_{Tc}$  bajo condiciones de estrés. En estos modelos las altas temperaturas de la cubierta detectadas con la banda térmica proporcionan un indicador remoto de la reducción del agua disponible en la zona de raíces.



## ANEXO A. DATOS DE CAMPO

**1. Zona de trabajo:** estación lisimétrica del Instituto Técnico Agropecuario Provincial (ITAP) de Albacete, España.

El estudio se realizó durante la campaña agrícola de 2007 (entre los meses de Junio y Octubre), en el lisímetro de herbáceos de la finca “Las Tiesas” (cultivo de sorgo: *Sorghum bicolor* L. Moench), situada en los términos municipales de Albacete y Barrax (España) (Figura 1,2,3 y 4).



Figura 1. Ubicación del ITAP en la Península Ibérica (tomado de López-Urrea, 2006).

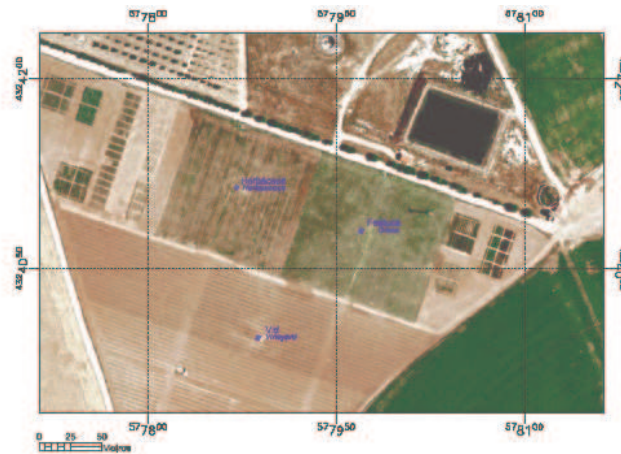
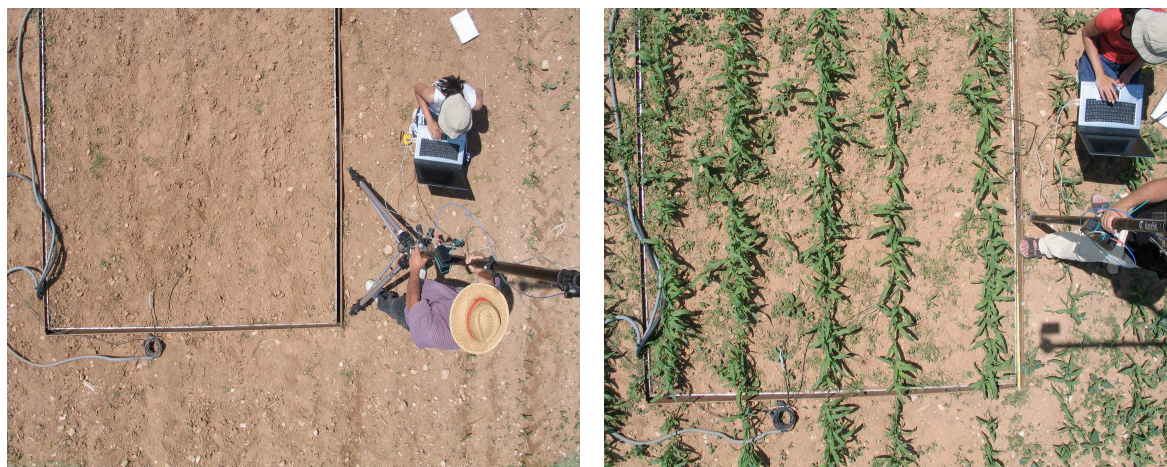


Figura 2. Área de lisimetría del ITAP en Albacete, España (tomado de González-Piqueras, 2006).



**Figura 3. Lisímetro de herbáceos con cultivo de sorgo.**



**Figura 4. Vista de la parcela de protección del lisímetro de herbáceos (1 há).**

### **1.1 Datos meteorológicos**

Los datos se obtuvieron de una estación agrometeorológica situada a menos de 60 m de la parcela con sorgo. Estos datos fueron utilizados posteriormente para estimar la ETo. En el Cuadro 1 se indica el tipo de sensor, modelo y fabricante y en el Cuadro 2 se observan los datos meteorológicos reportados durante el periodo experimental.

**Cuadro 1.-Variables meteorológicas, sensores y modelo.**

Variable	Sensor	Modelo/Fabricante
Humedad Relativa	Rotronic Hygromer C-80	MP100/Campbell Scientific Instrument, Logan, UT
Temperatura del aire	PRT (100 Ohm)	MP100/Campbell Scientific Instrument, Logan, UT
Velocidad del viento	Swatching Anemometer	A100R/ Vector Instruments Ltd., UK
Dirección del viento	Veleta	W200P/Vector Instruments Ltd., UK
Lluvia	Casoleta	ARG100/ Campbell Scientific Instrument, Logan, UT
Radiación onda corta	Piranómetro	CM14/KIPP&ZONEN Delft, Holland
Radiación onda larga	Pirgeometro	CM14/KIPP&ZONEN Delft, Holland
Datalogger	Datalogger	CR10X/ Campbell Scientific Instrument, Logan, UT

**Cuadro 2. Datos meteorológicos.**

Día Jul.	Velocidad del viento media a 2 m (m/s)	Temperatura media del aire a 2 m (°C)	Temperatura min. del aire a 2 m (°C)	HR media a 2 m (%)	HR max. a 2 m (%)	HR min. a 2 m (%)	Radiación global (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda corta (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda larga (W/m <sup>2</sup> )	Rn (W/m <sup>2</sup> )	Precipitación (mm)
156	3.6	18.1	11.4	74.3	100	36.6	306	247.7	-86.7	161	0
157	2.6	18.3	10.9	72.6	100	28.5	321.4	261.7	-84.3	177.4	0
158	2	21.1	12	60	100	25.4	331.8	270.1	-98.7	171.4	0
159	1.9	22.6	11.6	56.6	100	20.8	310.6	253.1	-85.6	167.5	0
160	3	22.8	13.8	39.9	98.4	22	298.7	244.5	-89	155.5	0
161	2.1	20	13.4	59.5	100	40.5	230.6	189.7	-73.4	116.3	0
162	1.6	21	11	48.2	100	22.2	361	293.4	-108.4	185	0
163	2.2	22.4	12.2	47.2	100	17.7	350.7	284	-106.7	177.3	0
164	2.8	22.9	15.1	39.7	73.5	21	344.9	282.5	-112.2	170.3	0
165	3.9	20.8	13.1	57.1	100	29	298.7	245.6	-86.6	159	0
166	3	17.8	13.6	92.2	100	65.3	140.6	118.9	-17.5	101.4	4.4
167	3.5	19.9	15.6	80.6	100	54.7	160.7	136.2	-36.7	99.5	0.1
168	2.4	20.9	13.2	71.4	100	27.7	221.9	182.7	-66.6	116.1	0
169	1.7	22.6	14.4	63.3	100	21.7	269.6	220.6	-59.7	160.9	0.1
170	3	22.8	14.1	46.4	100	11.5	354.9	286.2	-98.1	188.1	0
171	2.6	20	10.1	55.8	100	27	321.5	258.8	-98.6	160.2	0
172	2.7	20.2	11.1	45.6	100	23.1	364.9	294.4	-112.1	182.3	0
173	1.9	20.5	10.4	42.4	100	17.3	366.1	294.3	-120.3	174	0
174	3.7	21.9	11.9	63.3	100	29.7	351.8	282.5	-102.5	180	0
175	2.8	24.6	14.3	55.2	100	24.2	331	265.9	-99.8	166.1	0
176	3.8	24.5	14.4	38.7	95.3	16.6	363.9	290.7	-111.2	179.5	0
177	2.6	22	13.5	54.6	100	24.8	321.7	257	-100	157	0
178	2.9	21.4	11.7	63.3	100	27.9	310	249.5	-98.4	151.1	0
179	2.9	21.4	11.7	63.3	100	27.9	310	249.5	-98.4	151.1	0
180	4.1	23.3	16.9	68.5	100	30.2	347.1	277.6	-104.7	172.9	0
181	1.9	24.4	13	56.4	100	15.8	346.2	277	-106.4	170.6	0
182	3.2	25.1	13.5	45.4	100	16.7	310.7	249.3	-106.7	142.6	0
183	3.9	25.7	19	31.9	48.7	17.7	299.5	242.9	-104.6	138.3	0
184	2.7	23.1	12.7	37.7	93.3	18.8	360.1	290.9	-124.5	166.4	0
185	2.5	24.3	11.8	51.7	100	17.1	359	287.8	-116.7	171.1	0
186	3.4	25.9	17.6	49.2	100	26.6	352.9	281.3	-111	170.3	0
187	3.5	23.7	18	63.2	100	37.9	330.3	263	-98	165	0

