

DEFINICIÓN DE LA ETAPA DE DESARROLLO DE LOS CULTIVOS PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRACIÓN USANDO LA METODOLOGÍA FAO-56 Y SENSORES REMOTOS

• Magali Odi-Lara* • Fernando Paz-Pellat •
Colegio de Postgraduados, México

* Autor de correspondencia

• Ramón López-Urrea •
Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, España

• José González-Piqueras •
Universidad de Castilla-La Mancha, España

Resumen

Se analizan los patrones temporales de variables biofísicas y espectrales: índice de área foliar (*IAF*), cobertura aérea (*fv*), e índice de vegetación cinemáticamente modificado y ajustado por suelo (*IV_CIMAS*), en cultivos con densidad foliar alta (sorgo) y densidad foliar media (algodón y maíz). En el caso del sorgo, se analiza la relación de estos patrones temporales con el coeficiente basal de cultivo (*Kcb*). Las variables *fv*, *IAF* e *IV_CIMAS* fueron modeladas con un modelo expo-lineal truncado (*ELT*) y uno expo-lineal asimétrico (*ELA*). Ambos presentaron un buen ajuste estadístico en los tres cultivos; sin embargo, el modelo *ELT* resulta más adecuado, porque no requiere el valor máximo de la variable. De las tres variables modeladas, el *IV_CIMAS* representa mejor la cantidad y calidad de la vegetación en un píxel o parcela, 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. Con el objeto de estimar evapotranspiración, según lo establecido en FAO-56, se analizaron tres métodos distintos para caracterizar la etapa de desarrollo del cultivo de sorgo. Los métodos definen la duración de la etapa con base en la cobertura del suelo, la etapa de floración y mediante la información espectral (*IV_CIMAS*). Se analizaron los errores (*RECM* y *ERM*) de las estimaciones de *Kcb* de la etapa de desarrollo vegetativo mediante los tres métodos, en relación con las estimaciones de *Kcb* de un lisímetro de pesada, obteniendo los mejores resultados para el método *IV_CIMAS* y los peores para el método FAO-56-Floración.

Palabras clave: índice de vegetación, coeficiente basal del cultivo, etapa de desarrollo, modelo expolineal.

Introducción

Uno de los modelos ampliamente aceptados para estimar la evapotranspiración de los cultivos es el conocido como método FAO-56 o del coeficiente de cultivo dual (Allen *et al.*, 1998). Este método se basa en la definición de las etapas de crecimiento de los cultivos, las cuales se asocian con parámetros o coeficientes del cultivo para estimar la evapotranspiración. La determinación

operacional de estas etapas de crecimiento se dificulta en superficies con una gran diversidad de cultivos, como sucede en las zonas de riego. La asistencia de datos espectrales obtenidos de sensores remotos puede ser una herramienta adecuada para definir estas etapas y estimar la evapotranspiración (Calera *et al.*, 2005).

La tecnología de los sensores remotos permite el seguimiento de la vegetación mediante la aplicación de relaciones empíricas entre

índices de vegetación espectrales (*IV*) y variables biofísicas de los cultivos, como la cobertura del suelo (*fv*), el índice de área foliar (*IAF*), la biomasa aérea (*Bm*), la altura (*h*) y el coeficiente basal del cultivo (*Kcb*). De los numerosos *IV* que existen (Verstraete y Pinty, 1996; Paz et al., 2007), la mayoría se basa en el alto contraste entre las bandas del rojo (*R*) y el infrarrojo cercano (*IRC*) que presenta la vegetación (Tucker, 1979). Los efectos atmosféricos, la geometría sol-sensor y la mezcla suelo-vegetación son factores que tienen una influencia importante sobre los índices de vegetación. En particular, la variación en el brillo y color del suelo de fondo del cultivo puede introducir errores en la estimación de las variables biofísicas. Para reducir este efecto, se han diseñado diferentes *IV* optimizados, que incluyen parámetros de normalización, específicamente para suelo desnudo, como el índice *GESAVI* (Gilbert et al., 2002) y el *NDVICp* (Paz et al., 2007), cuyo rango de validez está limitado hasta la fase exponencial de los patrones espectrales asociados con el crecimiento de la vegetación (curvas iso-*IAF*). Romero et al. (2009) han generalizado el *NDVICp* para el caso de las fases exponencial y lineal, es decir, hasta el *IAF* máximo, a través del índice *IV_CIMAS*.

Para estimar los requerimientos de agua de los cultivos mediante tecnología satelital, se requiere de un enfoque pragmático, como la aplicación “en dos pasos” de la ecuación de Penman-Monteith (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen et al., 1998). En ella, la evapotranspiración real (*ETc*) se calcula como el producto de dos factores. El primero es un coeficiente de cultivo que refleja las características de la cubierta (*Kc*) y el segundo es el poder evaporativo de la atmósfera o evapotranspiración de referencia (*ETr*). Los *IV* y la curva del coeficiente del cultivo presentan una evolución temporal similar, por lo que se propuso el uso de los *IV* para estimar *Kc* (Heilman et al., 1982). Posteriormente, se ha encontrado la similitud entre la evolución de los *IV* y el *Kcb*, eliminando la variabilidad introducida por la evaporación del suelo de

fondo (Bausch y Neale, 1987 y 1989; Bausch, 1993 y 1995), para ser usada en un contexto operacional de la programación de riegos.

Planteamiento del problema

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

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

La relación (1) se refiere a condiciones promedio de la humedad del suelo, por lo que Wright (1982) propuso el método dual de estimación de *Kc*:

$$Kc = Kcb + Ke \quad (2)$$

donde *Kcb* es el coeficiente basal del cultivo sin estrés, que representa la componente de transpiración y *Ke* es el coeficiente asociado con la evaporación del suelo.

En el caso de cultivos sujetos a estrés hídrico, el coeficiente del cultivo ajustado, *Kca*, está dado por:

$$Kca = (Ks)(Kcb + Ke) \quad (3)$$

donde *Ks* es el coeficiente de estrés hídrico.

El método dual, y su ajuste por estrés hídrico, forman parte de la metodología actual propuesta por el método FAO-56 (Allen et al., 1998) y es la base de la estimación de *ETc*, usando el coeficiente del cultivo. En el caso de FAO-56, la *ETr* ha sido reemplazada por *ETo* y está referenciada a parámetros fijos de una cubierta hipotético de festuca.

FAO-56 ha desarrollado valores de *Kcb* para las etapas de crecimiento inicial (*ini*), media (*med*) y final (*fin*) de distintos cultivos en condiciones estándar (Allen et al., 1998). Para poder utilizar estos valores, es necesario caracterizar el inicio y la duración de las etapas de crecimiento de los cultivos, como se muestra en la figura 1.

