

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-03-08

Artículos

Asistencia satelital en riego usando el método dual de FAO-56: alcances y limitaciones

Satellite-assisted irrigation using the FAO-56 dual method: Scope and limitations

Fernando Paz-Pellat¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6697-2238>

Martín Alejandro Bolaños-González², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8110-1051>

¹GRENASER, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, México, ferpazpel@gmail.com

²Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, México, bolanos@colpos.mx

Autor para correspondencia: Martín Alejandro Bolaños-González, bolanos@colpos.mx

Resumen

La estimación de los requerimientos de agua de los cultivos usando el método dual de FAO-56 necesita de la parametrización del coeficiente del cultivo (K_c) en forma robusta y confiable. El uso de sensores

remotos, a través de índices de vegetación (IV), para definir una relación con K_c es una tarea que debe ser entendida en función de sus alcances y limitaciones. En este trabajo se pone en perspectiva qué es lo que estiman los IV en relación con los K_c , definiendo que su uso está limitado a no considerar el efecto de la humedad del suelo en estos últimos. Usando el índice IV_CIMAS y su aplicación a dos experimentos (maíz y trigo) con mediciones de evapotranspiración en lisímetros se analizan las relaciones de índice con K_c , a fin de establecer una metodología para parametrizar sus relaciones en forma sólida, usando los inicios y finales de las etapas de desarrollo de los cultivos por medio de un modelo expo-lineal del crecimiento. Las relaciones obtenidas en la parametrización resultaron en buenos ajustes ($R^2 > 0.96$).

Palabras clave: KIMO SAVI, medio radiativo equivalente, maíz y trigo, coeficiente de cultivo.

Abstract

The estimation of water requirements of crops using the FAO-56 dual method needs a robust and reliable parameterization of the crop coefficient (K_c). The use of remote sensing through vegetation indices (VI) to define a relationship with K_c is a task that requires an understanding of the scope and limitations of each. This paper sets the perspective about estimates based on VI relative to those based on K_c , noting that the latter is rather limited for not considering soil water content. Using the KIMO SAVI index and its application to two experiments (maize and wheat) with evapotranspiration measurements using lysimeters, the relationship of this index with K_c is analyzed aiming to establish a methodology for a solid

parametrization of the relationships between these two approaches, using the beginning and end of the crop development stages with an expo-linear growth model. The relationships obtained in this parameterization yielded a good fit ($R^2 > 0.96$).

Keywords: KIMO SAVI, equivalent radiative media, corn and wheat, crop coefficient.

Recibido: 05/08/2020

Aceptado: 04/05/2021

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, Jochum, Cuesta, Montoro, & Fuster, 2005). La problemática asociada con las estimaciones satelitales de la evapotranspiración actual de los cultivos (ET_c) para definir los requerimientos de agua de los cultivos necesita enfoques pragmáticos, pero sólidamente fundamentados en teoría y evidencia experimental.

La tecnología de los sensores remotos permite el seguimiento del crecimiento y desarrollo de la vegetación a través de las relaciones teóricas o empíricas estimadas entre las variables biofísicas de los

cultivos y los índices espectrales de vegetación (IV), de los cuales existe una gran cantidad (Verstraete & Pinty, 1996; Paz *et al.*, 2015).

La gran 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 múltiples factores, incluyendo los efectos atmosféricos, la geometría sol-sensory y la mezcla suelo-vegetación. En particular, el efecto del suelo (fondo de la vegetación) es relevante para estimar las variables biofísicas y el coeficiente del cultivo. Se han utilizado diferentes IV que minimizan el efecto del suelo, tales como los índices *GESAVI* (Gilabert, González-Piqueras, García-Haro, & Meliá, 2002) y *NDVI_{cp}* (Paz *et al.*, 2007), cuyo rango de validez está limitado a la primera fase exponencial de los patrones espectrales asociados con el crecimiento de la vegetación (líneas iso-*IAF*). Romero *et al.* (2009) generalizaron el *NDVI_{cp}* para el caso de las fases exponencial y lineal (hasta el *IAF* máximo) usando el índice *IV_CIMAS*.

La evapotranspiración para un cultivo dado (*ET_c*) se calcula multiplicando la evapotranspiración de referencia (pasto o alfalfa) por un coeficiente del cultivo ($K_c = ET_c / ET_o$). La evapotranspiración de referencia fue estandarizada en relación con un cultivo virtual con características biofísicas y aerodinámicas definidas (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

Partiendo de la suposición de que las variaciones temporales de los IV reflejan los patrones temporales de los coeficientes del cultivo (Jackson, Pinter, Reginato, & Idso, 1980), se ha propuesto el uso de los IV para estimar el *K_c* (Heilman, Heilman, & Moore, 1982). Así, se han propuesto relaciones lineales entre el *K_c* y diferentes IV (Bausch &

Neale, 1987; Bausch & Neale, 1989; Bausch, 1993; Bausch 1995), para usarse en la programación de riegos.

En un contexto general y desde el punto de vista de eficiencia hídrica, caracterizar el intercambio de materia y energía entre la atmósfera y la vegetación requiere estimar el índice de área foliar (*IAF*), altura (*h*) y fracción de cobertura de la vegetación (*fv*). Esto es cierto tanto para el uso de modelos de transferencia de dos o más fuentes (Shuttleworth & Wallace, 1985; Choudhury & Monteith, 1988) como para aproximaciones operacionales del balance de energía como el modelo SEBAL o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Bastiaanssen, Menenti, Feddes, & Holtslag, 1998) y el METRIC o *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution and with Internatized Calibration* (Allen, Tasumi, & Trezza, 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 K_c .

Teoría

Índices de vegetación espectrales, variables biofísicas y K_c

El análisis de los patrones asociados con los índices espectrales de la vegetación (IV) garantiza un marco teórico de referencia que permite revisar su congruencia en relación con la teoría de la transferencia radiativa en la vegetación. Este formato de análisis evita el uso de consideraciones empíricas para definir que IV es mejor.

En la Figura 1a se muestra el patrón temporal de crecimiento de un cultivo en el espacio espectral R-IRC, simbolizado por isolíneas del índice de área foliar (iso-*IAF*), que representan la misma cantidad de vegetación para 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). Paz, Palacios, Mejía, Martínez y Palacios (2005) detallan las simulaciones radiativas mostradas en la Figura 1a. En la Figura 1b se muestran los resultados de un experimento de maíz donde se usaron charolas con suelo deslizables debajo del cultivo para simular propiedades ópticas diferentes de suelos (Bausch, 1993).

