

Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite

A. Cuesta*, A. Montoro***, A.M. Jochum**, P. López***, A. Calera*

* Grupo de Teledetección y SIG. (IDR). Universidad de Castilla-La Mancha. Campus universitario s/n, 02071 Albacete

** ALFAclima; Avenida de España, 9, 6ºD, 02002 Albacete.

*** Instituto Técnico Agronómico Provincial, Carretera de Madrid s/n, 02006 Albacete
e-mail: Andres.Cuesta@uclm.es

Resumen

La evapotranspiración de un cultivo se calcula usualmente mediante el procedimiento denominado "en dos pasos", consistente en el producto del coeficiente de cultivo (K_c) por la evapotranspiración de referencia (ET_0), $K_c \times ET_0$, recomendado por FAO. Diversos trabajos anteriores han mostrado la posibilidad de estimar el K_c a partir del denominado índice de vegetación normalizado, NDVI, que se calcula mediante una combinación algebraica de la reflectividad espectral de la cubierta vegetal en las bandas del rojo e infrarrojo cercano. En este trabajo presentamos una metodología operativa para la obtención de mapas de valores del coeficiente de cultivo a partir de imágenes de satélite de alta resolución espacial, que permiten seguir individualmente la evolución del K_c en cada parcela. El procedimiento que se describe permite la obtención del así denominado K_c NDVI, y se basa en la acreditada relación lineal existente entre el NDVI y el coeficiente de cultivo basal. Dicha metodología ha sido validada con los resultados de las campañas llevadas a cabo en 2002 y 2003 en la zona piloto de Barrax (España) desarrolladas dentro del proyecto DEMETER para los siguientes cultivos: cebada, trigo, maíz, adormidera, remolacha, alfalfa, guisante, patata, cebolla y ajo. Los resultados muestran la aplicabilidad de la metodología aquí descrita en los cultivos que alcanzan alta cobertura vegetal, mientras que subestima el coeficiente de cultivo en aquellos que alcanzan baja cobertura vegetal en la etapa de máximo desarrollo.

Palabras clave: evapotranspiración, índice de vegetación, cobertura vegetal

Summary

Operative Methodology to Obtain the Crop Coefficient from Satellite Images

Crop evapotranspiration is usually calculated using the *crop coefficient* (K_c) \times *reference evapotranspiration* (ET_0) methodology, $K_c \times ET_0$, recommended by FAO. In the present work K_c have been estimated from the Normalized by Difference Vegetation Index, NDVI, derived from the vegetation canopy spectral reflectance in the red and infrared bands. We present an operative methodology to obtain crop coefficient values maps from high spatial resolution satellite imagery. Using a temporal imagery sequence we can obtain K_c temporal evolution monitoring of each plot. The described procedure enable us to obtain the denominated K_c NDVI, and it's based in the well known lineal relationship between the NDVI and the basal crop coefficient. This methodology have been validated with the results of the 2002 and 2003 campaigns in the pilot zone of Barrax (Spain) developed into DEMETER project for the following crops: barley, wheat, maize, opium poppy, sugar beet, alfalfa, bean, potato, onion and garlic. The results show the described methodology applicability in those crops that reach high effective full cover, but underestimate the crop coefficient in those crops that reach low effective full cover in the maximum growing stage.

Key words: evapotranspiration, vegetation index, vegetation canopy

Introducción

La evapotranspiración de un cultivo puede ser calculada usando el coeficiente de cultivo (K_c , ec. 1) definido como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas (ET_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_0). Este coeficiente integra el efecto de características que distinguen la evapotranspiración de un cultivo de la de la superficie de referencia. Los factores que determinan los coeficientes de cultivo son el tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo, y el estado de crecimiento y desarrollo (Allen et al., 1998; Bailey, 1990).

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (\text{Ec. 1})$$

La metodología propuesta por Wright (1982) divide el K_c en dos coeficientes separados, uno para la transpiración del cultivo (K_{cb} , coeficiente de cultivo basal) y otro para la evaporación del suelo (K_e). El coeficiente de evaporación del suelo, K_e , describe la componente de evaporación de la ET . Cuando la capa superficial del suelo está húmeda, después del riego o lluvia, K_e es máximo. La estimación del K_e requiere el conocimiento del balance de agua en el suelo (Allen et al., 1998). El coeficiente de cultivo basal es el debido a la transpiración, donde la componente de evaporación del suelo de la ET es mínima debido a que la capa superficial del suelo está seca pero hay disponible una adecuada humedad del suelo en la zona radicular del cultivo. De esta forma ET_c quedaría:

$$ET_c = [K_{cb} + K_e] ET_0 \quad (\text{Ec. 2})$$

Jackson et al. (1980) encontraron relación entre el coeficiente de cultivo medio (K_c) con el índice de vegetación perpendicular (PVI) para trigo. Heilman et al. (1982) inves-

tigaron la relación entre el porcentaje de cobertura y el índice de vegetación perpendicular basado en reflectividad (PVI) para alfalfa. Neale et al. (1989) relacionaron la reflectividad de la cubierta del cultivo con el coeficiente de cultivo basal para maíz, desarrollando una técnica operacional para la estimación de la ET del cultivo. El coeficiente de cultivo basado en reflectividad fue derivado mediante la transformación del índice de vegetación normalizado (NDVI) usando medidas del porcentaje de sombreado y del área foliar para establecer la cobertura efectiva máxima (EFC) y relacionarla con el coeficiente de cultivo basal. La ecuación obtenida para dos zonas experimentales (Fruita y Greely, Colorado) usando alfalfa como superficie de referencia es (Neale et al., 1989):