**Cuadro 2. Datos meteorológicos (continuación).**

Día Jul.	Velocidad del viento media a 2 m (m/s)	Temperatura media del aire a 2 m (°C)	Temperatura min. del aire a 2 m (°C)	HR media a 2 m (%)	HR max. a 2 m (%)	HR min. a 2 m (%)	Radiación global (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda corta (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda larga (W/m <sup>2</sup> )	Rn (W/m <sup>2</sup> )	Precipitación (mm)
188	4	24.2	16.3	56.9	100	27.4	348.7	277.6	-115	162.6	0
189	3.5	25	14.3	37	94	19.4	348.3	276.4	-120.4	156	0
190	2.5	26.4	14.2	48	100	19.8	334.3	266.4	-111.9	154.5	0
191	3.1	22.1	14.5	43.2	100	16.7	332.8	264.3	-113.5	150.8	0
192	2	22.7	11.2	54.8	100	17.3	351.7	278.3	-130.5	147.8	0
193	4.8	23.6	15.9	58.5	100	29.8	334.6	263.4	-112.2	151.2	0
194	4.4	25.5	16.6	38.8	80.4	19.9	338.2	266	-119.8	146.2	0
195	6	25	15.2	38	100	22.6	342.1	267.6	-120.3	147.3	0
196	5.3	24.7	15.2	48.2	100	21.6	335	261.8	-117.9	143.9	0
197	2.9	24.8	13.8	52.6	100	12.7	340.1	265.5	-124.2	141.3	0
198	2.8	26	15	35	76	18	343.4	269.1	-125.2	143.9	0
199	2.1	26.1	14.6	30.5	69.1	14	345.5	269.7	-132.9	136.8	0
200	2.6	24.9	12.8	21.2	46.3	9.4	349.5	271.5	-137.2	134.3	0
201	2.3	22.6	12.5	32.5	61	16.8	344.5	266.9	-137.4	129.5	0
202	2.4	23.4	12.6	38.5	100	13.6	343.9	265.7	-135.9	129.8	0
203	2.1	23.2	11.6	33.2	100	5.8	318.1	245.4	-131.2	114.2	0
204	4.3	24	13.8	32.8	59.9	16	339	262.1	-124.4	137.7	0
205	2.6	24.2	14.6	43.9	84.9	21.6	338.9	261.6	-132.9	128.7	0
206	3	26.4	16.4	53.5	100	11.8	332.6	255.8	-130.1	125.7	0
207	1.7	26.6	12.7	57	100	12	332.5	255.8	-134.1	121.7	0
208	1.7	27.7	13.8	34.9	100	9.5	332.2	254.8	-137.6	117.2	0
209	2.1	27.2	13	42	100	7.5	332.9	254.5	-140.5	114	0
210	3.3	27.6	16.4	43.8	100	14.1	313.7	238.5	-128.3	110.2	0
211	2.6	27.2	17.1	41.4	100	8.9	329.3	250.7	-134.7	116	0
212	2	26.9	13.1	38.7	100	6.6	325.9	247.9	-138.9	109	0
213	3.2	29.8	18.2	24.1	76.5	5.9	276.1	209.8	-118	91.8	0
214	2.2	28.2	15.5	31.2	100	5.7	320.1	242.3	-136.1	106.2	0
215	3.5	25.8	16.3	66.1	100	23.7	311.3	235.1	-120.1	115	0
216	3.1	27.5	17.2	55.4	100	14.8	306.7	231.3	-125.5	105.8	0
217	2.6	25.4	16.4	57.9	100	17.2	200.7	151.6	-90.8	60.8	0
218	2.6	23.3	18.1	76.2	100	32.2	260	201.8	-74.1	127.7	10.8
219	2.6	22.3	14.5	80.6	100	40.1	269.1	208.9	-86.7	122.2	0.8



**Cuadro 2. Datos meteorológicos (continuación).**

Día Jul.	Velocidad del viento media a 2 m (m/s)	Temperatura media del aire a 2 m (°C)	Temperatura min. del aire a 2 m (°C)	HR media a 2 m (%)	HR max. a 2 m (%)	HR min. a 2 m (%)	Radiación global (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda corta (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda larga (W/m <sup>2</sup> )	Rn (W/m <sup>2</sup> )	Precipitación (mm)
220	2.6	23.7	16.5	68.3	100	29.3	302.4	236.6	-109.9	126.7	0
221	3.1	19.7	17.8	99.8	100	100	53.9	39.8	-67.7	-27.9	0
222	2.9	24.6	16	64.2	100	25.1	269.8	210.6	-107.4	103.2	0
223	3.6	26.5	18.2	38	94.6	11.5	296.7	230.5	-121.6	108.9	0
224	3.3	24.1	16.3	40.9	100	20.1	265.5	205.4	-108.4	97	0.7
225	2.1	22.3	9.9	60.5	100	15.1	313.1	243.2	-132.7	110.5	0
226	1.9	24.8	16	35.6	100	13	310.1	240.7	-132	108.7	0
227	2.7	26	15.6	27.6	54.9	9.8	316	244.6	-136.2	108.4	0
228	2.7	24.4	17.5	51.8	100	27.7	292.9	226.9	-119.1	107.8	0
229	4.2	23.8	18.6	75.5	100	36	262.9	203.4	-86.9	116.5	0
230	3.3	25.3	18	68.2	100	30.1	295.2	227.2	-115.8	111.4	0
231	3	25.6	18.6	56.9	100	10	307.3	235.5	-125	110.5	0
232	3.3	23.6	17.4	56.3	100	22.8	277.5	212.7	-105.7	107	0
233	3.5	20.9	14.3	35	58	16.7	314.3	239.8	-132.3	107.5	0
234	2.1	18.9	9.9	45.6	100	16.3	311.6	237.2	-136.3	100.9	0
235	2.9	20.3	11.8	65.5	100	25.6	298	226.8	-128.9	97.9	0
236	4.5	17.8	11	83	100	52.3	122.8	92.9	-58.3	34.6	0
237	6.5	21.3	16.7	83.5	100	50.6	102.2	77.5	-35.7	41.8	0
238	4	23.9	16.7	68.5	100	37	280.3	213.1	-97.6	115.5	0
239	3.9	25.9	16.1	49.7	100	20.2	274.7	208.5	-112.1	96.4	0
240	2.4	25.8	17.8	48.5	97.4	12.9	204.3	155.2	-91.2	64	1.2
241	3.6	25.2	18	36.7	100	8.2	288.2	219.6	-110.3	109.3	0
242	2.8	21.5	11.9	45.9	92.3	25.2	286.3	218.9	-120	98.9	0
243	2.7	21.8	15.7	57.5	100	30.9	252	192.8	-105.1	87.7	0
244	3.8	22.1	14.7	70	100	32.1	278.8	211.5	-111.1	100.4	0
245	3.2	21.8	13.4	60.3	100	18.3	280.1	212.7	-126.3	86.4	0
246	2.4	22.7	14.3	55.4	100	21.6	263.6	200.1	-115.4	84.7	0
247	2.1	22.4	12.2	56.2	100	20.1	262	198.7	-121.1	77.6	0
248	4.1	21.3	14.4	77.3	100	37.1	269.4	203.5	-110.1	93.4	0
249	3	22.3	17.2	64.9	100	27.8	262.9	199.5	-103.1	96.4	0
250	2.6	21.7	11.6	50.8	100	22.3	270.9	204.3	-123.4	80.9	0
251	3.2	22.2	14.3	63.5	100	29.5	251.6	189.3	-113.6	75.7	0