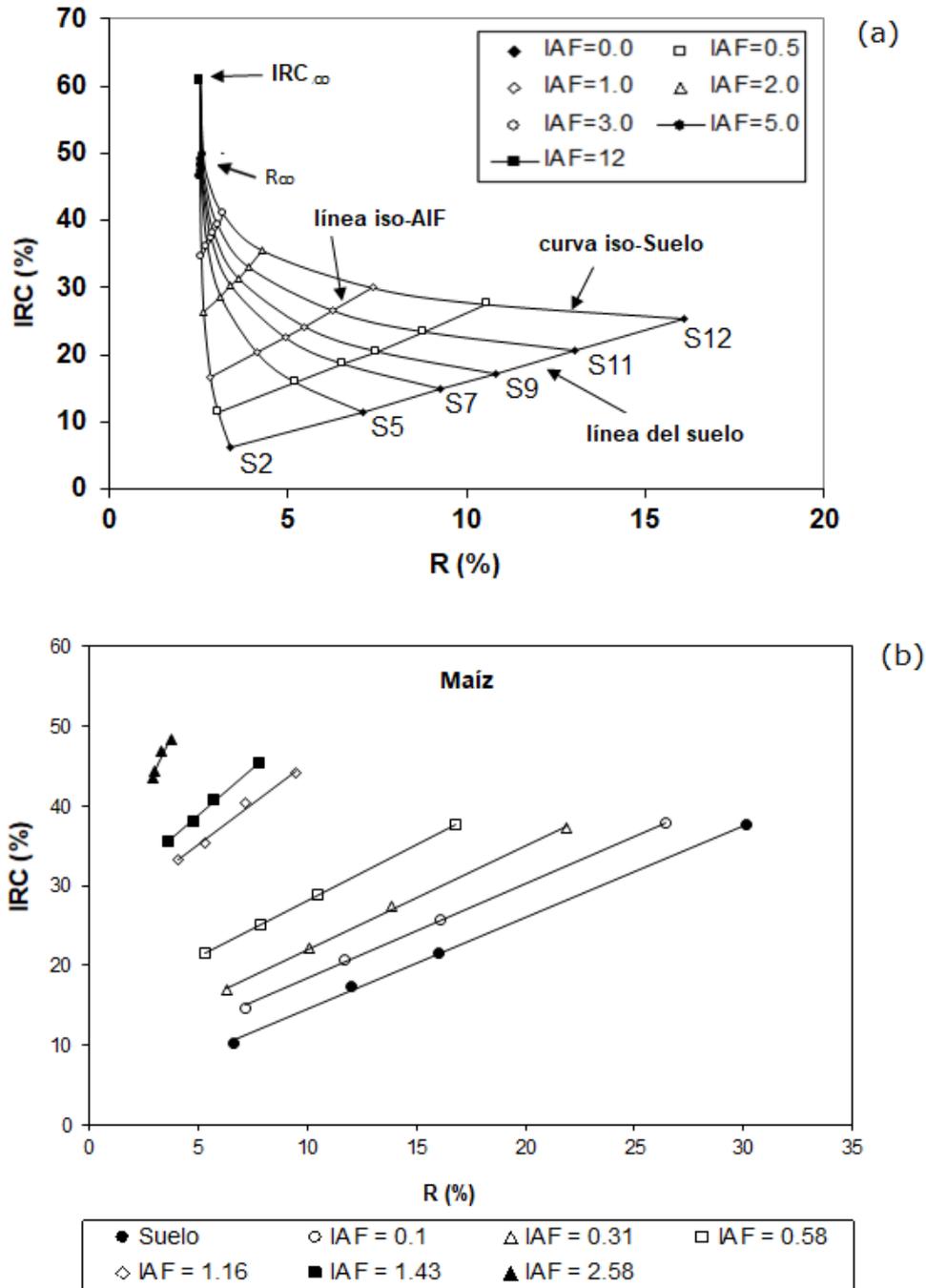


Figura 1. Patrones espectrales en el espacio del R-IRC. (a) Simulaciones radiativas y (b) experimento de maíz.

En la Figura 1 se ajustaron 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 en la Figura 1). 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: a) 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 cuasi-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; b) la pendiente (b_0) e intersección (a_0) de las isolíneas del *IAF* varían con el valor del *IAF*. La pendiente de las isolíneas de *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° . 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” ($IAF > 5$); c) todas las isolíneas del 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), pues 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_∞ o IRC_∞) o de medio denso, es función de las propiedades ópticas de las hojas y de su distribución angular (Ross, 1981).

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 que en la etapa inicial hay un patrón de comportamiento tipo exponencial hasta un punto donde la banda R se satura (aparentemente). 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 (Paz, Casiano, Zarco, & Bolaños, 2013). 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.

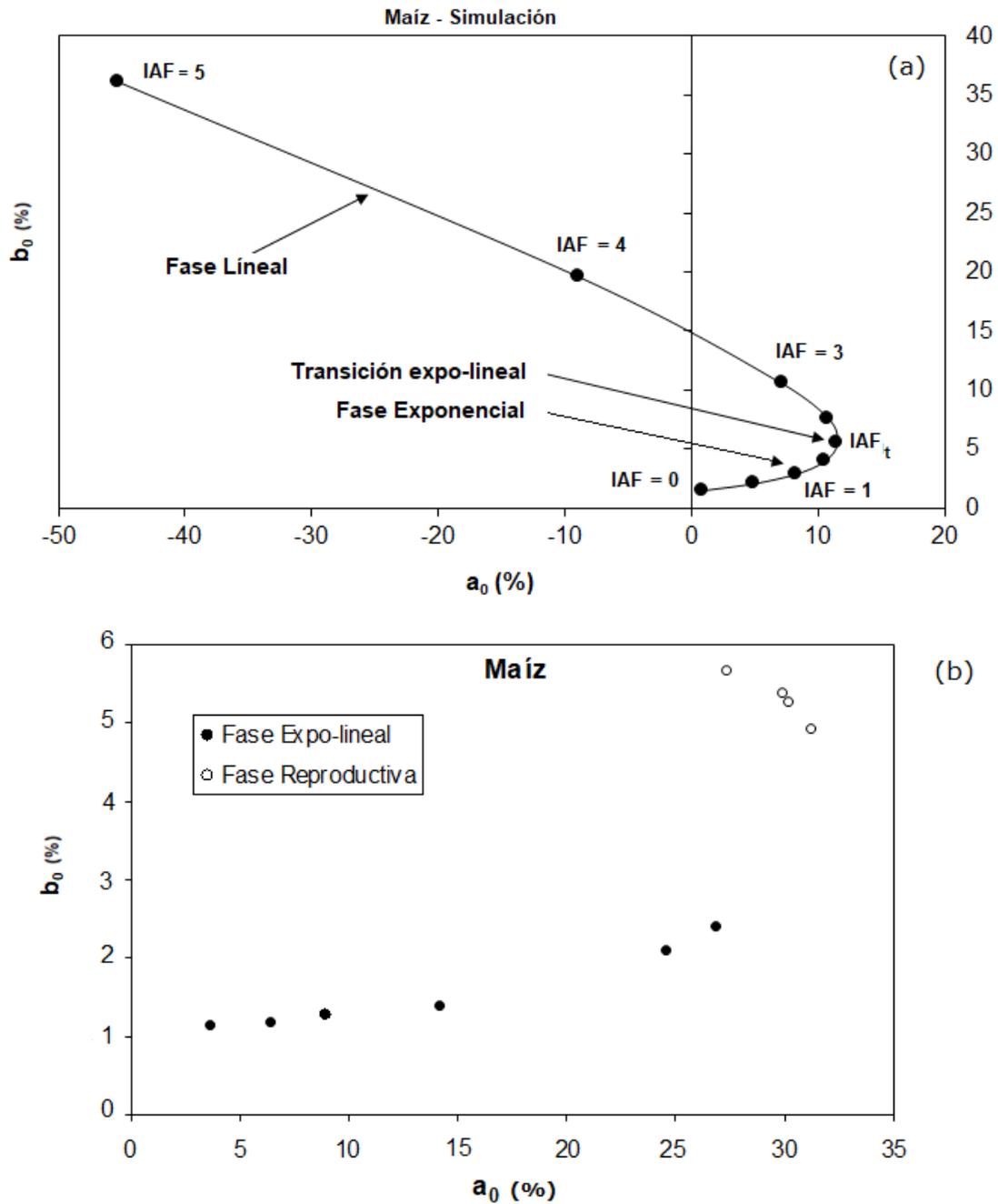


Figura 2. Patrones de los parámetros a_0 y b_0 de las líneas iso-IAF: a) simulaciones radiativas y b) experimento de maíz.

En la Figura 2b, datos experimentales del maíz, 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 & 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, para la variable V en función del tiempo t , está definido como:

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

Con las siguientes características:

