

ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN ZONAS REGABLES MEDIANTE SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE

M. P González-Dugo (*), L. Mateos (**) y A. Díaz (*).

* IFAPA. Centro Alameda del Obispo. Avd. Menéndez Pidal s/n 14080 Córdoba, España

mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

** Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Apdo 4084, 14080 Córdoba, España

RESUMEN

Este trabajo compendia actividades que en los últimos años se han realizado en el seguimiento de regadíos de la Cuenca del Guadalquivir usando sensores remotos. La actividad principal ha consistido en el desarrollo de una metodología para la estimación en grandes zonas del consumo de agua en cultivos regados. La metodología consiste en la integración de una serie temporal de índices de vegetación en el modelo de FAO para la estimación de la evapotranspiración (ET). En primer lugar, los trabajos en una zona regable del Bajo Guadalquivir, durante las campañas 2004, 2005 y 2006, han permitido validar la estimación de propiedades biofísicas de los principales cultivos regados y analizar la productividad del agua de riego en dichos cultivos. En segundo lugar, utilizando datos procedentes de una campaña de medida en Iowa (EEUU), se ha validado este modelo de estimación de ET a partir de los flujos de energía determinados mediante un conjunto de 12 torres de medida de covarianza de torbellinos. Además, esta información ha permitido comparar el funcionamiento de este modelo con otros tres modelos basados en el balance de energía. Por último, una simplificación de este modelo se ha aplicado a los regadíos de la cuenca del río Guadalquivir durante las campañas 2007 y 2008, en colaboración con la empresa pública Dap y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

ABSTRACT

This work presents a summary of a number of activities related to the estimation of crop water consumption in irrigated areas using remote sensing. The main activity was the formulation of a model to estimate the water consumption in large irrigation schemes. This model uses a temporal series of vegetation indices, and integrates it in the FAO procedure to compute evapotranspiration (ET). Firstly, we present the assessment of biophysical variables for several crops in the lower Guadalquivir valley and the application of the remote sensing-based model to the analysis of water productivity in this irrigation area. Secondly, we present the validation of the ET model using a dataset collected during the SMACEX campaign in Iowa (US), comprising the measurements of energy fluxes using twelve eddy covariance towers. Using this dataset, the performance of the ET model (FAO approach) was compared with the performance of three models based on the surface energy balance. Finally, in collaboration the Guadalquivir river basin authority and the public company Dap, a simplified approach of the described ET model was applied to irrigation areas in the Guadalquivir river basin during 2007 and 2008.

Palabras clave: evapotranspiración, índice de vegetación, fracción de cobertura, riego.

INTRODUCCIÓN

La integración de datos remotos en modelos de estimación de la evapotranspiración (ET) ha permitido en los últimos años mejorar la precisión en las estimaciones de una variable clave en los balances de agua y energía, proporcionando a su vez información espacialmente distribuida sobre zonas extensas. Esta aproximación ofrece la posibilidad de abordar la gestión del agua a distintas escalas espaciales desde parcela a zona regable o cuenca.

Mediante series temporales de imágenes de satélite es posible realizar un seguimiento regular del crecimiento de los cultivos y su consumo de agua, desarrollando aplicaciones como las que se

presentan en este trabajo para la cuenca del río Guadalquivir.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ESTIMACIÓN DE ET

El modelo fue publicado por González-Dugo y Mateos (2008). Se basa en el procedimiento propuesto por FAO, que aplica los conceptos de coeficiente de cultivo y evapotranspiración de referencia. Los valores de evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm) se determinan mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y el coeficiente de cultivo se deriva usando un método dual, en la forma popularizada por FAO. Esta aproximación separa la transpiración del cultivo

(representado por el coeficiente de cultivo basal K_{cb}) de la evaporación desde el suelo:

$$ET = (K_{cb}K_s + K_e)ET_o \quad (1)$$

donde K_s cuantifica la reducción en la transpiración del cultivo debido al déficit de agua en el suelo y K_e es el coeficiente de evaporación desde el suelo.