**Cuadro 2. Datos meteorológicos (continuación).**

Día Jul.	Velocidad del viento media a 2 m (m/s)	Temperatura media del aire a 2 m (°C)	Velocidad del viento max. a 2 m (m/s)	Temperatura min. del aire a 2 m (°C)	HR media a 2 m (%)	HR max. a 2 m (%)	HR min. a 2 m (%)	Radiación global (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda corta (W/m <sup>2</sup> )	Radiación neta de onda larga (W/m <sup>2</sup> )	Rn (W/m <sup>2</sup> )	Precipitación (mm)
252	2.3	22.5	7.4	13.6	61.2	100	26.8	226.9	171	-104.9	66.1	0
253	1.8	19.1	2.3	19	52.9	57.2	57.2	0	-0.1	-49.8	-49.9	0
254	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
256	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
257	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
258	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
259	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
260	3.7	24.6	12.9	17.5	44.4	100	25.9	354.5	287.5	-115.2	172.3	0
261	2.5	20.5	9.4	11.8	62.3	100	27.1	225.8	182.3	-100.9	81.4	0
262	3.9	21	9.3	14.9	84.2	100	37.4	218.1	175.1	-84	91.1	0
263	4.5	20.4	10.3	15.9	84.7	100	48.6	195.6	158	-82.5	75.5	0
264	3	17.2	13.9	14.3	99.2	100	100	64.9	53.7	-27.9	25.8	5.3
265	1.5	17.6	5.6	12.4	91.3	100	58.2	185.4	152.4	-66.3	86.1	0
266	1.8	18.5	6.3	12.7	82.5	100	40	210.9	173	-86	87	0
267	1.7	18.6	7.5	10.6	70.1	100	28.3	232	190.1	-97.5	92.6	0
268	2.2	20	10.1	10	62.8	100	24.1	232.3	189.8	-103.7	86.1	0
269	2.3	17.3	8.7	10.1	60.2	100	18.9	214.6	174.8	-98	76.8	0
270	2.6	13.5	9.3	5.7	46.7	100	26.8	240.4	194.8	-114.8	80	0
271	2.5	16.7	9.6	6.6	49.4	99.7	26.2	214.7	174	-102	72	0
272	2.8	18.3	10	13.8	78.5	100	49	189.6	154.4	-49	105.4	1.5
273	1.9	19.5	9.3	10.5	67	100	25.2	221.6	180.3	-76.7	103.6	0
274	2.4	20	6.4	12.3	74.2	100	29.7	207.2	168.3	-78.8	89.5	0
275	3.8	18.4	9.3	12.5	87.8	100	55.3	158.9	128.6	-57.8	70.8	0.2
276	1.8	17.2	8.3	14.5	92.7	100	65.9	130.2	108.3	-35.9	72.4	12.6
277	1.3	15.2	6.7	12.5	97.7	100	88.8	85.3	71.6	-44.4	27.2	1
278	2	16	6.7	10.3	83.7	100	46.5	170.3	141.5	-76.1	65.4	0.1
279	1.9	16.2	6.3	8.9	77.7	100	36.4	202.6	167.7	-88.2	79.5	0
280	1.2	16.4	3.8	8.3	75.1	100	34.6	183.6	152	-82.9	69.1	0
281	1.6	17	6	10.1	75.2	100	36.8	195.5	161.4	-90.6	70.8	0

## 1.2 Cálculo de ETo

La ETo se calculó con la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 adaptada a la superficie de referencia a escala diaria:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

donde  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia,  $mm \text{ dia}^{-1}$ ;  $R_n$  es la radiación neta,  $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;  $G$  es el flujo de calor en suelo,  $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;  $T$  es la temperatura media del aire medida a 2 m de altura,  $^{\circ}C$ ;  $u_2$  es velocidad media del viento medida a 2 m de altura,  $m \text{ s}^{-1}$ ;  $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor del aire,  $kPa$ ;  $e_s$  es la presión de vapor de saturación del aire,  $kPa$ ;  $e_a$  es la presión de vapor actual del aire,  $kPa$ ;  $\Delta$  es la pendiente de saturación en la relación presión de vapor temperatura,  $kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$ ;  $\gamma$  es la constante psicrométrica,  $kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$ .

Los datos necesarios para cálculo diario son:

$TM$ , Temperatura máxima diaria, medida a 2 m de altura,  $^{\circ}C$ .

$Tm$ , Temperatura mínima diaria, medida a 2 m de altura,  $^{\circ}C$ .

$HRM$ , Humedad relativa máxima diaria, medida a 2 m de altura, %.

$HRm$ , Humedad relativa mínima diaria, medida a 2 m de altura, %.

$R_n$ , Radiación neta  $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .

$u_2$ , Velocidad del viento media diaria ( $m \text{ s}^{-1}$ ), medida a 2 m de altura.