$$K_{cb \text{ NDVI alf}} = 1,181 * \text{NDVI} - 0,026 \quad (\text{Ec. 3})$$

González-Piqueras et al. (2003), durante las campañas experimentales del proyecto DEMETER, han obtenido, para maíz la siguiente ecuación para el cálculo del coeficiente de cultivo basal basado en reflectividad a partir del NDVI usando festuca como superficie de referencia:

$$K_{cb \text{ NDVI FAO}} = 1,37 * \text{NDVI} - 0,017 \quad (\text{Ec. 4})$$

Para poder comparar la ecuación 3 en la que se ha usado alfalfa como superficie de referencia con la ecuación 4 en la que se ha usado festuca como superficie de referencia hemos transformado la ecuación 3 multiplicando por un factor de 1.15 los valores K_{cb} basados en alfalfa pasando a ser valores K_{cb} basados en festuca, como se describe en ASCE 28 (1996).

$$K_{cb \text{ NDVI FAO}} = 1,36 * \text{NDVI} - 0,031 \quad (\text{Ec. 5})$$

La ecuación 5 y la ecuación 4 muestran la relación lineal entre el NDVI y el K_{cb} . Algunos estudios más, también han utilizado el NDVI para predecir el K_c (Bausch y Neale,

1989; Bausch, 1993, 1995; Choudhury et al., 1994).

En este trabajo presentamos una metodología para la obtención del coeficiente de cultivo a partir de imágenes de satélite directamente desde el NDVI, llamado "Kc-NDVI", basada en la relación lineal que describen las ec. 4 y 5 entre el NDVI y el coeficiente de cultivo basal.

Material y Metodología

Las 21 imágenes utilizadas han sido adquiridas por los sensores Landsat5-TM y Landsat7-TM, de las cuales 8 han sido adquiridas en la campaña del año 2002, y 13 en la campaña del año 2003. Las características básicas de las imágenes son: campo de visión: 185 x 185 Km²; resolución temporal: de 16 días y una resolución espacial de 30 m, la cual permite el seguimiento de parcelas superiores a una hectárea. La gran mayoría de las parcelas de la zona de estudio superan con creces este tamaño mínimo. En relación con la frecuencia temporal es de resaltar que la zona piloto, en donde se hallan las parcelas muestreadas, es el área de solape de imágenes LANDSAT adyacentes con lo que se dispone en este área de una frecuencia temporal de 8 días. Los intervalos de longitud de onda de ambos sensores en las bandas en las que se estima la reflectividad para calcular el NDVI son [0,63; 0,69 μm] en el rojo, banda 3, y [0,76; 0,90 μm] en el infrarrojo cercano, banda 4. El cálculo se realiza mediante la ecuación:

$$\text{NDVI} = (\text{IRC}-\text{R})/(\text{IRC}+\text{R}) \quad (\text{Ec. 6})$$

donde IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano, y R es la reflectividad en el rojo.

El procesado de las imágenes de satélite ha consistido en la corrección geométrica, georeferenciación en la proyección UTM, datum

europeo, cálculo de reflectividades aparentes y cálculo de los NDVI a partir de ellas. La utilización del NDVI supone un primer paso de corrección atmosférica. Las imágenes usadas en este trabajo han sido analizadas con superficies invariantes (Calera, 2000) para comprobar que la influencia de la atmósfera es pequeña.

La metodología descrita aquí ha sido validada con los resultados de las campañas 2002 y 2003 en la zona piloto de BARRAX (ESPAÑA) dentro del proyecto DEMETER (Demeter, 2002) para los siguientes cultivos: cebada, trigo, maíz, adormidera, remolacha, alfalfa, guisante, patata, cebolla y ajo. Para ello se han seleccionado y seguido en campo un conjunto de cerca de 600 parcelas de los diferentes cultivos con una superficie total de 11.000 ha. Su distribución espacial y sus características se muestran en la figura 1 y en la tabla 1, respectivamente. Los valores de Kc experimental (datos de campo) de estas 600 parcelas son valores estimados mediante seguimiento semanal en campo de la evolución fenológica de los cultivos por parte de los técnicos del Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete (SARA), que cuenta con una experiencia de más de 15 años en esta tarea (SantaOlalla et al., 2003). En estas parcelas los agricultores se comprometen a seguir las recomendaciones del SARA, con el objetivo de que los cultivos se encuentren en condiciones óptimas. Para cada una de estas parcelas se ha obtenido, para cada fecha en que disponemos de imagen el valor medio de NDVI derivado de las imágenes de satélite. De entre estas 600 parcelas y sobre un grupo de 17 parcelas escogidas con diferentes cultivos se ha medido, en la campaña del año 2003, la fracción de cobertura vegetal, f_c , a partir de fotografías digitales siguiendo la metodología descrita por Calera et al. (2001).