Según lo establecido en FAO-56 (Allen *et al.*, 1998), la etapa inicial va desde la fecha de siembra hasta que el cultivo alcanza aproximadamente una $f_v = 10\%$. La etapa de desarrollo del cultivo comprende desde $f_v = 10\%$ hasta que alcanza la cobertura efectiva completa. Dependiendo del tipo de cultivo, la cobertura efectiva completa puede ocurrir al inicio de la floración o cuando algunas hojas en hileras adyacentes empiezan a solaparse, con una f_v entre 70 y 80%, o cuando el $IAF = 3$. La etapa de mediados de ciclo comprende desde la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. Por último, la etapa final del ciclo va desde el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la senescencia completa.

La etapa más crítica en relación con el rendimiento de los cultivos es la de desarrollo del cultivo, hasta un poco después de la floración (Doorenbos y Kassam, 1979), por lo que es sumamente importante establecer el inicio y final de esta etapa. Los criterios de inicio ($f_v = 10\%$) y final (f_v entre 70 y 80%, $IAF = 3$ o inicio de la floración) establecidos por FAO-56 para esta etapa resultan objetivos en apariencia; sin

embargo, en términos operacionales, resulta difícil su estimación.

Para caracterizar la etapa de desarrollo del cultivo mediante la tecnología de los sensores remotos, se requieren establecer criterios objetivos, bajo la restricción de usar sólo información espectral (reflectancias). Un caso a considerar en este tipo de 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 umbrales fijados por FAO-56.

En este trabajo se revisan los criterios usados por FAO-56 para definir la etapa de desarrollo vegetativo de los cultivos, usando 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 tales análisis es el establecimiento en forma objetiva —en particular para el uso de sensores remotos— de una definición operacional del inicio y final de la etapa de desarrollo del cultivo.

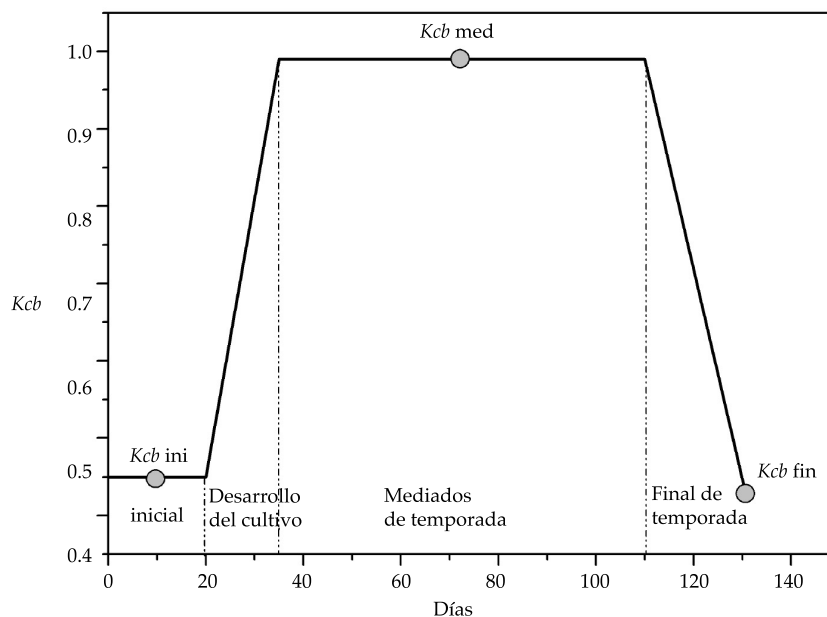


Figura 1. Etapas de desarrollo de los cultivos y los K_{cb} asociados según FAO-56.

Materiales y métodos

Se analizaron los patrones temporales de variables biofísicas y espectrales de cultivos con densidades foliares diferentes: alta y media. Como cultivo con densidad foliar alta se estableció un experimento de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* L.), variedad Moench cv. H-133, para producción de biomasa. Para los cultivos con densidad foliar media, algodón (*Gossypium hirsutum* L.) y maíz (*Zea mays* L.), se utilizaron datos de experimentos publicados en los trabajos de Huete et al. (1985) y Bausch (1993). Además, se analizó la asociación de estos patrones temporales con el *Kcb* medido para el caso del cultivo de alta densidad.

Cultivos con densidad foliar media: algodón y maíz

En los cultivos con densidad foliar media se cuenta con valores medidos de las variables *Bm*, *IAF*, *h* y *fv*. También se tienen medidas radiométricas de la cubierta sobre diferentes suelos de fondo. Paz et al. (2005, 2007) y Romero et al. (2009) han analizado con detalle

los patrones espectrales de estos cultivos para el desarrollo de *IV*. Bausch (1993 y 1995) y Neale et al. (1989) han desarrollado relaciones lineales del *Kcb* con los *IV* para maíz. Desafortunadamente, en el caso de maíz y algodón no se cuenta con datos de *Kcb* medidos en un lisímetro, por lo que no se hace un análisis tan detallado como en el caso del sorgo, al no poder evaluar los errores en las estimaciones de *Kcb*.

Cultivo con densidad foliar alta: sorgo para producción de biomasa cv. H-133

Las medidas espectrales y de variables biofísicas (*Bm*, *h* y *fv*) del sorgo, se realizaron en el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, en España, con coordenadas geográficas: 2° 5' 10" longitud oeste, 39° 14' 30" latitud norte y altitud sobre el nivel del mar de 695 m (figura 2). 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) (Thorntwaite, 1948), con temperaturas medias del mes más frío (enero)

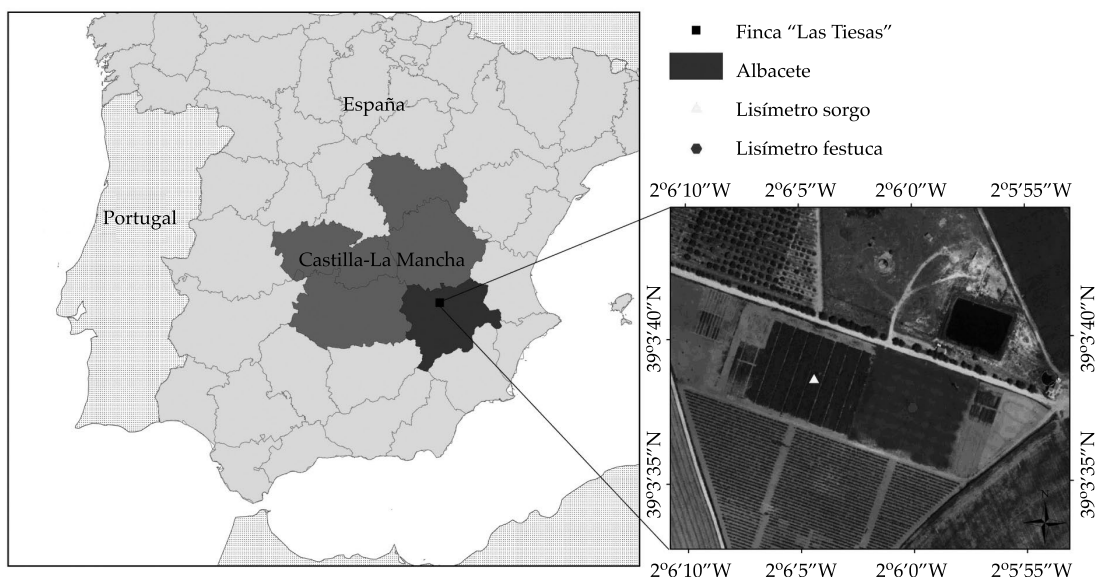


Figura 2. Localización geográfica del sitio experimental para el cultivo de sorgo.