$$V(t = t_T) = \frac{c}{r}; t_T = t_b + \frac{0.541}{r} \quad (2)$$

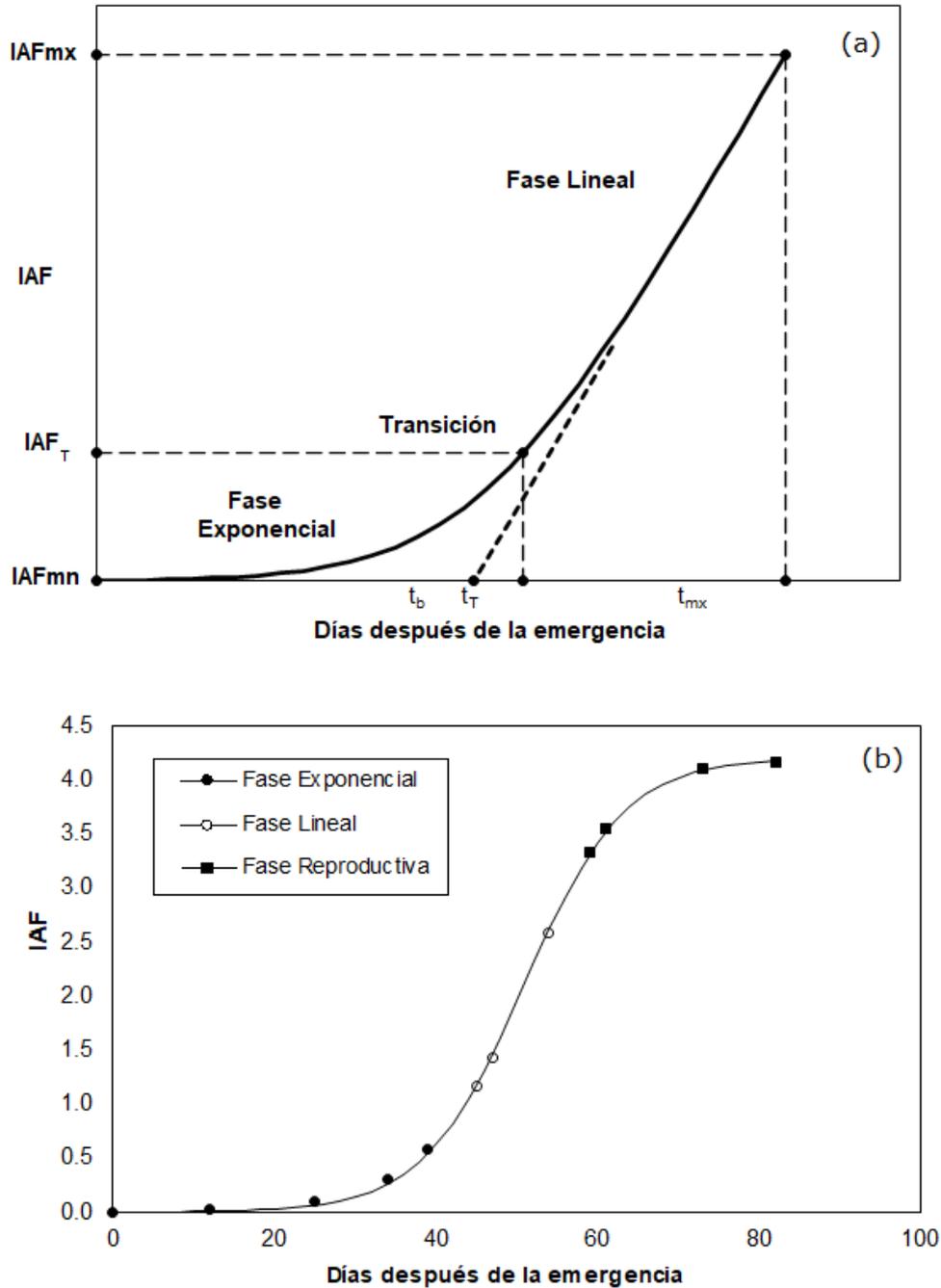


Figura 3. Patrones temporales del IAF: a) simulaciones radiativas y b) experimento de maíz.

En el modelo expo-lineal (Figura 3a), el punto de transición entre la fase exponencial y la lineal o IAF_T tiene un tiempo asociado t_T . La fase lineal extendida hasta cortar el eje del tiempo (Figura 3a) está definida por el "tiempo perdido" o t_b . Este tiempo es el 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 con el 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). Este modelo ha sido aplicado exitosamente en el análisis de la variación temporal de los índices de vegetación (Odi, Paz, & Bolaños, 2010; Reyes *et al.*, 2011).

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, el patrón temporal del IAF se muestra en la Figura 3b, donde después de la fase expo-lineal está una fase reproductiva antes de alcanzar el IAF máximo (IAF_{mx}).

Desde el punto de vista de 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 con los modelos radiativos y para el diseño de índices de vegetación generalizados.

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 la interpretan como una "saturación" de las bandas. En realidad, no hay tal saturación, sólo es consecuencia de que los patrones lineales de algunos índices difieren más y más de los valores del segmento, aproximadamente lineal, asociado con a_0 - b_0 cuando el IAF es mayor que 2-3. 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, Haas, Schell, Deering, & Harlan, 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.*, 2015); esto es, supone que todas las líneas iso- IAF tienen origen en (0, 0) en el espacio R-IRC, por lo que en el espacio a_0 - b_0 de la Figura 2 representa una línea recta vertical sobre el eje b_0 (Paz *et al.*, 2015). De la Figura 1 y Figura 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 :

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

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

La Figura 4 muestra los resultados de aplicar el $NDVI$ y el $NDVI_{cp}$ al experimento de maíz (cuatro suelos de fondo con diferentes propiedades ópticas) presentado en la Figura 1b. Aparte de las variaciones de los valores del $NDVI$ para el caso de suelos diferentes, este se satura alrededor de un IAF de dos, a diferencia del $NDVI_{cp}$.

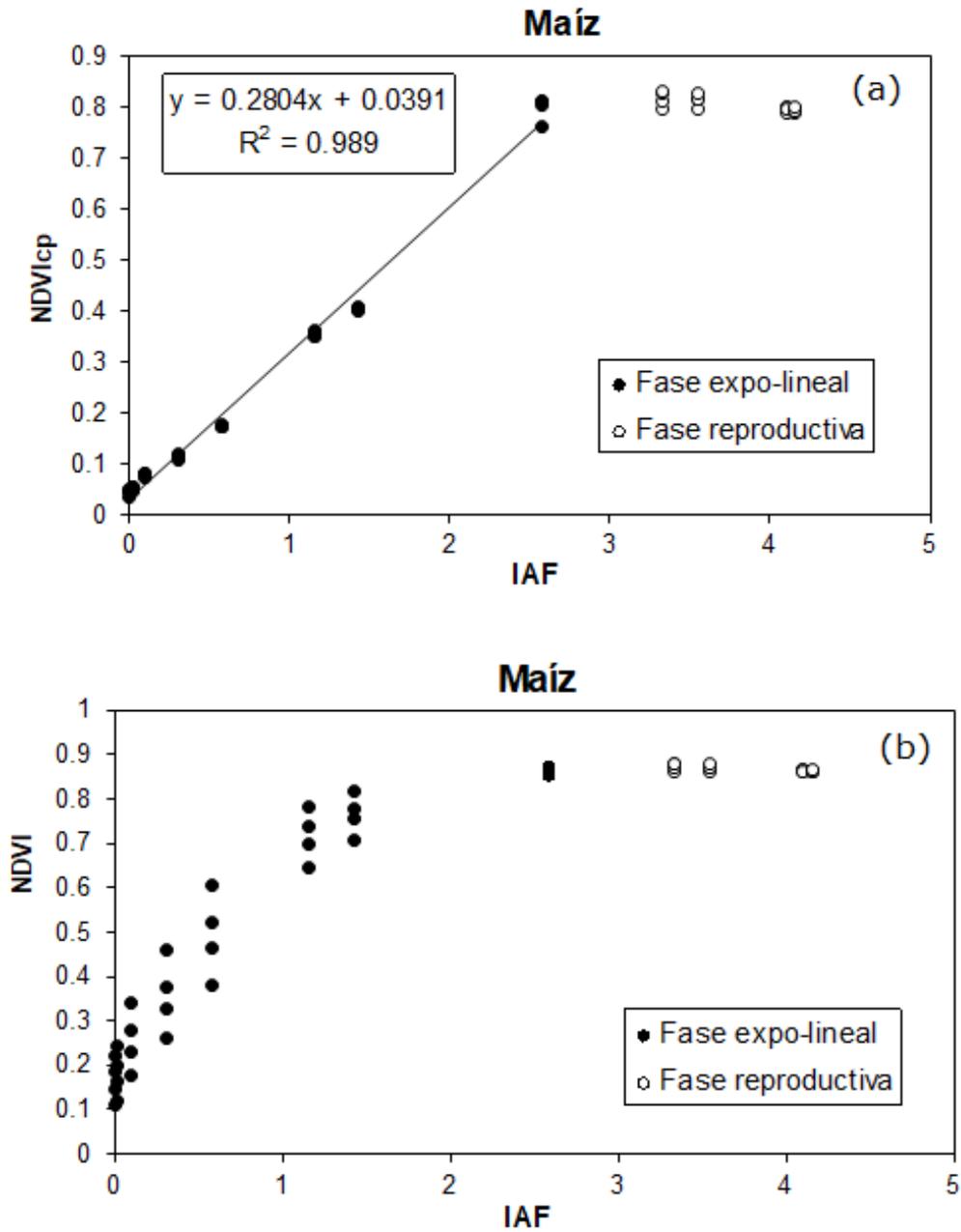


Figura 4. Resultados de aplicar índices espectrales al experimento del maíz: a) $NDVI_{cp}$ y b) $NDVI$.

Paz *et al.* (2014 y 2015) han revisado la mayoría de los IV publicados en la literatura y concluyeron que ninguno aproxima en forma correcta el patrón expo-lineal definido en la Figura 2, incluido el $NDVI_{cp}$, el cual fue diseñado considerando sólo 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 $NDVI_{cp}$). Bajo esta perspectiva, el IV_CIMAS está definido en un formato similar al $NDVI_{cp}$ (en función de las pendientes b_0 ; Ecuación (2)), donde se tiene $IV_CIMAS = NDVI_{cp}$ 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; Paz *et al.*, 2015).

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 & Pruitt, 1977) y de la evapotranspiración de referencia ET_0 :

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (5)$$

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

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (6)$$

donde K_{cb} es el coeficiente del cultivo de base (sin estrés) y K_e es el coeficiente asociado con la evaporación del suelo.

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

$$K_{cba} = (K_{cb})(K_s) \quad (7)$$

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 ET_c usando el coeficiente del cultivo.

Para entender las limitaciones de las relaciones entre los diferentes IV y el K_c (K_{cb} , K_s y K_e), 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 (Reyes *et al.*, 2011).