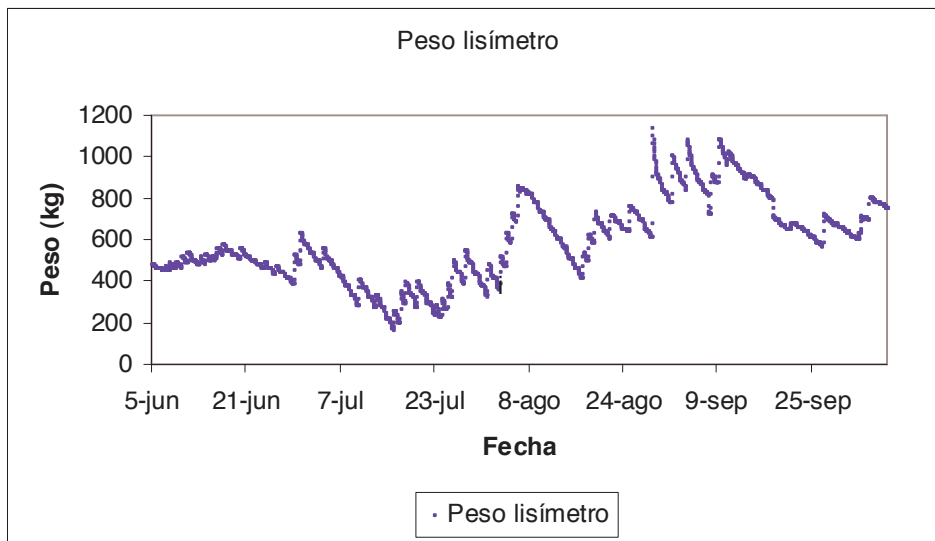
## 1.3 Medida de ETc

La medida se hizo con el lisímetro de pesada continua, obteniendo el valor de ETc de la diferencia de peso registrada por la célula de carga. Los cambios de peso representan una medida directa del flujo de agua que entra y sale del mismo.

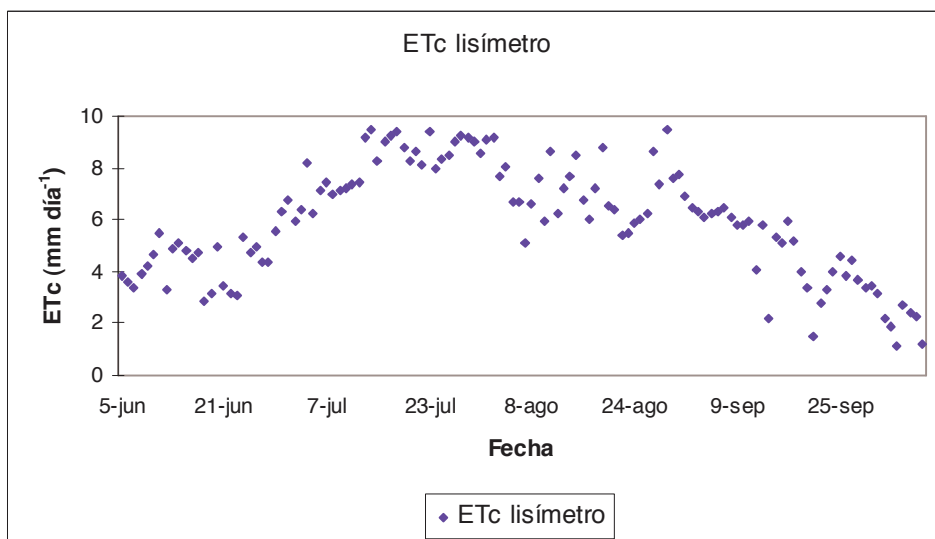
Los datos se recogieron de manera automática cada 15 minutos en un datalogger. También se registraron las medias horarias y diarias. Se trabajó con los datos horarios para obtener el dato diario de agua evaporada. Cuando no se pudo obtener el valor diario, por diferentes motivos (lluvia, riego, corte del césped) se hizo un promedio entre el valor anterior y



siguiente a ese día. Otras fuentes de error que condujeron a la eliminación de datos fueron: la verificación del peso, calibraciones por pérdida de contacto en la célula de carga, baja de voltaje en el sistema, pérdida de contacto del cable a tierra y falla en el datalogger (López-Urrea *et al.*, 2006). En las figuras 5 y 6 se observan los datos de peso del lisímetro y los datos depurados de evapotranspiración respectivamente.



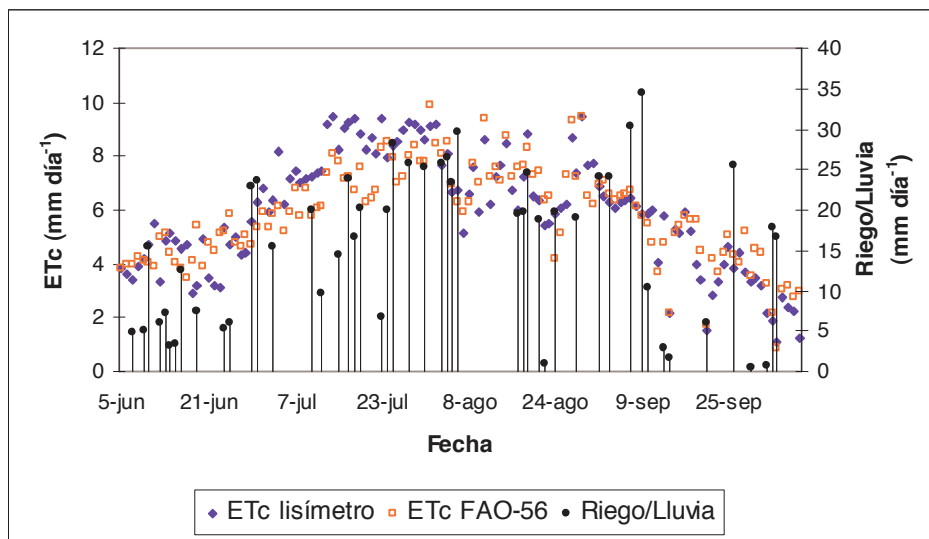
**Figura 5. Datos de peso del lisímetro de sorgo.**



**Figura 6. Datos depurados de evapotranspiración diaria del lisímetro de sorgo.**

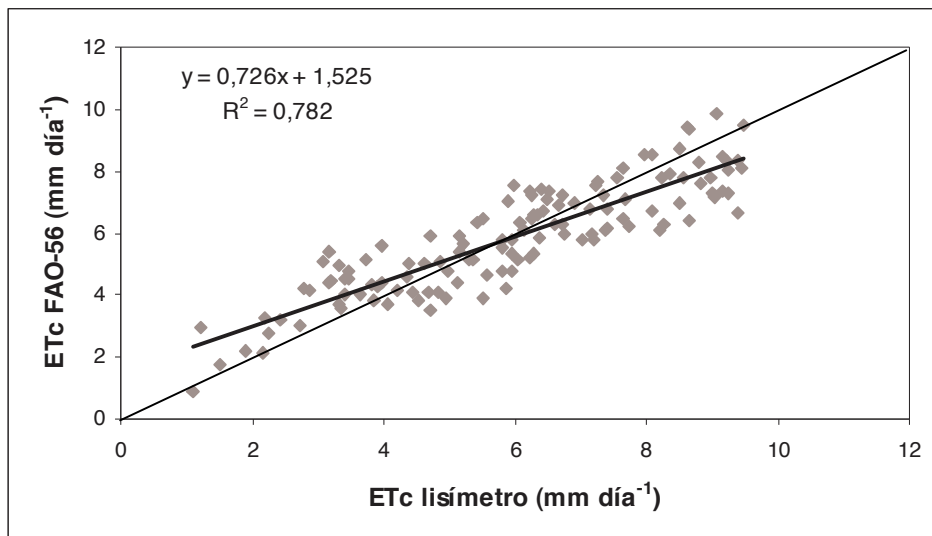
Adicionalmente se calcularon los valores diarios de la evapotranspiración del sorgo dulce (ETc) utilizando la metodología propuesta por FAO-56 (Allen et al., 1998):  $ET_c = ET_o * K_c$ , donde  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia en  $mm\ día^{-1}$  y  $K_c$  el coeficiente de cultivo (adimensional). Los valores de coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) utilizados fueron: 0.70 en la fase inicial (5 Junio-26 Junio); de 0.70 a 1.20 en desarrollo vegetativo (27 Junio-13 Agosto); 1,20 en floración (14 Agosto-18 Septiembre); y de 1.20 a 1.05 en maduración (19 Septiembre- 8 Octubre) (Allen et al., 1998).