de 4-5 °C y del mes más cálido (julio) de 24 °C, aproximadamente. La precipitación media anual es 320 mm año⁻¹. Según el *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2006), el suelo de la parcela experimental se cataloga como *petrocalcic calcixerepts*. La profundidad media del suelo es de 40 cm, limitado por el desarrollo de un horizonte petrocálcico que se encuentra más o menos fragmentado. La textura es franco arcillo limosa (13.42%, arena; 48.89%, limo; 37.69%, arcilla), pH básico, pobre en materia orgánica y en nitrógeno total, con un alto contenido en caliza activa y potasio.

Las mediciones de las variables biofísicas se realizaron 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 provisto de un sistema automatizado de riego por aspersión de cobertura total enterrada. Con este sistema se mantuvo un contenido de agua en el suelo próximo a la capacidad de campo. Asimismo, se realizó una fertilización de 60 kg de N ha⁻¹ durante el periodo vegetativo, que resulta adecuada para el cultivo; además, se aplicaron 1.8 l·ha⁻¹ de herbicida MCPA para el control de malezas y se realizaron dos aplicaciones de clorpirifos 48% (3.2 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 en la parcela de protección, para que las mediciones de evapotranspiración fueran representativas.

Las dimensiones del recipiente del lisímetro son de 2.3x2.7 m de lado y 1.7 m de profundidad, con una masa total de 14.5 Mg. La precisión de la celda de carga es de 250 g, lo que equivale a 0.04 mm de agua. Las mediciones lisimétricas se obtuvieron cada 15 min en un sistema de registro automático. También se registraron las medias horarias y diarias. Estas mediciones se revisaron a escala diaria, 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 la medida directa y fiable de la evapotranspiración real del sorgo para las condiciones climáticas de la zona.

El sorgo dulce es un híbrido de ciclo mediotardío, con gran capacidad de adaptación a climas áridos y semiáridos, y que alcanza rendimientos medios de 20 a 30 t de materia seca ha⁻¹ y una altura promedio de cuatro metros. La siembra se llevó a cabo el 23 de mayo y la cosecha el 8 de octubre de 2007. La densidad de siembra fue de 20 semillas m⁻², con un marco de plantación de 50 x 10 cm. La densidad final de plantas fue de unas 115 000 plantas ha⁻¹. El cuadro 1 presenta la fenología del cultivo de sorgo.

Las medidas espectrales se hicieron con un radiómetro HR4000^{MR}, fabricado por Ocean Optics, Inc., en Florida, Estados Unidos, el cual usa un intervalo efectivo de medición de longitudes de onda que va de 200 a 1 100 nm. En el rango de 400 a 900 nm, el ancho de banda es de 0.25 a 0.26 nm, con 1 757 canales. Fuera de este rango, el ruido es muy elevado.

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 del radiómetro varió de 4 a 5.8 m sobre el suelo, lo cual permite un círculo de observación de 0.7 y 1.0 m de diámetro, respectivamente, para un ángulo de visión instantáneo de 10°. Siguiendo la metodología propuesta por Milton (1987), se hizo un seguimiento periódico del cultivo, tomando las mediciones espectrales a nadir y en horario de máxima elevación solar. Para el diseño experimental, se realizó un transecto de seis medidas dentro y fuera del lisímetro, a fin de garantizar la representatividad de la cubierta vegetal. El transecto se trazó en dirección norte-sur, evitando sombrear la superficie medida (Jackson *et al.*, 1980). Para evitar que la configuración de iluminación variara, las medidas de la cubierta vegetal y el panel de referencia (*Spectralon*^{MR}) se llevaron a cabo con rapidez, tomando una medida del blanco de referencia al inicio de cada transecto (McCoy, 2005).

La información espectral se procesó utilizando un promedio móvil de 13 datos, centrado en la longitud de onda de análisis. La ventana de datos de 758-762 nm fue descartada por presentar ruidos extremos. Las medidas hiperspectrales tomadas en campo fueron integradas a las bandas del sensor Landsat 5TM.

La cobertura vegetal (*fv*) se estimó mediante la técnica de clasificación supervisada de fotografías digitales tomadas a nadir sobre la cubierta en los puntos donde se hicieron las medidas espectrales (Calera *et al.*, 2001). La clasificación hecha con el programa ENVI^{MR}, versión 4.1, separó los píxeles de vegetación verde y de suelo desnudo.

La biomasa se estimó 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 el peso seco. El rendimiento de cosecha fue de 22 374 Kg ha⁻¹ de biomasa seca.

Modelación de los patrones temporales de las variables biofísicas y espectrales

Los sensores remotos proporcionan una secuencia multi-temporal de datos multi-

espectrales, que pueden simplificarse en patrones temporales de *IV*. Esta información puede ser usada de forma objetiva, al relacionarla con modelos dinámicos que tengan una base biofísica.

El modelo expo-lineal de Goudriaan y Van Laar (1994) modela en forma gradual la transición de una fase exponencial a una lineal, por lo que resulta atractivo de utilizar. 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 (*IAF*, *fv*, *h*); *r*, una tasa relativa de crecimiento; *C*, 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.

Las características del modelo se presentan en la ecuación (5):

$$V(t = t_T) = \frac{C}{r}$$

$$t_T = t_L + \frac{0.541}{r} \quad (5)$$

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

El modelo tiene bases biofísicas para modelar el *IAF* (aproximación de medio homogéneo en términos físicos y de medio turbio en términos radiativos) (Ferrandino, 1989). Esta ecuación ha sido extendida para biomasa aérea, usando una relación lineal entre el *IAF* y *Bm* (Goudriaan y Monteith, 1990).