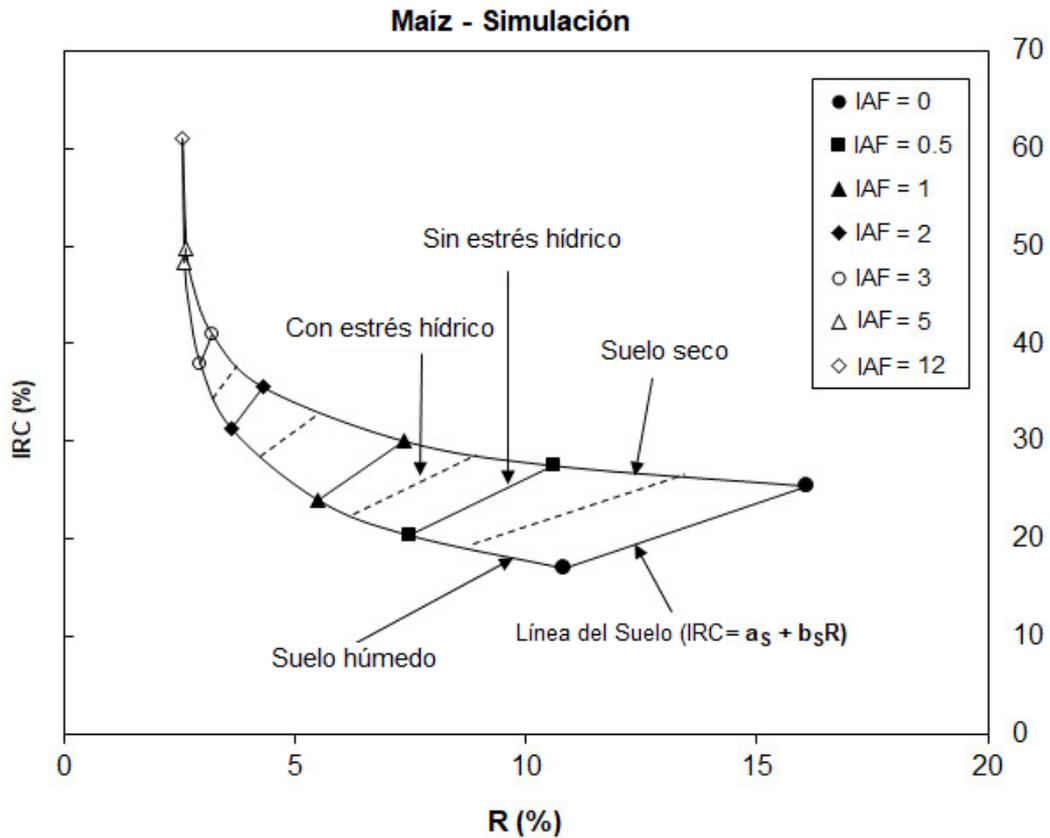


Figura 5. Simulaciones radiativas del cultivo de maíz bajo dos condiciones de humedad del suelo y de estrés hídrico.

La humedad del suelo (K_e) se manifiesta en curvas iso-suelo diferentes (R e IRC disminuyen sus valores) y el estrés hídrico (K_s) en curvas iso- IAF diferentes (menor pendiente para el caso de las líneas iso- IAF). Ahora bien, considerando que la gran mayoría de los IV tratan de aproximar la pendiente (o la intersección) de las líneas iso- IAF (Paz *et al.*, 2007; Paz *et al.*, 2015), es claro de la Figura 5 que un IV "perfecto" (estimación directa, y sin error, de la pendiente) no puede diferenciar entre K_{cb} y K_e (o K_c), ya que la pendiente b_0 (o 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 , o a_0 , genera relaciones similares para K_{cb} , $K_{cb} + K_e$ o K_c . 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, a nivel de espacios transformados de las reflectancias (Paz *et al.*, 2009) o con índices de vegetación (Paz, Reyes, & Medrano, 2011).

Medios radiativos equivalentes

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

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

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

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

donde f_v es la fracción de vegetación y está 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 (proyección horizontal) estará dado por la Ley de Beer-Lambert para hojas no negras (Goudriaan & van Laar, 1994):

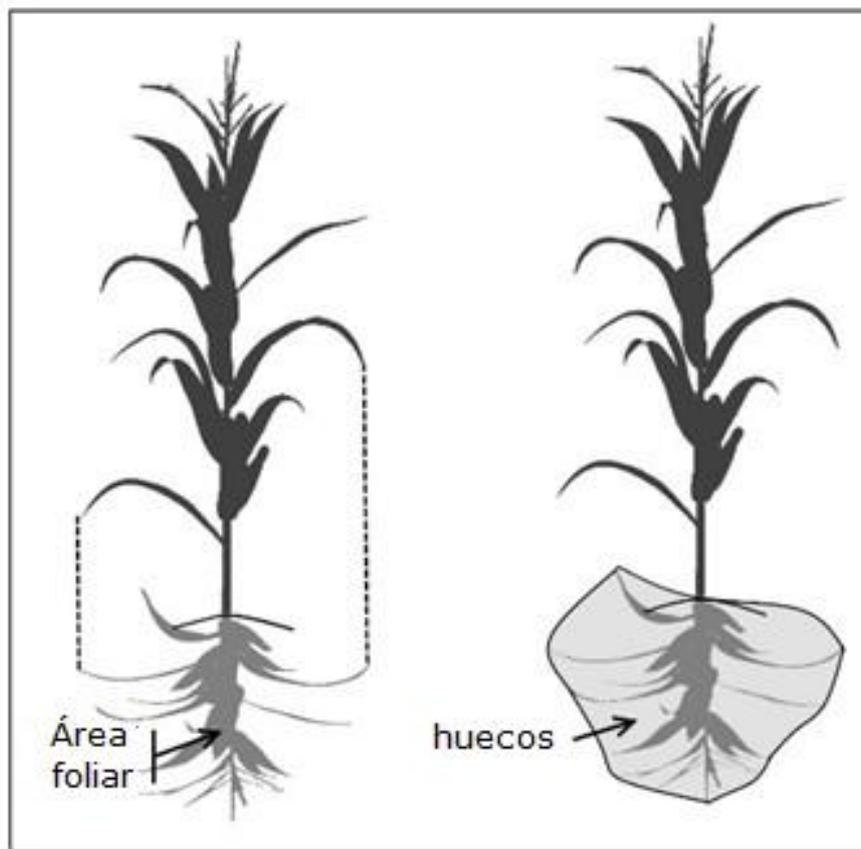


Figura 6. Área foliar y huecos para el caso de un medio local o planta individual.

$$f_h = 1 - T_l; T_l = \exp\{(1 - \omega)^{1/2} Kx IAF_l\} \quad (10)$$

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. Nótese 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 práctica (fotografías digitales) f_v incorpora a f_h .

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 (caso 3-D). Al avanzar el crecimiento, las plantas en un mismo surco se tocan entre sí y forman un cultivo en hileras o surcos (caso 2-D). Cuando las plantas de diferentes surcos se tocan, tenemos la situación de cobertura total del suelo (caso 1-D). 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.

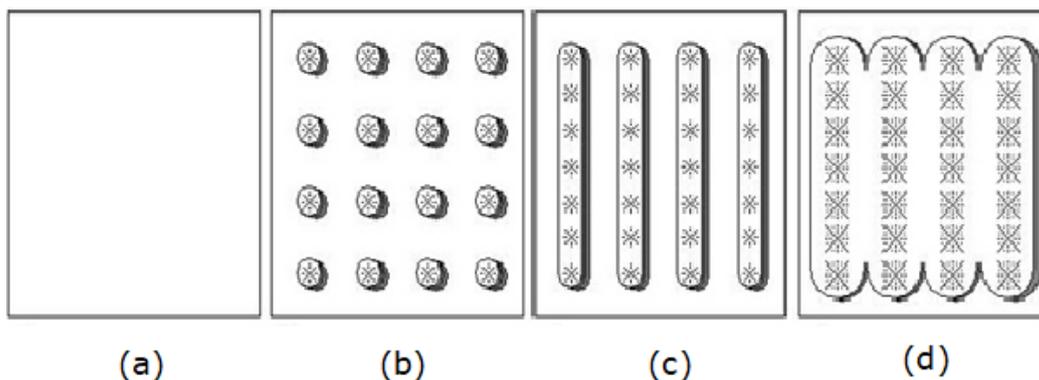


Figura 7. Geometría asociada con un cultivo sembrado en surcos: (a) suelo desnudo; (b) plantas individuales sin traslape; (c) plantas traslapadas en surcos, y (d) vegetación densa traslapada.

De la discusión anterior, un medio equivalente (términos físicos) es aquel que cumple (Paz *et al.*, 2013):

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

Es decir, para una medición de IAF_G hay un número infinito de combinaciones equivalentes de IAF_l y fv que satisfacen la Ecuación (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 con 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, Ecuación (11), es importante para entender las limitaciones del uso de fv o IAF_G para estimar en forma indirecta K_c (o 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 % o un IAF de 2-3 (Allen *et al.*, 1998). De la Ecuación (11) es claro que 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, pues la definición de un solo valor, fv o IAF_G , no es suficiente para caracterizar el medio (Odi-Lara, Paz-Pellat, López-

Urrea, & González-Piqueras, 2013). Este problema se manifiesta en la definición de la "cobertura efectiva" (fin de la etapa vegetativa), donde se le asocian valores de f_v o IAF_G fijos (Allen *et al.*, 1998). Esto implica un cultivo estandarizado en relación con su geometría de siembra, y no capta la esencia de la arquitectura de las plantas y la distribución geométrica en las parcelas. Así, es posible encontrar que la cobertura efectiva se puede dar en valor de f_v o IAF_G , que pueden diferir sustancialmente 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, González-Piqueras, & Meliá, 2004; González-Piqueras, Calera, Gilabert, Cuesta, & De-la-Cruz, 2004) y trigo (*Triticum aestivum* L.) var. estero (López-Urrea, Montoro, González-Piqueras, López-Fuster, & Fereres, 2009a). Se midieron las variables IAF , f_v , 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 semiárido, 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; López-Urrea *et al.*, 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 de 0.34 y en punto de marchitez permanente (PMP) de 0.21 m³ m⁻³. En el caso del trigo, la humedad aprovechable (HA) estimada para una zona de raíces de 35 cm fue de 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) en trigo para valores de ET_c de 5 mm d⁻¹.