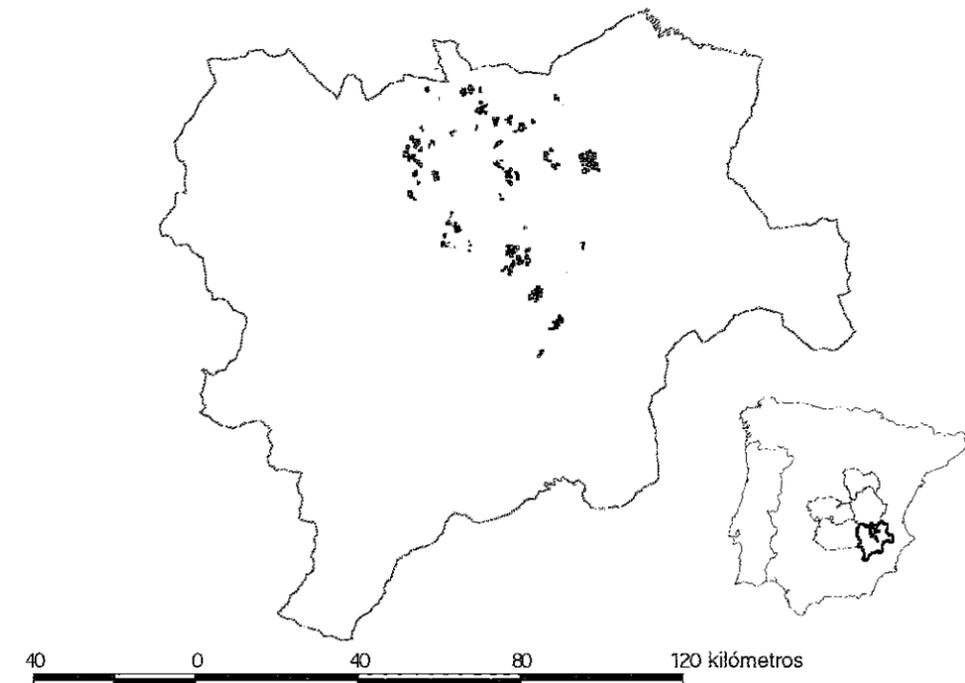


Figura 1. Mapa de localización de las parcelas seleccionadas para las campañas 2002 y 2003. La zona piloto abarca un área de cerca de 2.500 km², y el total de las superficies muestreadas en las campañas de 2002 y 2003 asciende a cerca de 110 km².

Figure 1. Location map of the selected plots for the 2002 and 2003 campaigns. The pilot zone has a 2,500 Km² area, and the total identified area extent in the 2002 and 2003 campaigns is 110 Km².

El cálculo del valor medio del NDVI para cada parcela se ha realizado en dos fases. En primer lugar se ha procedido a obtener un mapa vectorial con la delimitación de cada una de las parcelas en seguimiento en campo, para lo cual se ha partido del catastro digital de la propiedad rústica. En segundo lugar se ha realizado el cruce entre el mapa raster de NDVI y la capa de parcelas la cual se ha obtenido según el procedimiento anteriormente descrito, o-

peración de cruce realizada mediante tecnología de Sistemas de Información Geográfica. Dicho cruce permite asignar a todas y cada una de las parcelas el valor medio del NDVI correspondiente a esa imagen. Operando de esta manera, se ha obtenido el valor promedio y la desviación típica del NDVI para todas y cada una de las parcelas de un mismo tipo de cultivo para todas las imágenes disponibles.

Tabla 1. Número de parcelas seguidas en campo y superficie total de las mismas por cultivo y año
 Table 1. Number and total extent of the supervised in field plots by crop and year

Cultivo	Nº de parcelas muestreadas			Superficie (ha)		
	2002	2003	Total	2002	2003	Total
Adormidera	17	26	43	407	693	1.100
Ajo	5	28	33	100	345	445
Alfalfa	26	36	62	489	902	1.390
Cebada	27	54	81	611	703	1.314
Cebolla	11	10	21	123	264	388
Guisante	5	20	25	68	377	444
Maíz	55	88	143	994	1.528	2.522
Maíz dulce	0	13	13	0	253	253
Patata	0	5	5	0	135	135
Remolacha	14	21	35	250	346	596
Trigo	39	73	112	595	1.395	1.990
Otros	5	14	19	71	207	278
Total	204	388	592	3.708	7.148	10.855

Metodología para Derivar el Mapa de Kc desde Imagen de Satélite

Aproximación Coeficiente de Cultivo Dual-NDVI

El coeficiente de cultivo viene dado de acuerdo con Wright (1982), por

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (\text{Ec. 7})$$

La existencia de una robusta relación lineal entre el Kcb y el NDVI, tal y como se menciona en la introducción, nos permite derivar una relación para ser utilizada directamente desde las imágenes de satélite. Sin embargo, no podemos sustituir directamente la relación Kcb-NDVI descrita con la ec. 4 ya que ha sido obtenida mediante radiometría de campo, en la que el efecto de la atmósfera es despreciable, y los valores de NDVI para cada parcela han sido calculados desde las imágenes de satélite no corregidas atmosféricamente. El análisis de los valores de NDVI_{max} y NDVI_{mín} que se obtienen a partir de la secuencia temporal de las imágenes de satélite nos permite

hacer corresponder estos valores con aquellos de Kcb que corresponden al máximo de cobertura y al de suelo desnudo respectivamente, estimados estos últimos según Allen et al. (1998) y que se muestran en la tabla 2. Apoyándonos en la existencia de una relación lineal Kcb-NDVI, podemos obtener, desde los valores mostrados en la tabla 2, la relación lineal

$$K_{cb} = 1,5625 * NDVI - 0,1 \quad (\text{Ec. 8})$$

que puede ser utilizada en la secuencia temporal de imágenes de satélite. Es de resaltar que los valores de NDVI_{max} y NDVI_{mín} han permanecido constantes para todas las imágenes utilizadas en este estudio, y se han utilizado como valores de referencia para realizar el control de calidad de las imágenes de satélite