El modelo expo-lineal se ajusta a la dinámica del crecimiento del follaje de los cultivos (Goudriaan y Van Laar, 1994). Al inicio del crecimiento, cada hoja nueva contribuye al crecimiento, interceptando radiación en forma potencial, porque no hay limitación de espacio (sombras). En este periodo o fase exponencial, la tasa relativa de crecimiento (*r*) es constante.

Al continuar el crecimiento de la vegetación, las hojas comienzan a auto-sombrearse. Una vez que se ha alcanzado un valor umbral

máximo, la contribución de las hojas nuevas en la captura de radiación es marginal. Este punto es el comienzo de la fase lineal del crecimiento, cuando el cultivo alcanza la tasa de crecimiento máxima ($C = rV$). Aquí, la densidad foliar se mantiene constante a escala de planta; en cambio, el IAF continúa creciendo a escala de parcela (población de plantas) hasta llegar a su límite máximo, asociado con un cambio fenológico: la floración.

El modelo expo-lineal de la relación (4) no tiene límite superior; por tanto, para un valor máximo, V_{mx} requiere ser truncado, denominándose 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 modelarse en forma similar que el caso de la transición exponencial a la lineal (Goudriaan, 1994); aunque el modelo es un sigmoideo simétrico, se puede generalizar a uno asimétrico, con una pérdida de interpretación biofísica (Yin et al., 2003). Los modelos expo-lineales y sus generalizaciones utilizan la hipótesis de medios ambientes relativamente similares (principalmente la radiación). El modelo expo-lineal asimétrico (ELA) (Yin et al., 2003) está dado por:

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

El Kcb es función principalmente de la altura del cultivo, del albedo y de la resistencia aerodinámica del cultivo (Allen et al., 1998). Esta última depende del área foliar (cantidad de estomas), edad, condición y grado de control estomático de las hojas. En consecuencia, el inicio de la etapa de desarrollo vegetativo, en función de la cobertura efectiva de los cultivos, puede definirse como el punto donde $t = t_r$, ya sea asociado con la fv , IAF o un índice espectral. Este punto define los requerimientos de agua necesarios para mantener la tasa máxima de crecimiento. El fin de esta etapa, donde se

presenta la cobertura efectiva completa, es cuando la fase lineal termina. Esta definición objetiva y fisiológica de la etapa de desarrollo del cultivo es independiente de los valores particulares del IAF y fv asociados, ya que éstos varían en función de la densidad de siembra principalmente (Ball et al., 2000).

Modelación de los patrones espectrales del crecimiento de los cultivos

Los patrones espectrales en el espacio del R - IRC , asociados con el crecimiento del cultivo, pueden utilizarse para desarrollar índices de vegetación óptimos (Gilbert et al., 2002; Paz et al., 2007; Romero et al., 2009). La figura 3a muestra simulaciones radiativas asociadas con el incremento del IAF , usando diferentes propiedades ópticas (reflectancias) de los suelos. Paz et al. (2005) hace una descripción detallada de estas simulaciones. Se observa que las curvas iso-suelo, formadas por vegetación creciendo sobre propiedades ópticas constantes del suelo, convergen hasta un punto (ápice del "sombrero de tres picos"), donde la reflectancia del R no cambia, porque se ha saturado. Este punto representa un medio ópticamente denso o de reflectancia en el infinito (R_∞) (Ross, 1981).

Las bandas del espectro visible (azul, verde y rojo) se saturan antes que las del IRC debido a su función fotosintética. El IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio punto de saturación (IRC_∞). El valor del IRC asociado al punto de saturación de la banda del R es IRC_{R_∞} . Al analizar la figura 3a para una cantidad de vegetación constante (curvas iso- IAF , iso- Bm , iso- h o iso- fv), pero con diferentes propiedades del suelo (textura, materia orgánica, óxidos de hierro o humedad), se pueden definir líneas rectas con parámetros a_0 y b_0 (constante aditiva y multiplicativa, respectivamente). Estos parámetros 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

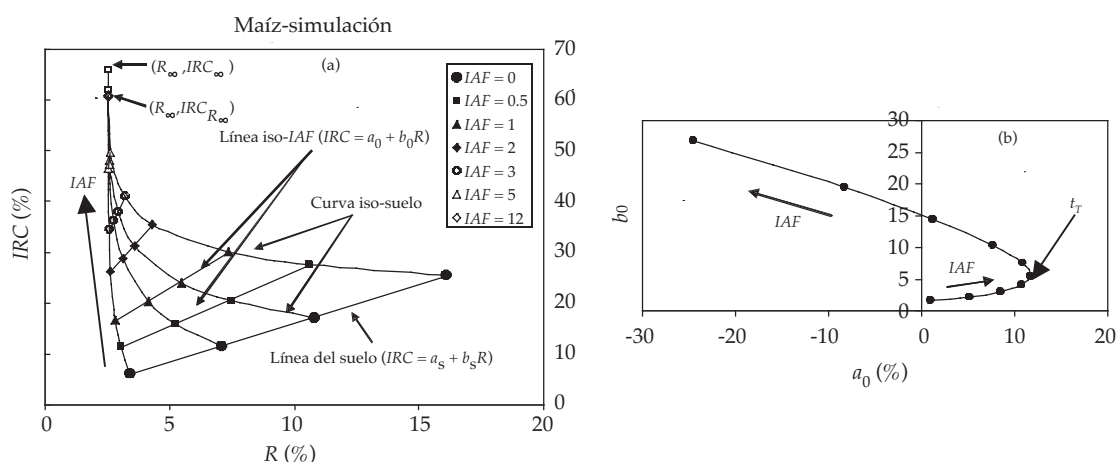


Figura 3. (a) Representación en el espacio del R e IRC de la reflectancia (%) de distintos niveles de cubierta vegetal (IAF) simulada, variando las propiedades del suelo de fondo. Se indica la línea de suelo ($IRC = a_s + b_s \cdot R$), así como las líneas iso-IAF ($IRC = a_0 + b_0 \cdot R$); (b) espacio a_0 - b_0 de los parámetros de las líneas iso-IAF asociadas.

saturación de las bandas del R e IRC (línea recta sobre el ápice del sombrero de tres picos).

La figura 3b presenta el patrón asociado con los parámetros a_0 - b_0 para distintos valores de IAF. Se observa que para valores del IAF menores que dos, la relación es de tipo exponencial, y para valores del IAF mayores que 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 puede asociarse con los modelos expo-lineales discutidos. Así, la transición entre el patrón exponencial al lineal establece el punto cuando $t = t_r$.