Los valores de ETc medidos en el lisímetro se compararon con los valores calculados por la metodología FAO, mediante análisis de regresión simple. Se consideró como variable dependiente la ETc calculada y como variable independiente o explicativa la ETc medida en el lisímetro.



**Figura 7. Valores diarios de ETc medidos en el lisímetro y calculados por la metodología de la FAO.**

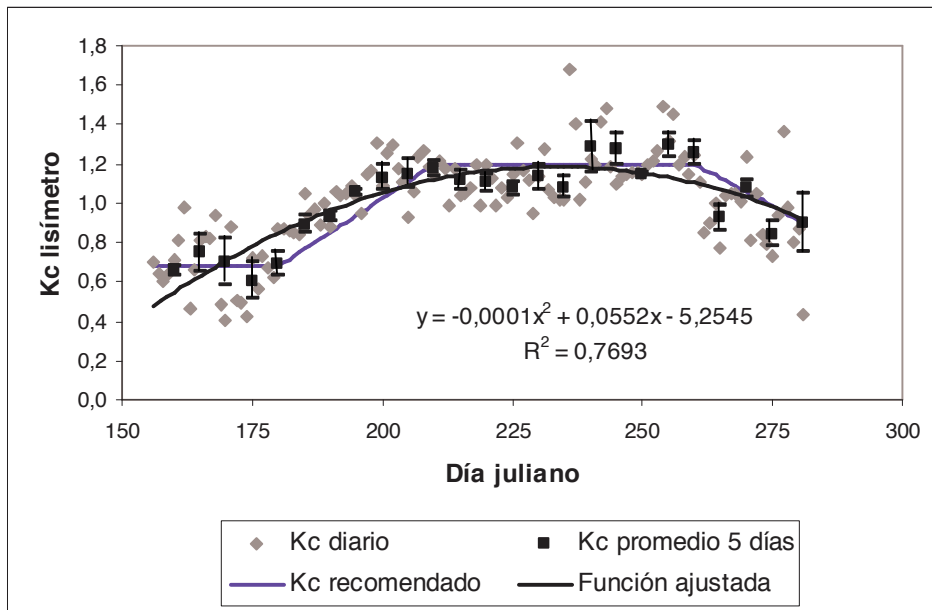
Se hizo un análisis de regresión simple (Figura 8) tomando como variable dependiente la ETc calculada y como variable independiente o explicativa las medidas lisimétricas. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) obtenido es de 0,782.



**Figura 8. Análisis de regresión simple de las ETc calculadas sobre los valores lisimétricos.**

#### **1.4 Estimación de Kc**

Los datos de Kc fueron calculados dividiendo la ETc medida en el lisímetro por la evapotranspiración de referencia estimada con la ecuación de Penman-Monteith FAO-56. Se presentan valores de Kc promediados cada cinco días, para evitar el efecto del riego sobre las medidas lisimétricas. Estos valores se ajustaron a una ecuación polinómica de segundo grado (Figura 9). La línea azul indica los valores y la duración en días de las fases de la curva de Kc recomendada, derivada de las medidas hechas en el lisímetro. Los valores de Kc inicial, Kc medio y Kc final fueron 0.68, 1.20 y 0.90, respectivamente. Estos resultados son parecidos a los dados recomendados por Allen *et al.* (1998), la principal diferencia esta en la duración de las etapas del ciclo del cultivo, que fueron: L-inicial: 25 días, L-desarrollo: 30 días, L-medio: 50 días y L-final: 21 días, mientras que las propuestas por la FAO para regiones del Mediterráneo y plantaciones hechas en Junio son: 20, 35, 40 y 30 días, respectivamente.



**Figura 9. Kc recomendado para el sorgo dulce basado en los datos medidos en el lisímetro.**

En el Cuadro 3 se indican los datos de ETc del lisímetro, ETc FAO-56, ETo y otros.

**Cuadro 3. Datos de ETc del lisímetro, ETc FAO-56, ETo y otros.**

Fecha	ETc Lisím. mm d <sup>-1</sup>	Eto PM mm d <sup>-1</sup>	Kc	Etc FAO-56 mm d <sup>-1</sup>	Riego/Lluvia mm	Kc Lisím.	Kc (5 días)	S	Kc (recomendado)
05/06/2007	3.86	5.5	0.70	3.85		0.70			0.68
06/06/2007	3.64	5.7	0.70	3.99		0.64			0.68
07/06/2007	3.42	5.7	0.70	3.99	4.8	0.60			0.68
08/06/2007	3.91	6.1	0.70	4.27		0.64			0.68
09/06/2007	4.20	5.9	0.70	4.13	4.94	0.71	0.66	0.05	0.68
10/06/2007	4.69	5.8	0.70	4.06	15.51	0.81			0.68
11/06/2007	5.51	5.6	0.70	3.92		0.98			0.68
12/06/2007	3.33	7.1	0.70	4.97	5.99	0.47			0.68
13/06/2007	4.86	7.3	0.70	5.11	7.33	0.67			0.68
14/06/2007	5.14	6.3	0.70	4.41	3.24	0.82	0.75	0.19	0.68
15/06/2007	4.84	5.8	0.70	4.06	3.34	0.83			0.68
16/06/2007	4.53	5.5	0.70	3.85	12.59	0.82			0.68
17/06/2007	4.70	5	0.70	3.50		0.94			0.68
18/06/2007	2.87	5.9	0.70	4.13		0.49			0.68
19/06/2007	3.16	7.7	0.70	5.39	7.54	0.41	0.70	0.23	0.68
20/06/2007	4.94	5.6	0.70	3.92		0.88			0.68
21/06/2007	3.46	6.8	0.70	4.76		0.51			0.68
22/06/2007	3.19	6.4	0.70	4.48		0.50			0.68
23/06/2007	3.08	7.3	0.70	5.11		0.42			0.68
24/06/2007	5.35	7.4	0.70	5.18	5.23	0.72	0.61	0.19	0.68
25/06/2007	4.70	8.4	0.70	5.88	6.12	0.56			0.68
26/06/2007	4.98	6.8	0.70	4.76		0.73			0.68
27/06/2007	4.35	6.5	0.71	4.62		0.67			0.68
28/06/2007	4.38	7	0.72	5.05		0.63			0.68
29/06/2007	5.57	6.4	0.73	4.68	22.8	0.87	0.69	0.12	0.68
30/06/2007	6.28	7.2	0.74	5.34	23.7	0.87			0.70
01/07/2007	6.76	7.9	0.75	5.94		0.86			0.71
02/07/2007	5.96	7	0.76	5.34		0.85			0.73
03/07/2007	6.36	7.6	0.77	5.87	15.39	0.84			0.75
04/07/2007	8.20	7.8	0.78	6.11		1.05	0.89	0.09	0.77
05/07/2007	6.23	6.6	0.79	5.24		0.94			0.78
06/07/2007	7.18	7.4	0.80	5.95		0.97			0.80
07/07/2007	7.42	8.3	0.81	6.76		0.89			0.82
08/07/2007	7.02	7	0.82	5.77		1.00			0.84
09/07/2007	7.15	8.1	0.84	6.77		0.88	0.94	0.05	0.85
10/07/2007	7.21	6.8	0.85	5.75	19.88	1.06			0.87
11/07/2007	7.38	7.1	0.86	6.08		1.04			0.89
12/07/2007	7.41	7.1	0.87	6.15	9.69	1.04			0.90
13/07/2007	9.16	8.4	0.88	7.37		1.09			0.92
14/07/2007	9.44	9.1	0.89	8.08		1.04	1.05	0.02	0.94
15/07/2007	8.24	8.7	0.90	7.81	14.4	0.95			0.96
16/07/2007	9.03	7.9	0.91	7.18		1.14			0.97
17/07/2007	9.24	7.9	0.92	7.26	23.82	1.17			0.99
18/07/2007	9.39	7.2	0.93	6.69	16.52	1.30			1.01
19/07/2007	8.83	8.1	0.94	7.61	20.18	1.09	1.13	0.13	1.03
20/07/2007	8.26	6.6	0.95	6.27		1.25			1.04
21/07/2007	8.65	6.7	0.96	6.43		1.29			1.06