La componente de evaporación de suelo, Ke, está relacionada con la fracción de suelo desnudo y depende fuertemente de su estado de humedad. El sistema de riego (por superficie, aspersión, goteo, etc.) y la frecuencia de riego y la lluvia, junto con el tipo



Tabla 2. Valores promedio a escala de parcela máximos y mínimos de NDVI observados en las imágenes de satélite utilizadas en este trabajo, junto con los valores promedio de parámetros biofísicos asociados a los cultivos

Table 2. Maximum and minimum NDVI averaged values at plot scale observed in the satellite images used in this work, and the biophysical parameters associated to the crops average values

	NDVI	Kcb	Kc
Mínimo	0,16	0,15	0,4
Máximo	0,80	1,15	1,2

y fase del cultivo, son los factores que determinan el tiempo de las diferentes fases de secado y por tanto del ritmo de evaporación del suelo.

Se propone una primera aproximación para calcular la componente Ke, en la forma

$$K_e = (1 - f_c) * \beta \quad (\text{Ec. 9})$$

en la que fc es la fracción de cobertura vegetal verde, siendo por tanto (1-fc) la fracción de suelo desnudo, y donde β es un parámetro que permite reflejar el estado promedio evaporativo del suelo desnudo.

Un buen estimador de la fracción de cobertura vegetal verde, fc, (y por tanto, de la fracción de suelo desnudo, 1 - fc), es el NDVI, ya que está linealmente relacionado con la fc (Calera et al., 2001; Carlson y Ripley, 1997; Jochum et al., 2003). Como resultado del análisis de la relación entre los valores de NDVI de las parcelas donde se han realizado medidas en campo de fc (figura 2), para los cultivos de alfalfa, remolacha, ajo y cebolla (representativos de cultivos con diferente porcentaje de cobertura efectiva máxima) y en diferentes fases fenológicas, asumimos una relación lineal entre el NDVI y fc común para todos estos cultivos en la forma:

$$f_c = 1,318 * NDVI - 0,1877 \quad (\text{Ec. 10})$$

El parámetro β se puede estimar empíricamente como

$$\beta = K_{c,ini} - K_{cb,ini} \quad (\text{Ec. 11})$$

donde Kc,ini y Kcb,ini son los valores del coeficiente de cultivo y del coeficiente de cultivo basal correspondientes al suelo desnudo. Los valores de Kc,ini y Kcb,ini pueden ser estimados, bien a partir de datos promedio tomados de la bibliografía o calculados con las ecuaciones desarrolladas al efecto para adaptarlos a las condiciones propias del cultivo y de la frecuencia de riego (Allen et al., 1998) o de información local. Así, β es un parámetro que depende del cultivo, asociado a la frecuencia y sistema de riegos, y del estado de crecimiento del cultivo.

Aproximación Directa Coeficiente de Cultivo-NDVI

Si consideramos un valor típico de Kc,ini igual a 0,4 y un valor de Kcb,ini igual a 0,15, que en este caso es común a todos los cultivos estudiados (Allen et al., 1998), el valor de β es 0,25. Adoptando este valor y combinando las ecuaciones 7, 8, 9 y 10, obtenemos una relación general Kc-NDVI dada por

$$K_c = 1,233 * NDVI + 0,197 \quad (\text{Ec. 12})$$

Podemos obtener una relación Kc-NDVI operando de forma más directa: considerando una relación lineal entre el NDVI máximo y el máximo Kc (a cobertura efectiva completa), con el NDVI de suelo desnudo y el Kc correspondiente a suelo desnudo respectivamente. Usando los valores correspondientes de la tabla 2 obtenemos la ecuación:

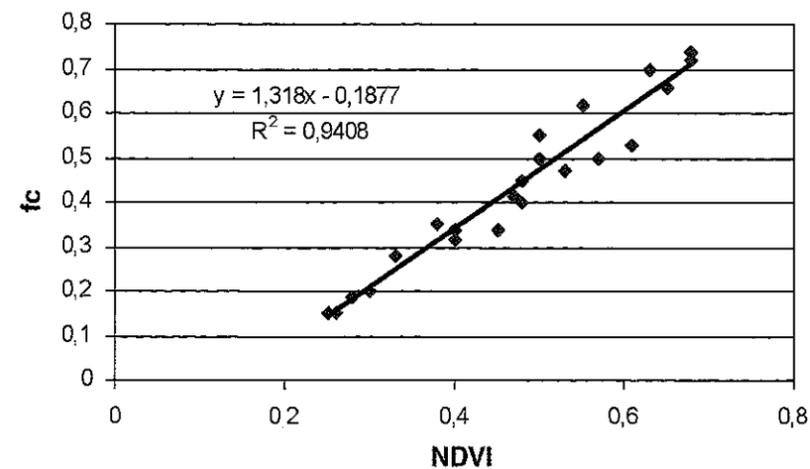


Figura 2. Relación entre la fracción de cobertura vegetal medida en campo con los índices de vegetación medidos desde el satélite en varias parcelas con diferentes cultivos.
Figure 2. Relationship between green fraction cover measured in field and the vegetation index measured from the satellite in several plots with different crops.

$$Kc = 1,25 * NDVI + 0,2 \quad (\text{Ec. 13})$$

Las ecuaciones 12 y 13 son muy similares. Por su simplicidad asumimos la ecuación 13 como la operacional para obtener el coeficiente de cultivo del NDVI calculado utilizando las reflectividades aparentes desde las imágenes LANDSAT o bien procedentes de imágenes de otros sensores intercalibrados con LANDSAT tal y como se propone en Martínez et al. (2004).