El índice de vegetación NDVI [(IRC - R)/(IRC + R)] (Rouse et al., 1974) trata de aproximar los cambios de las variables biofísicas asociados con cambios en la pendiente de las líneas de igual vegetación (iso-IAF), suponiendo un origen común de todas las líneas en (0, 0). Paz et al. (2007) proponen el índice NDVIcp, que aproxima la parte exponencial entre a_0 y b_0 mediante una línea recta en el espacio transformado $a_0 - 1/b_0$. El NDVIcp queda definido como:

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

$$\frac{1}{b_0} = c + da_0 \quad (7)$$

donde c y d son constantes empíricas.

Posteriormente, Romero et al. (2009) propusieron el uso de los patrones del crecimiento espectral para modelar el patrón completo de la figura 3b (pendientes b_0 y β) mediante el índice IV_CIMAS. Este índice modela la fase exponencial mediante el NDVIcp. Para aproximar la fase lineal hasta un poco después de la transición a la exponencial utiliza un espacio transformado $a_1 - \beta$ (Paz et al., 2005) (ecuación (8)). De esta forma, se define una relación lineal, donde q y r son constantes empíricas (ecuación (9)):

$$\beta = \frac{90 - \arctan(b_1)}{45}$$

$$b_1 = \frac{b_0}{b_0 - b_s} \quad (8)$$

$$a_1 = a_0(1 - b_1) + a_s b_1$$

$$\beta = q + r a_1 \quad (9)$$

El índice IV_CIMAS se define como:

$$IV_CIMAS = NDVI_{cp}(b_0), \text{ si } \beta \leq \beta_c$$

$$IV_CIMAS = NDVI_{cp}(\beta), \text{ si } \beta > \beta_c \quad (10)$$

donde β_c es un valor umbral; por lo general, $\beta_c = 0.25$. El $NDVI_{cp}(\beta)$ se estima de la relación entre b_0 y β de la relación (8) y la relación (7) del $NDVI_{cp}$ con b_0 . El índice β se estima usando los valores del R e IRC medidos en campo (Romero et al., 2009), al igual que el $NDVI_{cp}(b_0)$.

Resultados y discusión

En este apartado se analiza la dinámica asociada con las variables biofísicas y espectrales de los cultivos con densidad media (algodón y maíz) y alta (sorgo dulce), así como la asociación de los patrones temporales y sus transiciones, con los Kcb medidos para el cultivo de alta densidad.

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 minimizada. Para esto se utilizó la función $SOLVER^{MR}$ del *software Excel*^{MR}. La figura 4 muestra el ajuste estadístico de los dos modelos expo-lineales a la variable IAF del cultivo de 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. En general, ambos modelos expo-lineales presentaron un buen ajuste estadístico y representan la dinámica del

crecimiento asociada con el IAF .

Del análisis de los parámetros del cuadro 2, las estimaciones de t_T usando el IAF y el IV_CIMAS resultan muy cercanas entre sí, lo cual expresa que el IV_CIMAS ha sido diseñado con base en una relación lineal con el IAF , con origen en 0 (Romero et al., 2009). En el caso de la f_v , los valores de t_T son diferentes a los del IAF e IV_CIMAS . Esto puede explicarse debido a que la f_v es función de un corte bidimensional del follaje (vista aérea), a diferencia del IAF y el IV_CIMAS , que lo considera en términos tridimensionales. Así, en términos de Kcb , el uso de f_v tiene limitaciones en relación con 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 con el punto $t = t_T$ tienen valores que van de 0.91 (maíz) a 2.47 (algodón), reflejando la arquitectura del cultivo y su densidad de siembra, por lo que resulta inestable considerar un valor umbral arbitrario para definir la cobertura completa efectiva. Algo similar ocurre para el caso de f_v (algodón y sorgo), e IV_CIMAS asociados con el punto $t = t_T$.

En el cuadro 2 se observan algunas diferencias entre los parámetros de los modelos ELT y ELA , reflejando las hipótesis con que fueron desarrollados. Considerando los errores de los ajustes (RECM), el modelo ELA no mejora substancialmente las estimaciones, por

Cuadro 2. 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	V_{mx}	RECM
Maíz	f_v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	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	f_v	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	f_v	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

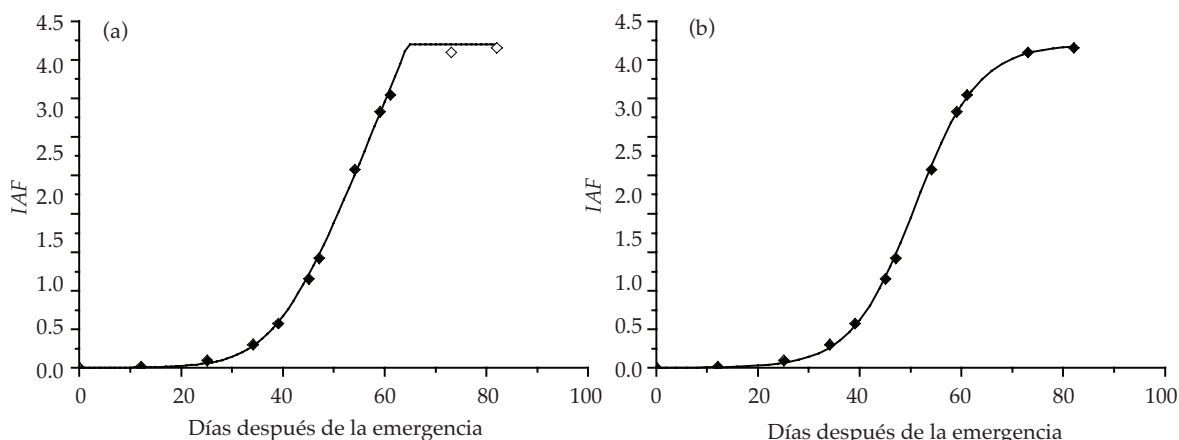


Figura 4. Ajuste de los modelos expo-lineales al experimento de maíz y la variable IAF: (a) modelo ELT y (b) modelo ELA. Los círculos rellenos representan los puntos usados en los ajustes estadísticos de los modelos.

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 previo al valor máximo de la variable biofísica o espectral de interés.

Las variables biofísicas fv e IAF son función del follaje “verde” de los cultivos, por lo que resulta difícil su modelación en el nivel de curva de crecimiento completa, dada la presencia de hojas parcialmente verdes o amarillentas en la etapa de senescencia. Por otra parte, sólo incorporan criterios de cantidad y no consideran las propiedades de la hoja como el 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, según lo establecido por Yoshioka *et al.* (2000) en la ecuación (11):

$$a_0 = fvIRCv + a_s [fvT_{IRC}^2 + (1 - fv)] - fvRvb_0$$

$$b_0 = b_s \left(\frac{fvT_{IRC}^2 + (1 - fv)}{fvT_R^2 + (1 - fv)} \right) \quad (11)$$

donde Rv e $IRCv$ corresponden a las reflectancias de la vegetación sobre un suelo de fondo negro (totalmente absorbente) y T son las transmitancias de la vegetación. Los parámetros a_s y b_s son las constantes de la línea del suelo (figura 3a).