**Cuadro 3. Datos de ETc del lisímetro, ETc FAO-56, ETo y otros (continuación).**

Fecha	ETc Lisím. mm d <sup>-1</sup>	Eto PM mm d <sup>-1</sup>	Kc	ETc FAO-56 mm d <sup>-1</sup>	Riego/Lluvia mm	Kc Lisím.	Kc (5 días)	S	Kc (recomendado)
22/07/2007	8.10	6.9	0.97	6.70		1.17			1.08
23/07/2007	9.40	8.5	0.98	8.34	6.75	1.11			1.10
24/07/2007	7.97	8.6	0.99	8.53	20.1	0.93	1.15	0.14	1.11
25/07/2007	8.35	7.9	1.00	7.92	28.2	1.06			1.13
26/07/2007	8.50	6.9	1.01	6.99		1.23			1.15
27/07/2007	9.00	7.1	1.02	7.26		1.27			1.16
28/07/2007	9.23	7.8	1.03	8.06	25.76	1.18			1.18
29/07/2007	9.21	8	1.04	8.35		1.15	1.18	0.08	1.20
30/07/2007	8.99	7.4	1.05	7.80		1.21			1.20
31/07/2007	8.57	7.3	1.06	7.77	25.27	1.17			1.20
01/08/2007	9.08	9.2	1.07	9.89		0.99			1.20
02/08/2007	9.16	7.8	1.09	8.47		1.17			1.20
03/08/2007	7.65	7.4	1.10	8.11	25.83	1.03	1.12	0.10	1.20
04/08/2007	8.08	7.7	1.11	8.52	26.43	1.05			1.20
05/08/2007	6.67	6.2	1.12	6.92	23.35	1.08			1.20
06/08/2007	6.72	5.6	1.13	6.31	29.69	1.20			1.20
07/08/2007	5.15	5.2	1.14	5.91		0.99			1.20
08/08/2007	6.60	5.5	1.15	6.31		1.20	1.10	0.09	1.20
09/08/2007	7.57	6.7	1.16	7.76		1.13			1.20
10/08/2007	5.91	6	1.17	7.01		0.99			1.20
11/08/2007	8.63	8	1.18	9.43		1.08			1.20
12/08/2007	6.25	6.1	1.19	7.26		1.02			1.20
13/08/2007	7.23	6.3	1.20	7.56		1.15	1.07	0.07	1.20
14/08/2007	7.68	5.9	1.20	7.08		1.30			1.20
15/08/2007	8.49	7.3	1.20	8.76		1.16			1.20
16/08/2007	6.73	6	1.20	7.20		1.12			1.20
17/08/2007	5.99	6.3	1.20	7.56	19.48	0.95			1.20
18/08/2007	7.25	6.4	1.20	7.68	19.71	1.13	1.13	0.13	1.20
19/08/2007	8.79	6.9	1.20	8.28	24.53	1.27			1.20
20/08/2007	6.51	6.1	1.20	7.32		1.07			1.20
21/08/2007	6.39	6.2	1.20	7.44	18.91	1.03			1.20
22/08/2007	5.41	5.3	1.20	6.36	0.97	1.02			1.20
23/08/2007	5.52	5.4	1.20	6.48		1.02	1.08	0.11	1.20
24/08/2007	5.87	3.5	1.20	4.20	19.79	1.68			1.20
25/08/2007	6.05	4.3	1.20	5.16		1.41			1.20
26/08/2007	6.22	6.1	1.20	7.32		1.02			1.20
27/08/2007	8.66	7.8	1.20	9.36		1.11			1.20
28/08/2007	7.36	6	1.20	7.20	19	1.23	1.29	0.26	1.20
29/08/2007	9.48	7.9	1.20	9.48		1.20			1.20
30/08/2007	7.63	5.4	1.20	6.48		1.41			1.20
31/08/2007	7.73	5.2	1.20	6.24		1.49			1.20
01/09/2007	6.90	5.8	1.20	6.96	24	1.19			1.20
02/09/2007	6.49	5.9	1.20	7.08		1.10	1.28	0.16	1.20
03/09/2007	6.28	5.5	1.20	6.60	24	1.14			1.20
04/09/2007	6.07	5.3	1.20	6.36		1.15			1.20
05/09/2007	6.26	5.4	1.20	6.48		1.16			1.20
06/09/2007	6.35	5.5	1.20	6.60		1.15			1.20