Debemos apuntar que la ecuación 13 es aplicable para las fases inicial, de crecimiento y meseta solamente. La aplicación en la última fase requiere, a priori, una ligera corrección ya que en el uso del NDVI para estimar la f_c se refleja la respuesta de la vegetación verde, no siendo así con la vegetación seca. Esto puede introducir un error a la hora de estimar el K_e , ya que con esta metodología, en la fase final, se confunde el papel del suelo con el de la vegetación seca, cuando la evaporación de un suelo desnudo regado es mayor que la de un suelo cubierto de vegetación seca. Por lo tanto, intentamos corregir

este efecto manteniendo un K_e constante para toda esta fase igual el K_e correspondiente con el K_e de la fase de meseta (f_c máxima y, por tanto, K_e mínimo). Asumimos un valor constante de 0.8 para cobertura vegetal verde (tabla 2) y combinando las ecuaciones 8 y 9, obtenemos:

$$Kc = 1,5625 * NDVI - 0,05 \quad (\text{Ec. 14})$$

En resumen, las ecuaciones operacionales serán la ecuación 13 para las fases inicial, desarrollo y media, y la ecuación 14 para la fase final.

No obstante, estudios posteriores nos han hecho ver que en las recomendaciones del SARA los valores estimados para esta última fase en los cultivos analizados en este trabajo se asemejan más a los valores de K_c estimados usando la ecuación 13 también en la fase final que los obtenidos a partir de la ecuación 14 para esta misma fase. Es de notar que las ec. 13 y 14 proporcionarán el valor del coeficiente de cultivo de cualquier superficie como si ésta estuviera en condiciones óptimas; una

forma de visualizar el mapa de K_c que así obtendríamos desde la imagen sería aquel que correspondería a toda la superficie considerada tras una intensa lluvia, después que se secase la parte más superficial del suelo.

Resultados y Discusión

La evolución temporal de los NDVI de algunos de los cultivos mencionados anteriormente, y la curva de K_c derivada de estos índices para estos cultivos tras aplicar las ecuaciones 13 y 14 se muestran en las figuras 3 y 4. En estas figuras se han representado las medias de los valores medios de $K_{c,NDVI}$ de todas las parcelas sembradas de un mismo cultivo y su correspondiente desviación estándar.

Comparando las dos campañas experimentales para cada cultivo dentro de un mismo gráfico observamos dos fenómenos: por un lado aparece un comportamiento muy simi-

lar en ambas campañas en los cultivos representativos de primavera, y por otra parte se muestra un adelanto en el crecimiento en los cultivos representativos de verano, como la remolacha y el maíz, en la campaña 2003, situación que puede ser consecuencia de la intensa ola de calor registrada en el mes de junio de ese mismo año.

La tabla 3 muestra la comparación entre los valores K_c estimados a partir de los NDVI usando la ecuación 13, y los valores para $K_{c,ini}$, $K_{c,med}$ de Allen et al. (1998) genéricos para los cultivos analizados. A su vez se han incluido los $K_{c,ini}$ y $K_{c,med}$ adaptados a las condiciones locales mediante ensayos de lisimetría por el SARA y corregidos con la dilatada experiencia de este servicio.

Como se observa en la tabla 3, existe un buen ajuste para cultivos de alto porcentaje de cobertura efectiva completa aunque aparecen pequeñas diferencias en el $K_{c,ini}$, sobrestimando la relación K_c -NDVI ligeramente para los cultivos de primavera.

Tabla 3. Comparación entre los valores medios de K_c calculados a partir de NDVI usando la ecuación 13, y los valores para $K_{c,ini}$, $K_{c,med}$ a partir de Allen et al. (1998) para los cultivos analizados
Table 3. Comparison between the averaged K_c values calculated from the NDVI using the eq. 13, and the values for $K_{c,ini}$, $K_{c,med}$ from Allen et al. (1998) for the analyzed crops

Cultivo Crop	NDVI mín	NDVI max	$K_{c,ini}$ Ec. 13	$K_{c,ini}$ Allen et al. (1998)	$K_{c,med}$ Ec. 13	$K_{c,med}$ Allen et al. (1998)
Alfalfa	0,16	0,80	0,4	0,40	1,20	1,20
Ajo	0,16	0,44	0,4	0,70 (0,40)*	0,75	1,00
Trigo	0,16	0,80	0,4	0,30	1,20	1,15
Cebada	0,16	0,80	0,4	0,30	1,20	1,15
Maíz	0,16	0,78	0,4	0,30 (0,40)*	1,17	1,20
Cebolla	0,16	0,53	0,4	0,70 (0,50)*	0,86	1,00
Guisante	0,16	0,80	0,4	0,40	1,20	1,00 (1,10)*
Remolacha	0,16	0,80	0,4	0,35 (0,40)*	1,20	1,20 (1,00)*
Adormidera	0,16	0,80	0,4	No existe referencia FAO (0,30)*	1,20	No existe referencia FAO (1,00)*

* Valores corregidos por el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) para la zona de estudio. Corrected values by Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) for the pilot zone