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

$$T_R = \exp\left\{(1 - \omega_R)^{1/2} K_R \cdot IAF\right\}$$

$$T_{IRC} = \exp\left\{(1 - \omega_{IRC})^{1/2} K_{IRC} \cdot IAF\right\} \quad (12)$$

donde ω es el albedo foliar (reflectancia más transmitancia) y K es un coeficiente de extinción global (radiancia directa y difusa).

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

$$Rv \approx R\infty - R\infty T_R^2$$

$$IRCv \approx IRC\infty - IRC\infty T_{IRC}^n \quad (13)$$

donde n generalmente vale 1.0. Las reflectancias en el infinito se muestran en la figura 3a y pueden ser estimadas de acuerdo con las ecuaciones (14) y (15) (Goudriaan, 1977):

$$R\infty = qR\infty, h$$

$$q = \frac{2Kdir, n}{Kdir, n + Kdif, n} \quad (14)$$

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

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

Los desarrollos mostrados implican que el IV_CIMAS es función de la cantidad de área foliar (IAF), de su distribución espacial global (fv) y en las plantas (K), de las propiedades ópticas de las hojas (ω) y del suelo de fondo (parámetros a_s y b_s de la línea del suelo). De acuerdo con esto, el IV_CIMAS representa mejor 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 fv es función implícita de K , por lo que para un mismo IAF pueden obtenerse valores diferentes de fv , dependientes de K .

Aproximaciones a la modelación del Kc del método FAO-56

Los valores diarios de la evapotranspiración del sorgo dulce se calcularon según lo establecido en FAO-56 (Allen et al., 1998): $ET_c = ET_o^* Kc$, donde ET_o es la evapotranspiración de referencia en $mm\ día^{-1}$ y Kc el coeficiente de cultivo. La ET_o se calculó utilizando la ecuación de Penman-Monteith FAO-56, que es la que mejor se adapta a la zona de trabajo (López-Urrea et al., 2006). Los datos climáticos utilizados se tomaron de una estación meteorológica situada en el área del lisímetro.

La evapotranspiración del sorgo dulce se estimó a partir de los datos de peso del lisímetro, donde se usaron datos horarios para obtener el valor 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 las siguientes: 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 5 muestra la ET_c calculada y los eventos de riego/lluvia durante el ciclo de crecimiento del sorgo.

De las estimaciones de Kc a nivel diario, se utilizó una ventana móvil de cinco días y dentro de ésta se seleccionó el valor más bajo para representar Kcb , que corresponde al límite inferior de Kc (relación 2). Estos datos fueron revisados a detalle en relación con sus vecinos, para finalmente seleccionar los valores de Kcb utilizados en los análisis siguientes.

Para evaluar el inicio y fin de la etapa de desarrollo del cultivo se analizaron tres métodos: FAO-56-Cobertura, que inició cuando $fv = 10\%$ y terminó cuando $fv = 75\%$; FAO-56-Floración, que comenzó con $fv = 10\%$ y terminó con el inicio de la floración; IV_CIMAS , que inició cuando $t = t_T$ y terminó cuando $t = t_{máx}$, tiempo cuando se presenta el máximo.

Usando la información de Kc (Doorenbos y Kassam, 1979) y Kcb (Allen et al., 1998), se estimaron los Kcb del sorgo dulce de FAO-56, corregidos por la humedad relativa, velocidad del viento y altura del cultivo medida en campo (Allen et al., 1998). El cuadro 3 muestra los parámetros utilizados para las etapas de crecimiento del sorgo, definidas por un valor de Kcb para un tiempo dado (días después de la emergencia o DDE).

La figura 6 muestra el Kcb medido por lisimetría y el estimado por dos métodos, FAO-56-Cobertura y FAO-56-Floración, usando los valores del cuadro 3. En la figura 7 se observa el Kcb estimado por el método del IV_CIMAS .

Usando solamente los Kcb de la etapa de desarrollo vegetativo, se analizó el error de las estimaciones por los tres métodos (Kcb ,

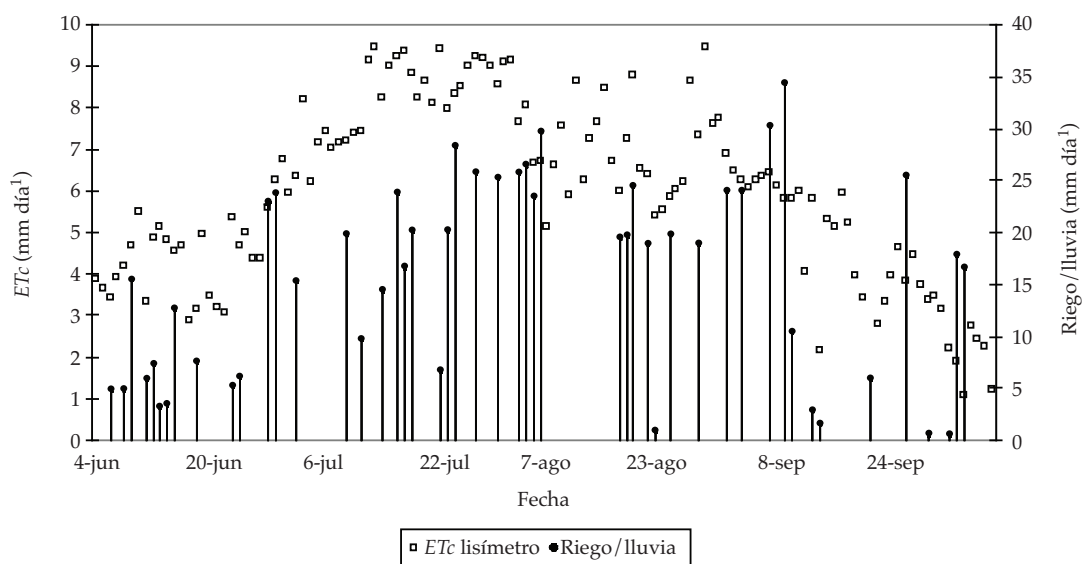


Figura 5. Variación temporal de la ET_c y los eventos de riego/lluvia del experimento de sorgo.

Cuadro 3. DDE para las etapas de crecimiento del sorgo.