**Cuadro 3. Datos de ETc del lisímetro, ETc FAO-56, ETo y otros (continuación).**

Fecha	ETc Lisím. mm d <sup>-1</sup>	Eto PM mm d <sup>-1</sup>	Kc	ETc FAO-56 mm d <sup>-1</sup>	Riego/Lluvia mm	Kc Lisím.	Kc (5 días)	S	Kc (recomendado)
07/09/2007	6.44	5.6	1.20	6.72	30.27	1.15	1.15	0.01	1.20
08/09/2007	6.12	5.1	1.20	6.12		1.20			1.20
09/09/2007	5.82	4.8	1.20	5.76	34.46	1.21			1.20
10/09/2007	5.82	4.6	1.20	5.52	10.47	1.27			1.20
11/09/2007	5.97	4	1.20	4.80		1.49			1.20
12/09/2007	4.07	3.1	1.20	3.72		1.31	1.30	0.12	1.20
13/09/2007	5.80	4	1.20	4.80	2.9	1.45			1.20
14/09/2007	2.16	1.8	1.20	2.16	1.61	1.20			1.20
15/09/2007	5.31	4.3	1.20	5.16		1.23			1.20
16/09/2007	5.15	4.5	1.20	5.40		1.14			1.20
17/09/2007	5.96	4.8	1.20	5.76		1.24	1.25	0.12	1.20
18/09/2007	5.22	4.7	1.20	5.64		1.11			1.19
19/09/2007	3.98	4.7	1.19	5.60		0.85			1.17
20/09/2007	3.41	3.8	1.19	4.50		0.90			1.16
21/09/2007	1.50	1.5	1.18	1.77	5.96	1.00			1.14
22/09/2007	2.79	3.6	1.17	4.21		0.78	0.93	0.13	1.13
23/09/2007	3.32	3.2	1.16	3.72		1.04			1.11
24/09/2007	3.98	3.8	1.16	4.39		1.05			1.10
25/09/2007	4.62	4.4	1.15	5.05		1.05			1.09
26/09/2007	3.83	3.8	1.14	4.33	25.49	1.01			1.07
27/09/2007	4.44	3.6	1.13	4.08		1.23	1.08	0.09	1.06
28/09/2007	3.72	4.6	1.13	5.18		0.81			1.04
29/09/2007	3.36	3.2	1.12	3.58	0.6	1.05			1.03
30/09/2007	3.46	4.1	1.11	4.55		0.84			1.01
01/10/2007	3.17	4	1.10	4.41		0.79			1.00
02/10/2007	2.19	3	1.10	3.29	0.6119	0.73	0.85	0.12	0.99
03/10/2007	1.88	2	1.09	2.18	17.81	0.94			0.97
04/10/2007	1.10	0.8	1.08	0.86	16.55	1.37			0.96
05/10/2007	2.74	2.8	1.07	3.00		0.98			0.94
06/10/2007	2.42	3	1.07	3.20		0.81			0.93
07/10/2007	2.25	2.6	1.06	2.75		0.87			0.91
08/10/2007	1.21	2.8	1.05	2.94		0.43	0.90	0.30	0.90

## 2. Seguimiento de cultivos

### 2.1 Fenología

**Cuadro 4. Fenología del cultivo de sorgo.**

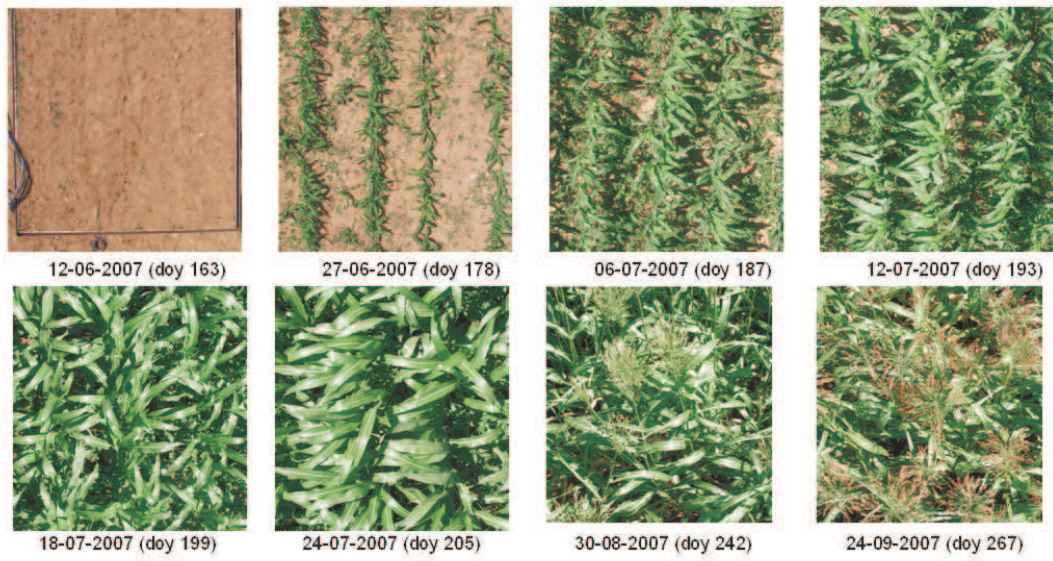
Fenología	Fecha	Día Juliano	Días después de la emergencia
Siembra	23/05/2007	143	
Emergencia	31/05/2007	150	0
4-5 hojas	18/06/2007	169	19
Inicio floración	10/08/2007	222	72
50 % floración	17/08/2007	229	79
100 % floración	21/08/2007	233	83
Maduración	18/09/2007	261	111
Cosecha	09/10/2007	282	132

### 2.2 Fracción de cobertura (fv)

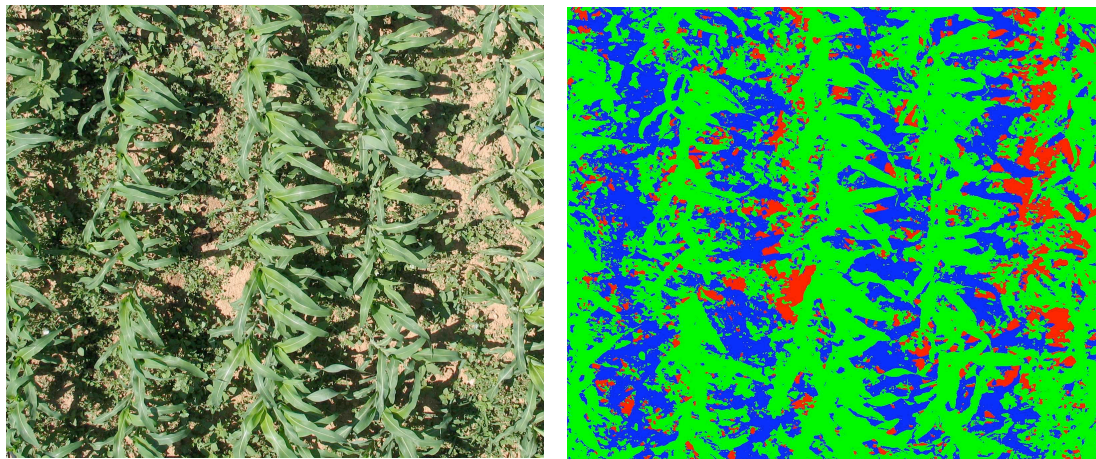
**Cuadro 5. Fracción de cobertura del sorgo.**

Fecha	Día juliano	Días después de emergencia	fv (%)
04/06/2007	150	0	0.0
09/06/2007	155	5	1.5
12/06/2007	163	13	5.7
27/06/2007	178	28	37.3
06/07/2007	187	37	58.9
12/07/2007	193	43	68.2
18/07/2007	199	49	81.0
24/07/2007	205	55	93.8
14/08/2007	226	76	97.4
30/08/2007	242	92	96.2
07/09/2007	250	100	98.1
24/09/2007	267	117	97.6





**Figura 10. Fracción de cobertura de sorgo.**



**Figura 11. Clasificación supervisada de fotografía digital hecha con ENVI 4.1**

### 2.3 Biomasa (Bm)

**Cuadro 6. Biomasa seca.**

Fecha	Día juliano	Días después de emergencia	Biomasa seca (g m <sup>-2</sup> )
31/05/2007	150	0	0.1
22/06/2007	173	23	9.3
09/07/2007	190	40	65.7
31/07/2007	212	62	700.0
20/08/2007	232	82	1522.5
05/09/2007	248	98	2304.6
19/09/2007	262	112	2795.9
10/10/2007	283	133	2853.3