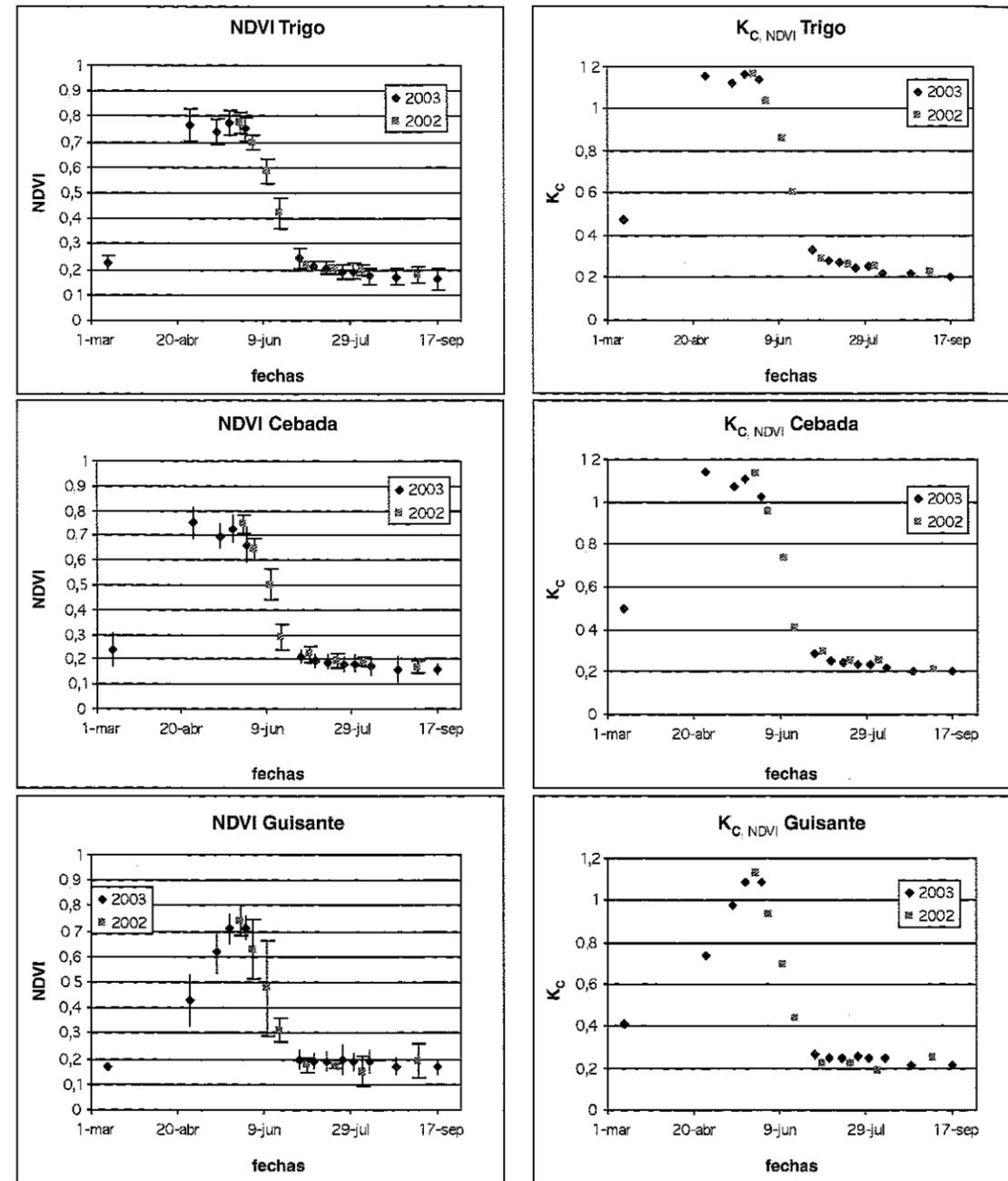


Figura 3. Evolución temporal de los NDVI de algunos de los cultivos representativos de primavera: cebada, trigo y guisante, y la curva de Kc derivada de estos índices mediante las ecuaciones 13 y 14.
 Figure 3. Temporal evolution of the NDVI of some of the representative spring crops: wheat, barley and pea, and the derived Kc curve from these NDVIs using the eq. 13 and 14.