Los cultivos crecieron en condiciones óptimas, sin restricciones de agua y nutrientes. El trigo se fertilizó después de la siembra con 28 kg ha⁻¹ de N, 112 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 70 kg ha⁻¹ de K₂O; en la etapa vegetativa se aplicó fertilizante líquido (170 kg ha⁻¹ de N). El sistema de riego de la parcela es por aspersion 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, de la forma:

$$ET = P + R - D \pm \Delta w \quad (12)$$

donde P es precipitación, R es el riego, D el drenaje y Δw corresponde a las variaciones en el contenido de agua en la masa de suelo.

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 ET_o 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; López-Urrea *et al.*, 2006b). 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 mediciones 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 cinco 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^{MR}) 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 la Tabla 1 se detallan las fases de desarrollo.

Tabla 1. Fenología de maíz y trigo.

Maíz, 2001			Trigo, 2003	
Día juliano	Fenología		Día juliano	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	Sobremaduración
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 tomadas a nadir de la cubierta. La clasificación se hizo con el programa ENVI^{MR}, distinguiendo entre vegetación verde y suelo.

Para calcular el índice de área foliar, IAF , se recogió una muestra de 1 m² de la parcela de protección y se midió una cara de las hojas con un equipo LI COR^{MR} LAI 3000.

De acuerdo con 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 ($K_{cb} + K_e$) o K_{cb} (no distinguibles en términos de los IV) a nivel de predio o parcela agrícola requiere que el efecto del suelo (humedad) sea minimizado. En la perspectiva de un esquema de riego de precisión es importante conocer la variabilidad espacial de K_c (ET_c) para hacer un uso eficiente del recurso agua.

La Figura 8 muestra las estimaciones del $NDVI$ para los diferentes días julianos, donde es evidente que este índice no reduce adecuadamente los efectos del suelo y el utilizar un promedio del $NDVI$ es una decisión arbitraria, pues para un día particular, la condición de humedad del suelo en el tiempo de las mediciones permanece más o menos constante, por lo que las variaciones son atribuibles solamente a la incapacidad del $NDVI$ de minimizar el efecto de suelo y/o variaciones en la condición del cultivo. Por otro lado, el $NDVI$ muestra problemas de saturación (no varía en el tiempo) antes de que el cultivo alcance su IAF o f_v máximo, limitando su uso sólo a la parte

exponencial de la etapa de crecimiento vegetativo, sin considerar la fase lineal. Los usos y costumbres de usar el *NDVI* para estimar K_c (Castañeda-Ibáñez *et al.*, 2015; Palacios-Vélez, Palacios-Sánchez, & Espinosa-Espinosa, 2018) no se justifican, ya que no es suficiente tener relaciones empíricas estadísticamente aceptables entre un IV y el K_c , es necesario tener las respuestas correctas por las razones correctas (Kirchner, 2006) para su uso. El no entender conceptos de transferencia radiativa asociados con los IV limita fuertemente los enfoques empíricos, justificándolos sólo en ajustes estadísticos arbitrarios. Debido al uso de la banda fotosintética (R) y la no fotosintética (IRC), se espera que cualquier IV aproxime, aunque sea de forma burda, el crecimiento de un cultivo y, por lo tanto, la evolución del K_c .

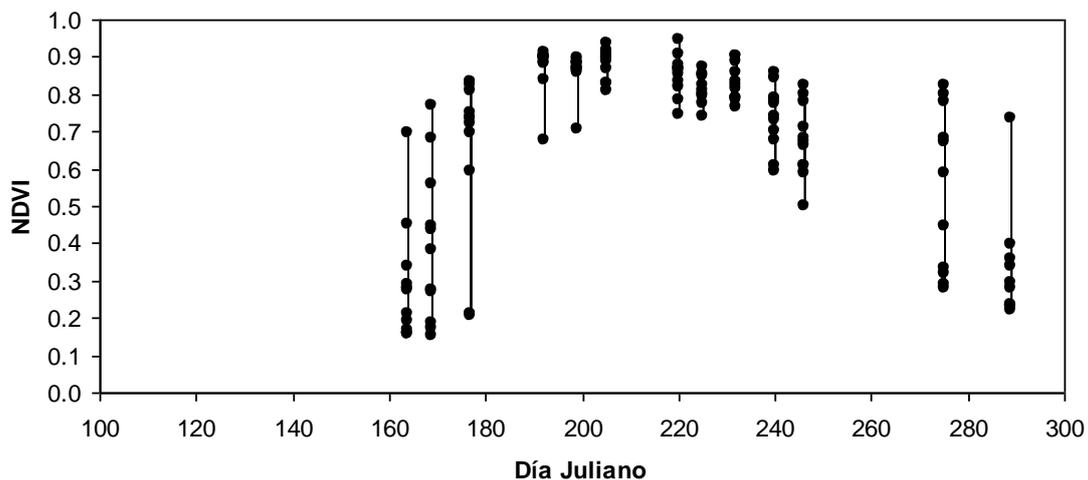


Figura 8. Variación del *NDVI* en el tiempo para las mediciones en el lisímetro para el maíz.

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, se estimaron 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, de las mediciones de K_c en el lisímetro, se revisaron para seleccionar valores de K_{cb} (los valores más bajos) del patrón temporal de K_c . 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, representado por el IV_CIMAS, ya que hay una delación lineal entre este índice y el *IAF* (Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009).

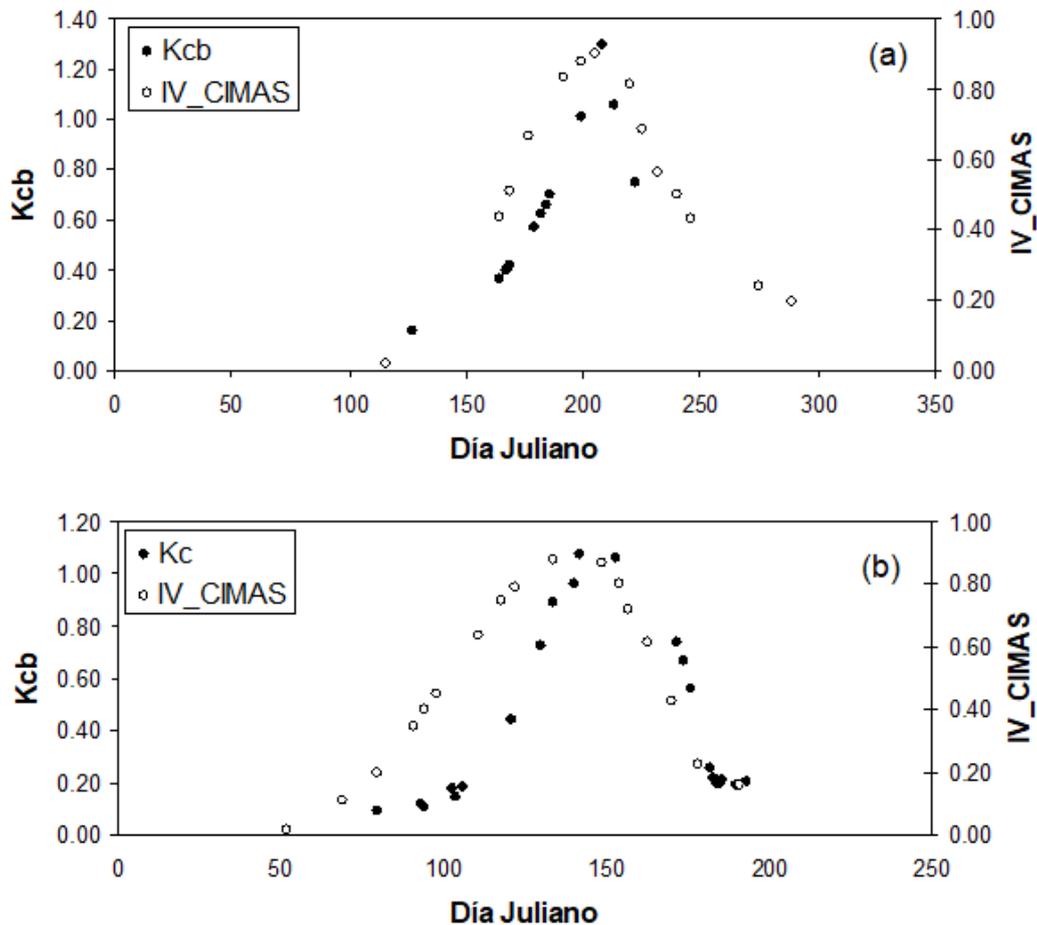


Figura 9. Patrones temporales de K_{cb} e IV_{CIMAS} : (a) maíz y (b) trigo.