Etapa	Variable	FAO-56-cobertura	FAO-56-floración	IV_CIMAS
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

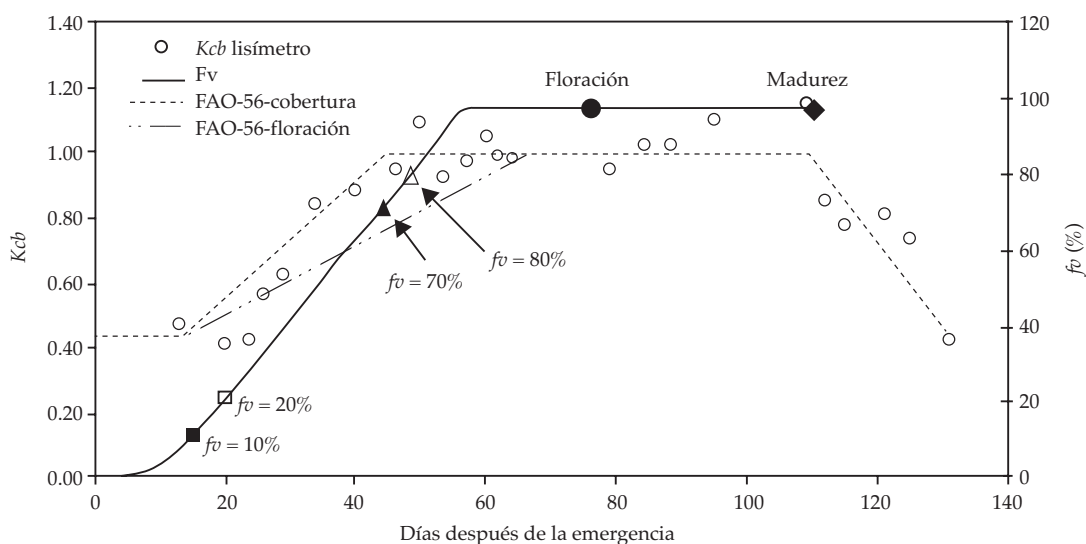


Figura 6. Estimación de K_{cb} por los métodos FAO-56 de cobertura y floración, comparados en relación del K_{cb} medido por lisimetría.

método), en relación con las mediciones del lisímetro (K_{cb} , lisímetro) de acuerdo con la relación:

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

Otras medidas de error utilizadas fueron la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el error relativo medio (ERM). El cuadro 4 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 aprecia en las figuras 6 y 7.

Conclusiones

La modelación temporal de las variables biofísicas y espectrales (IAF , f_v e IV_CIMAS) de

los tres cultivos analizados presentó un buen ajuste estadístico, utilizando los modelos exponenciales truncado (ELT) y asimétrico (ELA). 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. La f_v , en términos de K_{cb} , presenta limitaciones en la estimación de la evapotranspiración, al ser una medida limitada de la cantidad de estomas foliares. El IV_CIMAS 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 (ω) y del suelo de fondo de la vegetación (parámetros a_s y b_s de la línea del suelo).

Cuadro 4. Errores de estimación de K_{cb} de los tres métodos.

Método	a	b	R^2	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

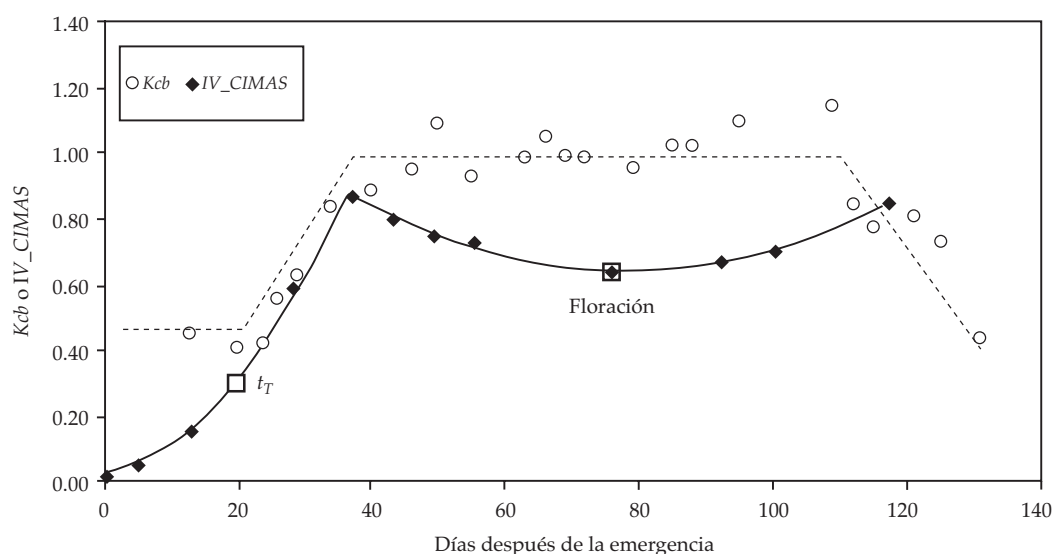


Figura 7. Estimación de K_{cb} por el método del IV_CIMAS , comparado con el K_{cb} medido por lisimetría.

Respecto a los modelos expo-lineales, los errores de los ajustes (RECM) muestran que el modelo ELA no mejora de forma substancial la estimación de los parámetros; por tanto, el modelo ELT resulta una mejor opción, porque no requiere del valor máximo de la variable biofísica o espectral de interés, consideración importante para el uso operativo de los sensores remotos.

En la perspectiva del 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 coeficiente de correlación más alto (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 tres métodos, lo que demuestra que en cultivos de densidad foliar alta, el uso de variables como la *fv* o el *IAF* son de difícil aplicación, ya que estos cultivos alcanzan con rapidez los valores críticos.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al programa de becas mixtas Conacyt, la Sección de Teledetección y SIG de la Universidad de Castilla-La Mancha, el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete y los proyectos ACELT (agl2009-13124), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, y PPII10-0319-8732, financiado por la Consejería de Educación y Ciencia de España.