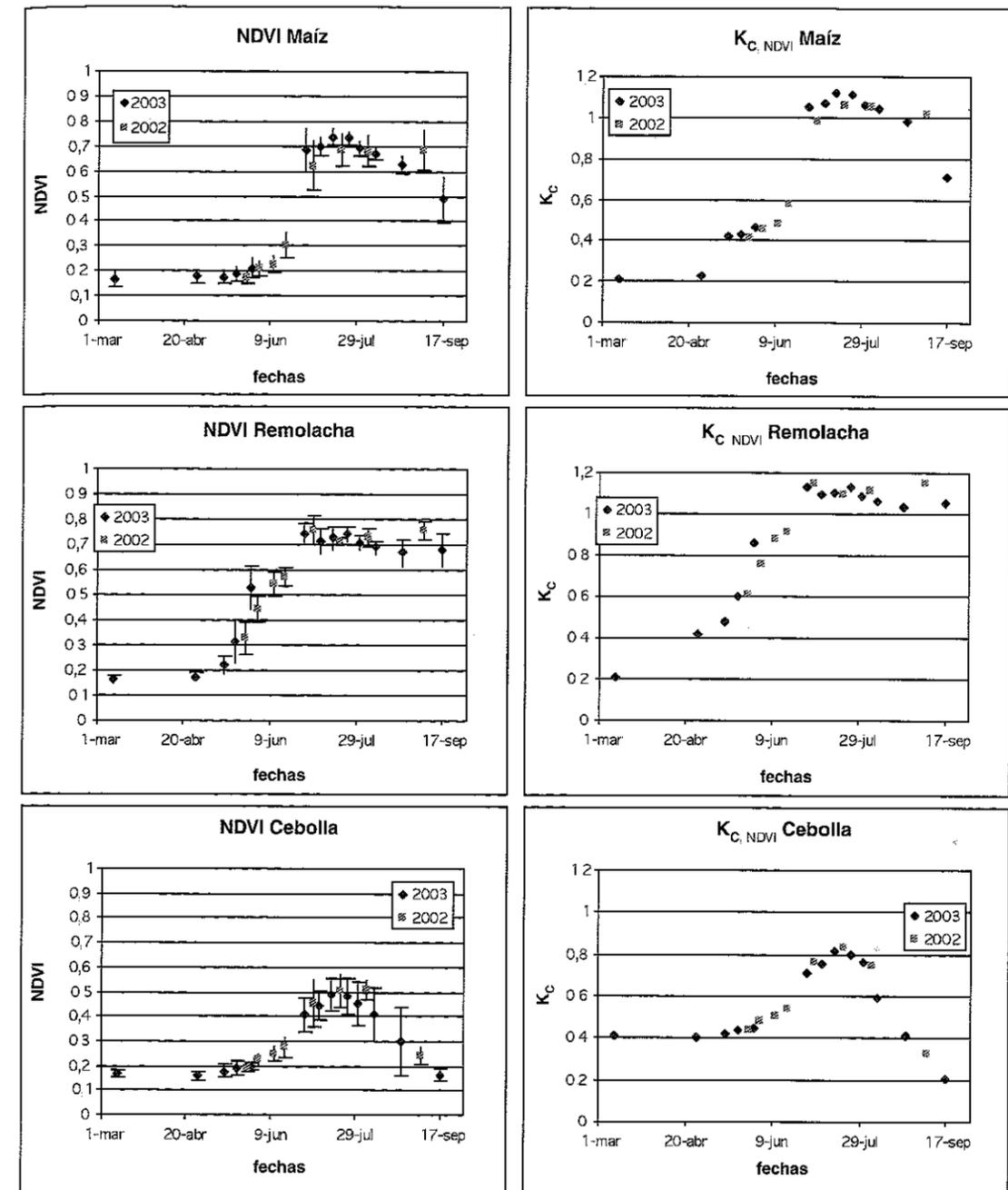


Figura 4. Evolución temporal de los NDVI de algunos de los cultivos representativos de verano: maíz, remolacha y cebolla, y la curva de Kc derivada de estos índices mediante las ecuaciones 13 y 14.
 Figure 4. Temporal evolution of the NDVI of some of the representative summer crops: maize, sugar beet and onion, and the derived Kc curve from these NDVIs using the eq. 13 and 14.

Aparecen desviaciones significativas de K_c , med basados en NDVI y K_c , med basados en FAO 56 en los cultivos ajo y cebolla, los cuales tienen bajo porcentaje de cobertura vegetal en su fase de máximo desarrollo, en contraste con el resto de cultivos estudiados. La mayor proporción de suelo desnudo en cultivos como ajo y cebolla pueden introducir y pueden reforzar efectos sobre el K_c relacionados con la frecuencia de riego, el sistema de riego utilizado, aspectos medioambientales y otros. Posteriores investigaciones necesitarán estudiar este comportamiento.

Conclusiones

La metodología Kc-NDVI anteriormente presentada permite derivar el coeficiente de cultivo desde las imágenes de satélite y proporciona un mapa de valores de K_c para cada imagen disponible. Los valores del coeficiente de cultivo representados en el mapa son aquellos que corresponden a condiciones ideales de crecimiento de la cubierta vegetal, circunstancia que asumimos se da en los cultivos en regadío en la zona de estudio, y que permite su comparación con otros valores obtenidos por procedimientos tradicionales. De esta forma, una secuencia temporal de imágenes permite el seguimiento de la evolución temporal del coeficiente de cultivo en sus diferentes fases de desarrollo en aquellos cultivos cuyo tamaño de parcela homogénea sea adecuado a la resolución espacial del sensor con el que se ha adquirido la imagen.

El valor del coeficiente de cultivo que se obtiene es el correspondiente a cada píxel de la imagen para la fecha en que fue adquirida. En el caso de una parcela, la extracción de información mediante herramientas SIG permite asignar un valor promedio a la parcela, y compararlo con otras

parcelas del mismo cultivo o de otros cultivos, lo que facilita un análisis interparcelario. Asimismo es posible analizar espacialmente la distribución de valores del K_c dentro de la parcela mediante un histograma para describir la homogeneidad espacial del cultivo y detectar así anomalías en el crecimiento, lo que hace posible el análisis intraparculario, acercándonos al concepto de agricultura de precisión.