La Figura 10 ilustra las relaciones lineales entre el IV_{CIMAS} y K_{cb} , donde resulta claro que hay una relación para la etapa vegetativa y otra para la de senescencia, con valores constantes (etapa de meseta) de K_{cb} entre las dos etapas (cuadrados rellenos en la Figura 10). Los parámetros de las relaciones lineales son diferentes entre 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, 1993; González-Piqueras *et al.*, 2004; López-Urrea, De-Santa-Olalla, Fabeiro, & Moratalla, 2009b; Palacios-Vélez *et al.*, 2018).

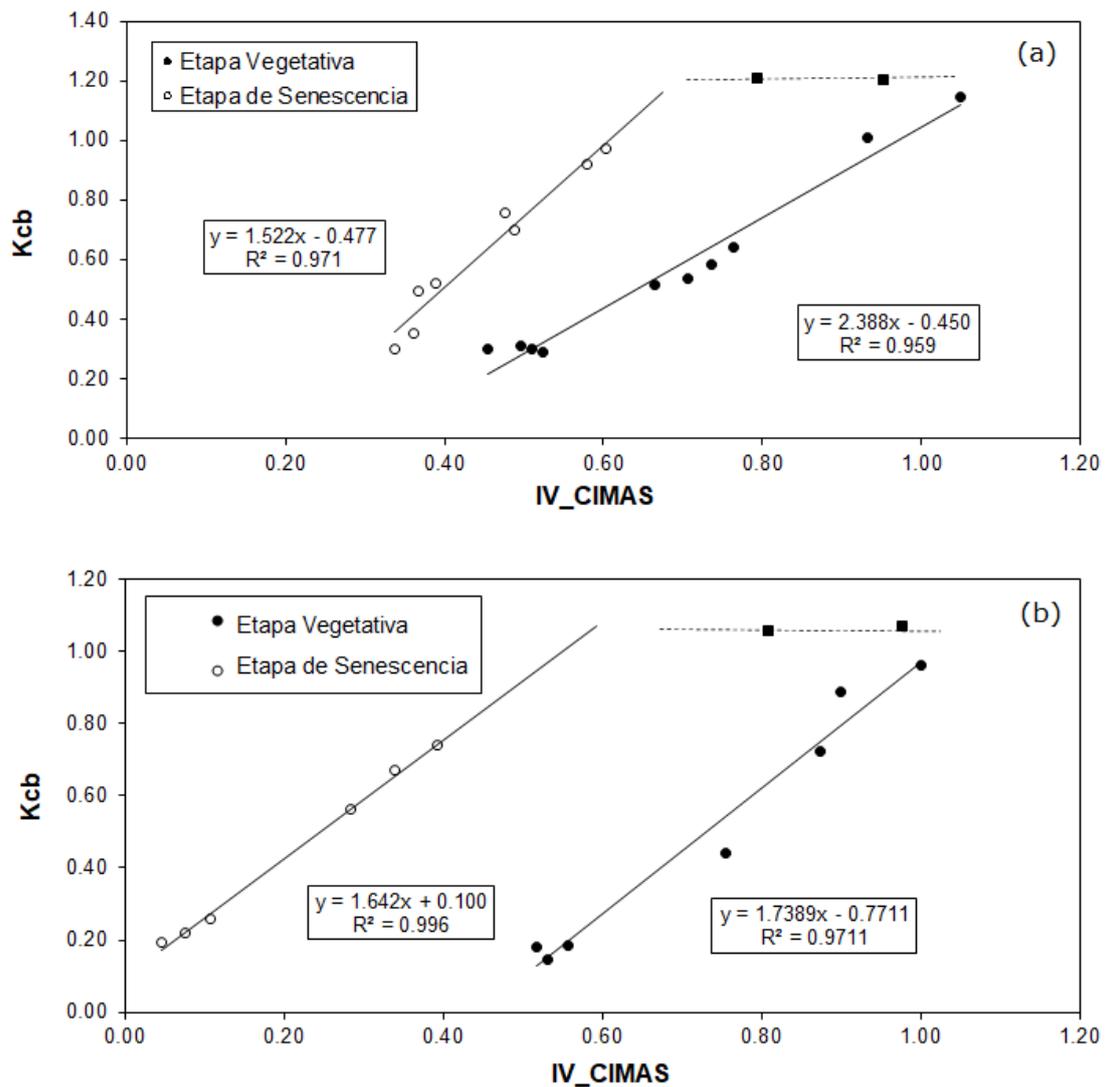


Figura 10. Relaciones entre el IV_CIMAS y el K_{cb} : (a) maíz y (b) trigo.

La Figura 11 ilustra una relación lineal entre el IV_CIMAS y el IAF para el cultivo de maíz y muestra relaciones similares al caso de K_{cb} . Así, la parametrización de K_c o K_{cb} en función de fv o IAF es equivalente a la del IV_CIMAS . Por tanto, la parametrización de K_c o K_{cb} como una función de fv o IAF es equivalente a las del IV_CIMAS . Dados los problemas de usar sólo IAF (o fv), las relaciones con K_c o K_{cb} varían de acuerdo con las condiciones locales; es decir, los parámetros de las relaciones lineales dependen de la geometría de siembra y desarrollo de los cultivos.

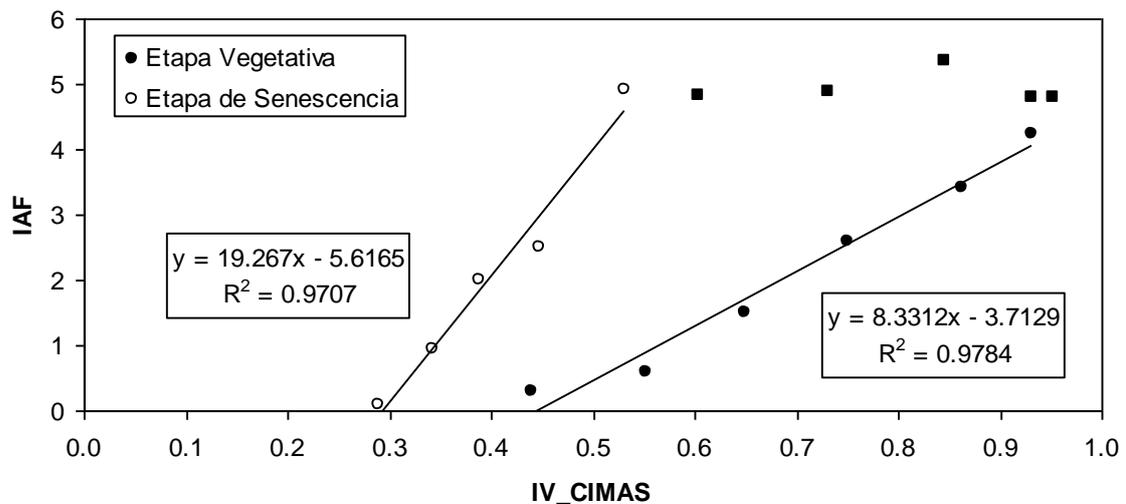


Figura 11. Relaciones entre el IV_CIMAS y fv e IAF .

Del análisis de la problemática asociada con el uso de fv y IAF en forma separada, la definición del inicio y terminación (cobertura efectiva) de la etapa vegetativa es necesaria para parametrizar la relación con el IV_CIMAS . En este sentido se requiere una estimación directa del inicio y terminación usando los patrones temporales del

IV_CIMAS, que dada la relación lineal con el *IAF*, el modelo expo-lineal de la Ecuación (1) puede usarse para este fin (Odi-Lara *et al.*, 2013). Así, definiendo el inicio de la etapa vegetativa en el tiempo t_T y el fin en t_{MAX} , podemos usar los valores del IV_CIMAS en esos tiempos y definir el K_{cb} , o K_c , asociado con la etapa (datos de FAO-56 o estimaciones con lisímetro), de tal manera que con el par de puntos poder determinar 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 K_c o K_{cb} tiende a ser no lineal (exponencial) (Figura 9) podemos usar una transformación logarítmica-exponencial para hacer equivalentes ambos patrones (*i* significa inicio y *f* es fin):

$$f = \frac{\ln(K_{cb,i}) - \ln(K_{cb,f})}{IV_{CIMAS_i} - IV_{CIMAS_f}}; e = \ln(K_{cb,f}) - f x IV_{CIMAS_f}; K_{cb} = \exp(e + f x IV_{CIMAS}) \quad (13)$$

Usando la Ecuación (13), la Figura 12 muestra la relación entre los K_{cb} estimados y los medidos en el lisímetro para el maíz y el trigo, usando los valores medidos del lisímetro para parametrizar la Ecuación (13).