### 2.4 Altura (h)

**Cuadro 7. Altura del cultivo de sorgo.**

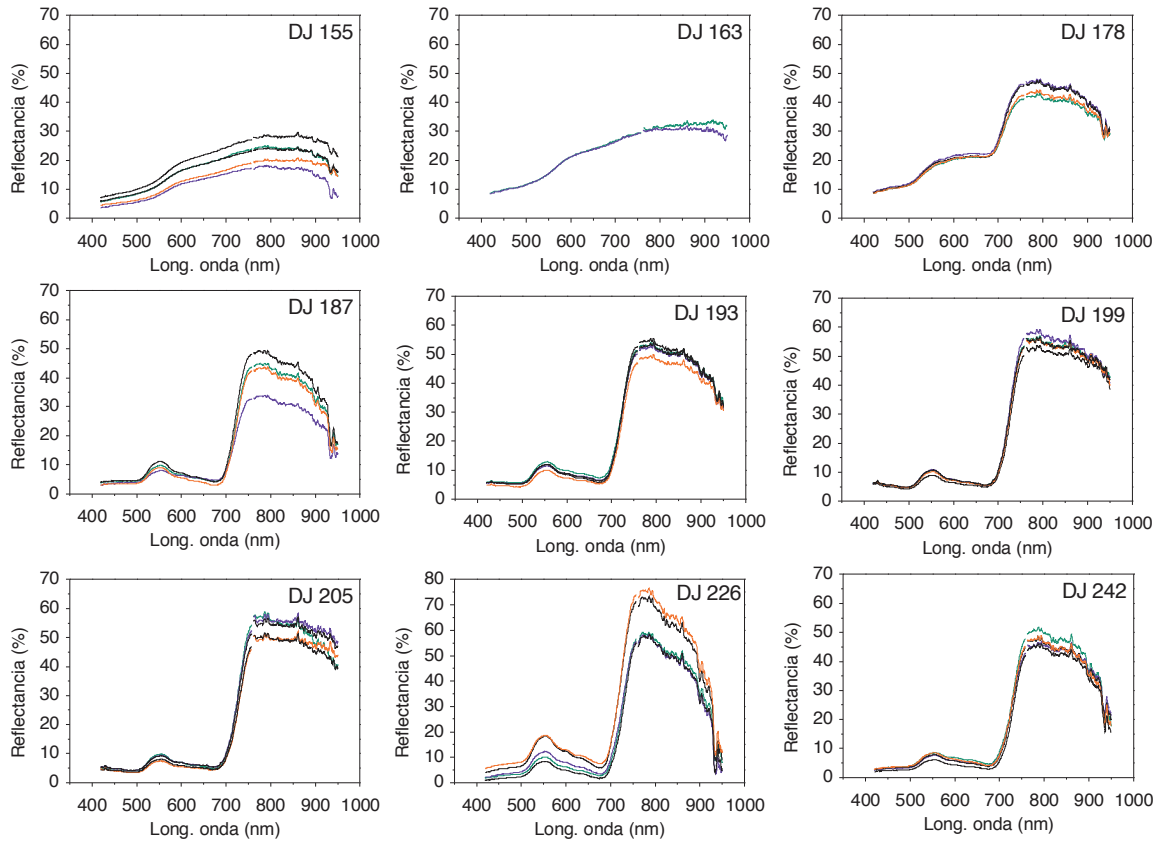
Fecha	Día juliano	Días después de emergencia	h (cm)
04/06/2007	150	0	0
27/06/2007	178	28	17
12/07/2007	193	43	43
18/07/2007	199	49	92
24/07/2007	205	55	139
31/07/2007	212	62	206
10/08/2007	222	72	290
21/08/2007	233	83	400
30/08/2007	242	92	400
24/09/2007	267	117	400

### 2.5 Medidas de radiometría

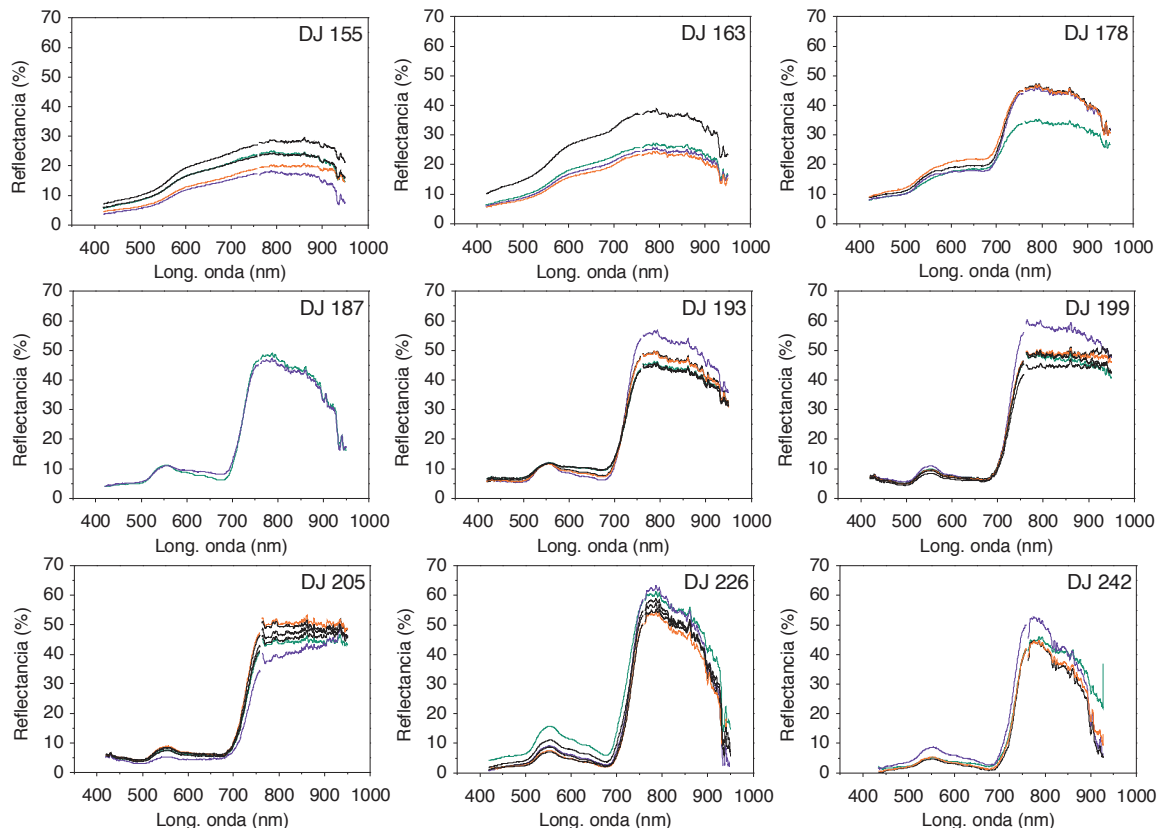
En la Figura 10 se observa la toma de medidas espectrales con el radiómetro HR4000 de Ocean Optics® (Figura 10). En las Figuras 11 y 12 se observa los cambios de la reflectancia durante el crecimiento del sorgo en la parcela de protección y en el lisímetro respectivamente.



**Figura 10. Medidas de radiometría.**



**Figura 11. Reflectancias de sorgo en el lisímetro.**



**Figura 12. Reflectancias de sorgo en la parcela de protección del lisímetro.**