La aplicación de la metodología Kc-NDVI a un extenso conjunto de parcelas de los cultivos en regadío en la zona de estudio en los años 2002 y 2003 ha permitido obtener las curvas típicas de evolución temporal de los coeficientes de cultivos Kc-NDVI durante dos campañas consecutivas. Las curvas correspondientes a un mismo cultivo muestran un muy similar comportamiento en ambas campañas, lo que podría considerarse un indicador de consistencia y reproducibilidad de los resultados. Las curvas Kc-NDVI reflejan las condiciones actuales de crecimiento de los cultivos, lo que se ha puesto de manifiesto en la campaña 2003 al reflejar un adelanto en el crecimiento de los cultivos de maíz y remolacha respecto a la campaña anterior consecuencia de un evento excepcional como fue la ola de calor que tuvo lugar en el mes de junio de 2003.

La comparación de los valores de K_c obtenidos mediante procedimientos tradicionales de visita en campo con aquellos obtenidos desde las imágenes de satélite mediante la aplicación de la metodología descrita expresada en la ecuación 13, muestra que la evolución temporal de las curvas desde ambos procedimientos siguen un mismo ritmo en los cultivos analizados, lo que muestra la capacidad de describir las fases de desarrollo mediante una secuencia de imágenes.

En cuanto a los valores numéricos, se ha encontrado un alto grado de coincidencia con los de aquellos cultivos que en su fase

de cobertura efectiva completa, cubren completamente el suelo. En aquellos otros cultivos en los que en la fase de máximo desarrollo no se cubre completamente el suelo, la ec. 13 infraestima ligeramente el valor de K_c . Es posible que la alta presencia de suelo desnudo induzca efectos de microadvección que se reflejan en los valores usualmente aceptados y que no son considerados aplicando la ec. 13. En este caso, así como en otros en que la combinación de frecuencia de riegos y alta fracción de suelo desnudo sea un parámetro relevante es posible realizar un ajuste específico del parámetro β , ya que en él se refleja el papel del suelo. En este caso sería necesario considerar ecuaciones específicas para un cultivo e incluso para un determinado manejo de parcela. Más trabajos de investigación son necesarios en esta dirección.

Agradecimientos

DEMETER (DEMONstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services), es un proyecto co-financiado por la Comisión Europea dentro del V Programa Marco (Programa "Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible", contrato EVG1-CT-2002-00078, 12/2002-11/2005). Asimismo hemos de agradecer los comentarios realizados en la revisión del trabajo por parte del comité técnico del congreso.

Bibliografía

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. UN-FAO, Rome, Italy.

Bailey JO, 1990. The Potential Value of Remotely Sensed Data in the Assessment of Evapotran-

spiration and Evaporation. *Remote Sensing Reviews*, 4(2): 349-377.

Bausch WC, 1993. Soil Background Effects on Reflectance-Based Crop Coefficients for Corn. *Remote Sensing of Environment*, 46: 213-222.

Bausch WC, 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management*. 27: 55-68.

Bausch WC, Neale CMU, 1989. Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling. *Transactions of the ASAE*, 32(6): 1901-1908.

Calera A, 2000. Seguimiento mediante Teledetección de la cubierta vegetal de los cultivos de secano y su relación con variables climáticas en Castilla la Mancha. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.

Calera A, Martínez C, Meliá J, 2001. A procedure for Obtaining Green Plant Cover: Relation to NDVI in a Case of Study for Barley. *International Journal of Remote Sensing*, 22 (17): 3357-3362.

Carlson TN, Ripley D, 1997. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, 62: 241-252

Choudhury BJ, Ahmed NU, Idso SB, Reginato RJ, Daughtry CST, 1994. Relations Between Evaporation Coefficients and Vegetation Indices Studied by Model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50: 1-17.

DEMETER, 2002. *Demonstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services*, <http://www.demeter-ec.net>

González-Piqueras J, Calera A, Gilabert MA, 2003. Estimation of Crop Coefficients by Means of Optimized Vegetation Indices for Corn. *Proceedings of the SPIE, Barcelona, September, 8-11th* (in press).

Heilman JL, Heilman WE, Moore DG, 1982. Evaluating the Crop Coefficient Using Spectral Reflectance. *Agronomy Journal*, 74: 967-971.

- Jackson RD, Salomonson VV, Schmugge TJ, 1980. Irrigation management future techniques. pp. 197-212. In Proc. of the ASAE's Second National Irrigation Symp., Irrigation Challenges of the 80's. ASAE Publ. 6-81, Am. Soc. Agric. Engr., St. Joseph, MI.
- Jochum AM, Calera A, Cuesta A, 2003. Space-assisted irrigation management: towards user-friendly products. *Proceedings of ICID-CIID International Workshop: Use of remote sensing of crop evapotranspiration for large regions: September 17, Montpellier, FRANCE.*
- Martín de Santa Olalla F, Calera A, Domínguez A, 2003. Monitoring irrigation water use by combining Irrigation Advisory Service, and remotely sensed data with a geographic information system. *Agricultural Water Management* 61 (2003) 111-124.
- Martínez Beltrán C, Calera Belmonte A, Meliá Miralles J, Jochum AM, 2004. Uncertainty geometric correction effects in the NDVI cross-calibration from different satellites. *Remote Sensing of Environment*. Submitted.
- Neale CMU, Bausch WC, Heermann DF, 1989. Development of Reflectance-Based Crop Coefficients for Corn. *Trans. ASAE* 32(6): 1891-1899.
- Wright JL, 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients, *Journal of Irrigation and Drainage*, 108(1): 57-74.

(Aceptado para publicación el 29 de abril de 2005)