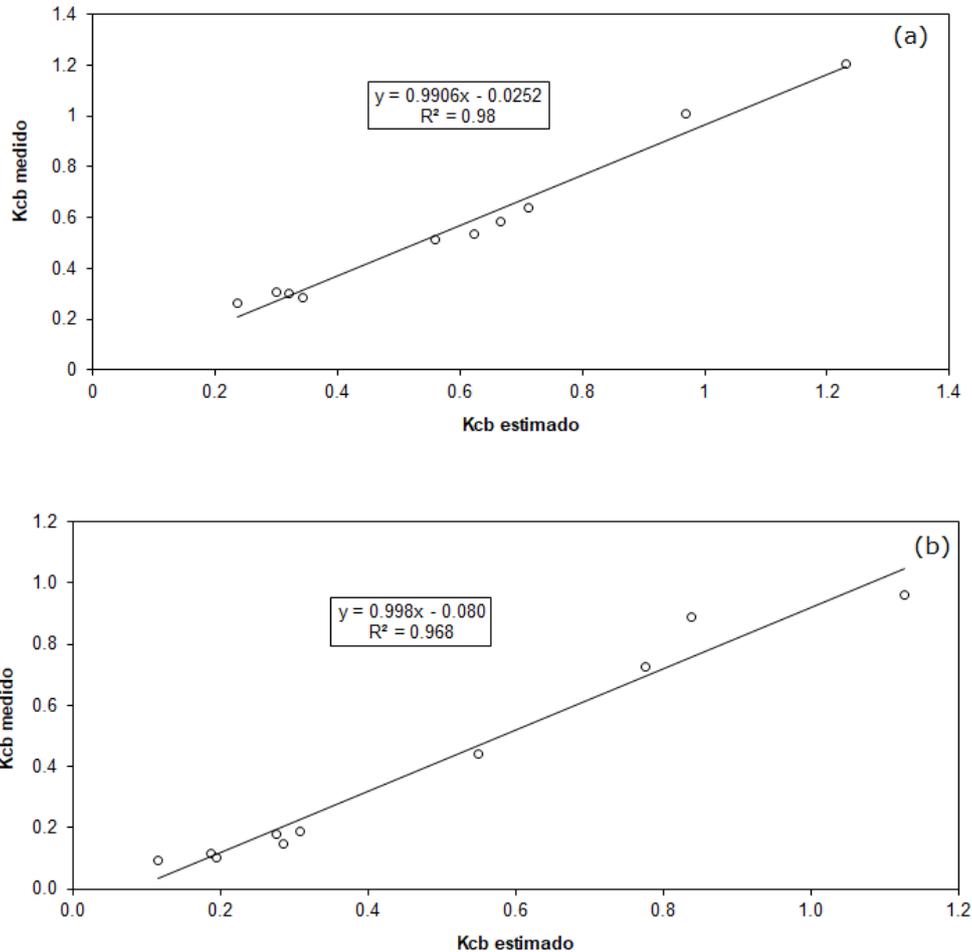


Figura 12. Relaciones el K_{cb} estimado y el medido: a) maíz y b) trigo.

La relación entre los K_{cb} estimados, Ecuación (13), y los medidos mostrados en la Figura 12 muestra que la estimación con dos pares de datos para autocalibrar el IV_CIMAS da resultados buenos y puede usarse en términos operacionales. La relación entre el IV-CIMAS y K_{cb} es similar para K_c , por lo que podemos usar los valores de K_c al inicio y término de la etapa vegetativa (fase lineal) en la Ecuación (13) y

obtener estimados de K_c en la etapa. El valor de inicio (tiempo antes de t_T) tiene un valor constante igual a $K_{cb,i}$ o $K_{c,i}$.

Algo similar al caso de la etapa vegetativa puede hacerse para la etapa de senescencia, definiendo así una metodología autocalibrable (cuadros de FAO-56 o mediciones de campo) para definir la relación entre el IV_CIMAS, y K_{cb} o K_c .

La ventaja de la metodología propuesta es que es independiente de efectos atmosféricos, pues se calibra con las estimaciones locales del IV_CIMAS y los valores de K_{cb} o K_c usados como inicio y terminación de una etapa. Bajo la consideración de efectos relativamente similares en un ciclo de crecimiento, o bajo la consideración de su minimización, las estimaciones resultan adecuadas para ser usadas en aplicaciones en tiempo cuasi-real, bajo las hipótesis o restricciones asociadas con la metodología FAO-56.

Relación IV_CIMAS con la biomasa aérea

La Figura 13 muestra la relación entre la biomasa aérea seca (B_m) y el IV_CIMAS para el maíz y trigo, donde para la etapa vegetativa (y la de la meseta) del IV_CIMAS se obtiene una relación exponencial con la B_m . Algo similar sucede para el caso de la etapa de senescencia. Esto es, usando IV_CIMAS versus $\ln(B_m)$ se obtienen dos relaciones lineales que se interceptan en el inicio de la senescencia.

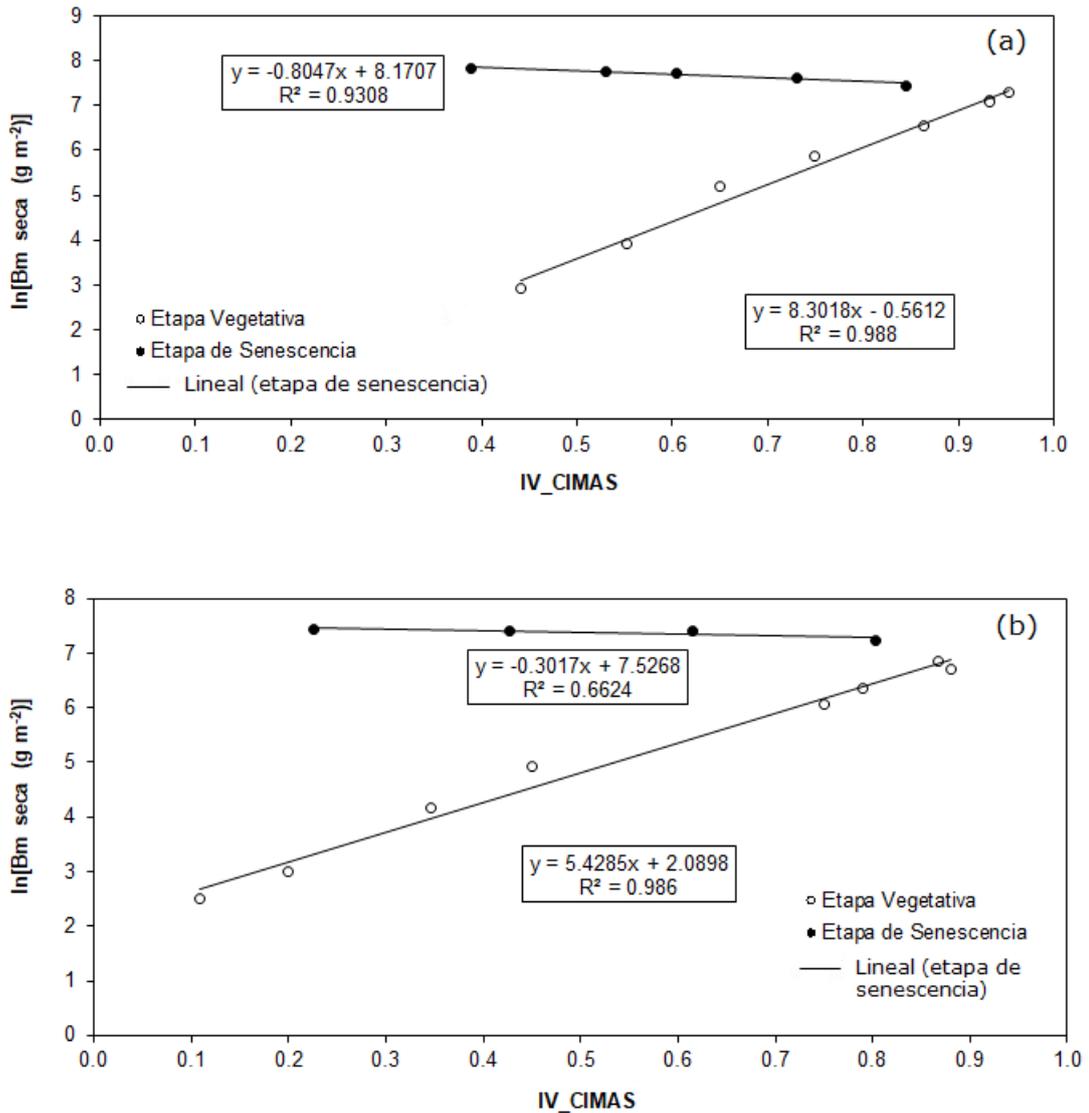


Figura 13. Relaciones entre el IV_CIMAS y la Bm seca: a) maíz y b) trigo.