Recibido: 05/08/10

Aceptado: 13/09/12

Referencias

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., and SMITH, M. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO, 1998, 298 pp.
- BALL, R.A., PURCELL, L.C., and VORIES, E.D. Optimizing soybean plant population for a short-season production system in the Southern USA. *Crop Science*. Vol. 40, 2000, pp. 757-764.
- BAUSCH, W.C. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 46, 1993, pp. 213-222.
- BAUSCH, W.C. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management*. Vol. 27, 1995, pp. 55-68.
- BAUSCH, W.C. and NEALE, C.M.U. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Transaction of the ASAE*. Vol. 30, 1987, pp. 703-709.
- BAUSCH, W.C. and NEALE, C.M.U. Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling. *Transaction of the ASAE*. Vol. 46, 1989, pp. 1901-1908.
- BONHOMME, R. and VARLET-GRANCHER, C. Application aus couverts vegetaux de lois rayonnement en milieu diffusant I Etablissement des lois et verifications experimentales. *Annales d'Agronomie*. Vol. 28, 1977, pp. 567-582.
- CALERA, A., MARTÍNEZ, C. and MELIÁ, J. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 22, 2001, pp. 3357-3362.
- CALERA, A., JOCHUM, A.M., CUESTA, A., MONTORO, A., and LÓPEZ-FUSTER, P. Irrigation management from space: towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*. Vol. 19, 2005, pp. 337-353
- DOORENBOS, J. and KASSAM, A.H. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome: FAO, 1979, 193 pp.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper. Vol. 24. Rome: FAO, 1977, 179 pp.
- FERRANDINO, F.J. Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield. *Agriculture and Forest Meteorology*. Vol. 47, 1989, pp. 273-289.
- GILBERT, M.A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., GARCÍA-HARO, F.J., and MELIÁ, J. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* Vol. 82, 2002, pp. 303-310.
- GOUDRIAAN, J. *Crop micrometeorology. A simulation study*. Simulation Monographs. Wageningen, The Netherlands: PUDOC, 1977, 259 pp.
- GOUDRIAAN, J. *Using the expolinear growth equation to analyze resource capture*. In: *Resource Capture by Crops*. Monteith, J.L., Scott, R.K., and Unsworth, M.H. (editors). Nottingham University Press. Nottingham, 1994, pp. 99-110.
- GOUDRIAAN, J. and MONTEITH, J.L. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Annals of Botany*. Vol. 66, 1990, pp. 695-701.
- GOUDRIAAN, J. and VAN LAAR, H.H. *Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises*. Current Issues in Production Ecology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994, 238 pp.

- HEILMAN, J.L., HEILMAN, W.E., and MOORE, D.G. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*. Vol. 74, 1982, pp. 967-971.
- HUETE, A.R., JACKSON, R.D., and POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 17, 1985, pp. 35-53.
- JACKSON, R.D., PINTER, P.J., REGINATO, R.J., and IDSO, S.B. *Hand-held radiometry. A set of notes developed for use at the workshop on hand-held radiometry*. US Department of Agriculture. Agricultural Reviews and Manuals Phoenix, Arizona, February 25-26, 1980, 66 pp.
- LÓPEZ-URREA, R., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F., FABEIRO, C., and MORATALLA, C. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. Vol. 85, 2006, pp. 15-26.
- LÓPEZ-URREA, R., MONTORO, A., LÓPEZ-FUSTER, P., and FERERES, E. Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli. *Agricultural Water Management*. Vol. 96, 2009, pp. 1155-1161.
- MCCOY, R.M. *Fields methods in remote sensing*. New York/ London: The Guilford Press, 2005, 159 pp.
- MILTON, E.J. Principles of field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 8, No. 12, 1987, pp. 1807-1827.
- PAZ, F., PALACIOS, E., MEJÍA, E., MARTÍNEZ, M. y PALACIOS, L.A. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia*. Vol. 39, núm. 3, 2005, pp. 293-301.
- PAZ, F., PALACIOS, E., BOLAÑOS, M., PALACIOS, L.A., MARTÍNEZ, M., MEJÍA, E. y HUETE, A. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia*. Vol. 41, núm. 5, 2007, pp. 539-554.
- ROMERO, E., PAZ, F., PALACIOS, E., BOLAÑOS, M., VALDEZ, R. y ALDRETE, A. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia*. Vol. 43, núm. 3, 2009, pp. 291-307.
- ROSS, J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. Norwell, USA: W. Junk, 1981, 391 pp.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W., and HARLAN, J.C. *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, MASA/GSFC, Type III. Final Report*. Greenbelt, 1974, pp. 1-371.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. Vol. 38, 1948, pp. 55-94.
- TUCKER, C.J. Red and photographics infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 8, 1979, pp. 127-150.
- VERSTRAETE, M.M. and PINTY, B. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE transactions in Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 34, 1996, pp. 1254-1265.
- WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage*. Vol. 108, 1982, pp. 57-74.
- YIN, X., GOUDRIAAN, J., LATINGA, E.A., VOS, J., and SPIERTZ, H.J. A flexible sigmoid function of deterministic growth. *Annals of Botany*. Vol. 91, 2003, pp. 361-371.
- YOSHIOKA, H., MIURA, T., HUETE, A.R., and GANAPOL, B.D. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 74, 2000, pp. 313-326.

Abstract

ODI-LARA, M., PAZ-PELLAT, F., LÓPEZ-URREA, R. & GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. Definition of crop development stage to estimate evapotranspiration using FAO-56 approach and remote sensing. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 3, July-August, 2013, pp. 87-102.

This study analyzed the temporal patterns of biophysical and spectral variables - such as leaf area index (LAI), aerial cover (f_v) and vegetation index cinematically modified and adjusted for soil (IV_CIMAS) - in crops with medium leaf density (cotton and corn) and high leaf density (sorghum). In the case of sorghum, the relationship was analyzed between these temporal patterns and the baseline crop coefficient (Kcb). The variables f_v , LAI and IV_CIMAS were modelled using truncated (ELT) and asymmetric (ELA) exponential models. While both models showed a good statistical fit for the three crops, the ELT model was more suitable because it did not require the maximum value of the variable. Of the three variables modelled, IV_CIMAS better represented the quantity and quality of the foliage for a pixel or parcel, since it is a function of the leaf area, spatial foliar distribution and optical properties of leaves and background soil. In order to estimate crop evapotranspiration according to FAO-56, three different methods were analyzed, which characterize the developmental stages of the sorghum crop. The methods defined the length of this stage based on ground cover, the flowering stage and uses spectral information (IV_CIMAS). The analysis of errors (RMSE and ERM) for the Kcb estimates of the vegetation development stage was conducted using the three methods, in comparison to Kcb estimates obtained with a weighing lysimeter. The best results were found for the IV_CIMAS method and the worst corresponded to FAO-56-Flowering.

Keywords: vegetation indexes, basal crop coefficient, development crop stage, exponential model.

Dirección institucional de los autores

M.C. Magali Odi Lara

Colegio de Postgraduados
Km 36.5 carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1151
olmaria@colpos.mx
MariaMagali.Odi@uclm.es

Dr. Fernando Paz Pellat

Colegio de Postgraduados
Km 36.5 carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1151
pellat@colpos.mx
ferpazpel@hotmail.com

Dr. Ramón López Urrea

Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete
Avenida Gregorio Arcos s/n
02006 Albacete, ESPAÑA
Teléfono: +34 (967) 190 090
Fax: +34 (967) 240 031
rlu.itap@dipualba.es

Dr. José González Piqueras

Universidad de Castilla-La Mancha
Campus universitario s/n
02071 Albacete, ESPAÑA
Teléfono: +34 (967) 599 200, extensión 2625
jose.gonzalez@uclm.es