Conclusiones

Este trabajo describe los alcances y limitaciones del uso de índices espectrales de la vegetación (IV) para la estimación de los coeficientes del cultivo (K_c o K_{cb}) de la metodología FAO-56.

Considerando que los IV tratan de aproximar la pendiente b_0 , o intersección a_0 , de las líneas iso-*IAF* de los cultivos, se aclaró que la relación entre los IV, y K_{cb} o K_c son equivalentes, pues 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 discuten Paz *et al.* (2009).

Bajo la consideración de medios radiativos equivalentes (espacios espectrales), 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 de los inicios y finales de las etapas del K_c de acuerdo con FAO-56. Para parametrizar estos tiempos es necesaria la consideración conjunta del *IAF* y f_v para que refleje la geometría de siembra de los cultivos.

Usando el formato genérico del índice IV_CIMAS, en conjunto con estimaciones directas de las pendientes de las líneas iso-*IAF* en dos experimentos (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 o 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} o K_c para ser aplicada en términos operacionales.

Los análisis mostrados en este trabajo definen las limitaciones en la estimación de K_c o K_{cb} dada la limitación intrínseca del diseño convencional de los IV para aproximar las pendientes de las líneas iso-*IAF*. Así, 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), *i.e.*, $K_{cb} * K_s$, puede realizarse en forma similar al K_{cb} sin estrés, siempre y cuando se tengan los valores iniciales y finales de $K_{cb} * K_s$ asociados con las etapas de la metodología FAO-56. Este aspecto merece una mayor investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. José González-Piqueras y al Dr. Ramón López-Urrea su amable autorización para el uso de los datos de sus campañas de campo en España.

Referencias

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2005). *METRIC: mapping evapotranspiration at high resolution – Applications manual for LANDSAT satellite image*. Idaho, USA: University of Idaho.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213(1-4), 198-212. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bausch, W. C. (1995). Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management*, 27, 55-68. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01125-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01125-3)
- Bausch, W. C. (1993). Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment*, 46, 213-222. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-G)
- Bausch, W. C., & Neale, C. M. U. (1989). Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling. *Transactions of the ASAE*, 46, 1901-1908.
- Bausch, W. C., & Neale, C. M. U. (1987). Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: A concept. *Transactions of the ASAE*, 30, 703-709.
- Calera, A., González-Piqueras, J., & Meliá, J. (2004). Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 97-109. DOI: 10.1080/0143116031000115319

- Calera, A., Jochum, A. M., Cuesta, A., Montoro, A., & Fuster, P. L. (2005). Irrigation management from space: towards user-friendly products. *Irrigation Drainage Systems*, 19, 337-353.
- Castañeda-Ibáñez, C. R., Martínez-Menes, M., Pascual-Ramírez, F., Flores-Magdaleno, H., Fernández-Reynoso, D. & Esparza-Govea, S. (2015). Estimation of crop coefficients through remote sensing in the Río Yaqui irrigation district, Sonora, México. *Agrociencia*, 49, 2, 221-232. Recuperado de <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/issue/view/108>.
- Choudhury, B. J., & Monteith, J. L. (1988). A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114, 373-398. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/qj.49711448006>.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. Vol. 24.* Rome, Italy: The Food and Agriculture Organization.
- Ferrandino, F. J. (1989). Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 47, 273-289.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, F. J., & Meliá, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82, 303-310. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00048-2)
- González-Piqueras, J., Calera, A., Gilabert, M. A., Cuesta, A., & De-la-Cruz, F. (2004). Estimation of crop coefficients by means of optimized vegetation indices for corn. *Proceedings SPIE*, 5232, 110-118. Recuperado de <https://doi.org/10.1117/12.511317>

- Goudriaan, J., & Monteith, J. L. (1990). A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Annals of Botany*, 66, 695-701. Recuperado de <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088084>.
- Goudriaan, J., & van Laar, H. H. (1994). *Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises*. Current Issues in Production Ecology. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Heilman, J. L., Heilman, W. E., & Moore, D. G. (1982). Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 74, 967-971. Recuperado de <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400060010x>.
- Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Idso, S. B. (1980). *Hand-held radiometry. A set of notes developed for use at the workshop on hand-held radiometry*. Phoenix, USA: US Department of Agriculture, Agricultural Reviews and Manuals.
- Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*. DOI: 10.1029/2005WR004362
- López-Urrea, R., Montoro, A., González-Piqueras, J., López-Fuster, P., & Fereres, E. (2009a). Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agricultural Water Management*, 96, 1305-1310. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.04.015
- López-Urrea, R., Montoro, A., López-Fuster, P., & Fereres, E. (2009b). Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli.

Agricultural Water Management, 96, 1155-1161. DOI:
10.1016/j.agwat.2009.03.011

López-Urrea, R., De-Santa-Olalla, F. M., Fabeiro, F., & Moratalla, A. (2006a). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85, 15-26.

López-Urrea, R., De-Santa-Olalla, F. M., Fabeiro, C., & Moratalla, A. (2006b). An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 86, 277-282. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.017>

McCoy, R. M. (2005). *Fields methods in remote sensing*. New York, USA: The Guilford Press. Recuperado de https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2006.00161_2.x

Milton, E. J. (1987). Principles of field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 1807-1827.

Odi, M., Paz, F., & Bolaños, M. (2010). Limitations in the estimation of biophysical variables in crops using spectral vegetation indexes: Foliage density effect. *Agrociencia*, 44, 807-819.

Odi-Lara, M., Paz-Pellat, F., López-Urrea, R., & González-Piqueras, J. (2013). Definición de la etapa de desarrollo de los cultivos para estimar evapotranspiración usando la metodología FAO-56 y sensores remotos. *Tecnología y ciencias del agua*, 4, 87-102.

Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, L. A., & Espinosa-Espinosa, J. L. (2018). Evaluation of water use efficiency in irrigated agriculture

supported by satellite images. *Tecnología y ciencias del agua*, 9, 31-38. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-02>

Paz, F., Romero, E., Palacios, E., Bolaños, M., Valdez, R., & Aldrete, A. (2015). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoamericana*, 33(1), 27-49. Recuperado de <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/articulo/view/43>

Paz, F., Romero, E., Palacios, E., Bolaños, M., Valdez, R., & Aldrete, A. (2014). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 177-194. Recuperado de <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/articulo/view/22>

Paz, F., Casiano, M., Zarco, A., & Bolaños, M. (2013). Estimación de las propiedades ópticas de la vegetación usando medios radiativos equivalentes y espacios n-paramétricos. *Terra Latinoamericana*, 31, 119-134.

Paz, F., Reyes, M., & Medrano, E. (2011). Design of spectral vegetation indexes using iso-soil curves. *Agrociencia*, 45, 121-134.

Paz, F., Marin, M. A., López, E., Zarco, A., Bolaños, M. A., Oropeza, J. L., Martínez, M., Palacios, E., & Rubiños, E. (2009). Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: mezcla suelo-vegetación. *Ingeniería Hidráulica en México*, 14, 69-80.

- Paz, F., Palacios, E., Bolaños, M., Palacios, L. A., Martínez, M., Mejía, E., & Huete, A. (2007). Design of a vegetation spectral index: NDVIcp. *Agrociencia*, 41, 539-554.
- Paz, F., Palacios, E., Mejía, E., Martínez, M., & Palacios, L. A. (2005). Analysis of the spectral spaces of reflectance from crop canopies. *Agrociencia*, 39, 293-301. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/302/30239306.pdf>
- Reyes, M., Paz, F., Casiano, M., Pascual, F., Marín, M. I., & Rubiños, E. (2011). Characterization of stress effect using spectral vegetation indexes for the estimate of variables related to aerial biomass. *Agrociencia*, 45, 221-233. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n2/v45n2a7.pdf>.
- Romero, E., Paz, F., Palacios, E., Bolaños, M., Valdez, R., & Aldrete, A. (2009). Design of a spectral vegetation index under the joint perspective of exponential and linear growth patterns. *Agrociencia*, 43, 291-307.
- Ross, J. (1981). *The radiation regime and architecture of plant stands*. Norwell, USA: W. Junk. DOI: 10.1007/978-94-009-8647-3
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. Type III, Final Report. Greenbelt, USA: NASA/GSFC.
- Shuttleworth, W. J., & Wallace, J. S. (1985). Evaporation from sparse crops – An energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, 839-855. Recuperado de <http://facetas.sdsu.edu/shuttleworthwallace.pdf>

- Soil Survey Staff. (2006). *Keys to Soil Taxonomy* (10th ed.). Washington, DC, USA: USDA-Natural Resources Conservation Service. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052172.pdf
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Verstraete, M. M., & Pinty, B. (1996). Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, 34, 1254-1265. DOI: 10.1109/36.536541
- Wright, J. L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients *Journal of Irrigation and Drainage*, 108, 57-74. Recuperado de <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/382>