El cálculo de K_e en la Eq.(1) requiere información sobre la ocurrencia de humedecimiento del suelo por riego o lluvia. Para ello es necesario disponer, por un lado, de datos de lluvia procedentes de una estación meteorológica cercana, y por otro lado, de las fechas y cantidades de agua aplicadas en forma de riego en cada parcela. Dado que esta información no está disponible en aplicaciones a escala de zona regable o cuenca, se ha realizado un balance de agua en la zona radicular en el que se programa el riego de forma automática cuando el déficit de agua en la zona radicular alcanza un nivel por encima del cual ocurre estrés. La asunción que subyace en este cálculo es que en las zonas regadas en estudio el estrés hídrico raramente ocurre o es muy suave.

Por tanto, en ausencia de déficit hídrico ($K_s=0$) la transpiración de un cultivo (T) es:

$$T = K_{cb}ET_o \quad (2)$$

Dado que el coeficiente de transpiración (T_c , definido como el cociente entre la transpiración de un cultivo sin estrés y la evapotranspiración máxima un cultivo en cobertura completa) y el índice de área foliar (IAF) están relacionados por una expresión exponencial (Choudhury *et al.*, 1994):

$$T_c = 1 - e^{-K IAF} \quad (3)$$

donde el coeficiente de amortiguamiento K parece tomar valores entre 0.5 y 0.7 (Choudhury *et al.*, 1994), y con base en las definiciones de K_{cb} y T_c , ambos coeficientes se relacionan según la expresión:

$$K_{cb} = K_{cb,max} T_c \quad (4)$$

siendo $K_{cb,max}$ el coeficiente basal de un cultivo con cobertura del suelo efectiva.

Por otro lado, se han descrito relaciones entre los índices multiespectrales de vegetación y variables de crecimiento de los cultivos como el IAF y la fracción de cobertura del suelo (f_c). Resultados experimentales compilados por Choudhury *et al.* (1994) han mostrado que los índices de vegetación se pueden estimar mediante una función exponencial del IAF :

$$VI = VI_{\max} - (VI_{\max} - VI_{\min})e^{-K' IAF} \quad (5)$$

donde VI puede ser tanto $NDVI$ como $SAVI$ y los subíndices *max* y *min* se refieren a los valores que adoptaría el índice en cubiertas con infinito IAF y suelo desnudo ($IAF=0$), respectivamente. El coeficiente K' depende fundamentalmente de la disposición de las hojas, tomando valores entre 0.5-0.7 para $SAVI$ y 0.8 -1.3 cuando el índice empleado es $NDVI$. Combinando las ecuaciones (3) y (5):

$$T_c = 1 - \left[\frac{VI_{\max} - VI}{VI_{\max} - VI_{\min}} \right]^\eta \quad (6)$$

donde $\eta = (K/K')$. Sustituyendo T_c en la Eq.(4) por la Eq.(6),

$$K_{cb} = K_{cb,max} \left[1 - \left(\frac{VI_{\max} - VI}{VI_{\max} - VI_{\min}} \right)^\eta \right] \quad (7)$$

La Eq. (7) es una ecuación genérica para derivar K_{cb} desde un VI. Hunsaker *et al.* (2005) desarrollaron varias funciones empíricas de segundo y tercer grado para relacionar K_{cb} y $NDVI$ en cultivos de algodón y trigo. También en trigo, Er-raki *et al.* (2007) llegaron en una zona de Marruecos a una expresión equivalente a la Eq.(7) combinando ecuaciones obtenidas experimentalmente. Otros autores (Calera *et al.* 2003) eligieron ajustes lineales para la relación $K_{cb}-NDVI$.

Usando valores de K y K' citados por Choudhury *et al.* (1994), el exponente η toma valores cercanos a 1 cuando el índice de vegetación empleado es $SAVI$. En este caso la Eq.(7) se aproxima a la linealidad. Teniendo en cuenta la relación entre VI y f_c descrita por varios autores:

$$(1 - f_c)^\xi = \frac{VI_{\max} - VI}{VI_{\max} - VI_{\min}} \quad (8)$$

y que los datos experimentales presentados en el siguiente apartado, correspondientes a varias campañas de medida sobre remolacha, algodón y tomate, arrojan valores de ξ iguales a 1 cuando el índice empleado es $SAVI$ y 1.8 cuando es $NDVI$, es posible añadir una segunda igualdad a la Eq.(7):

$$K_{cb} = K_{cb,max} \frac{SAVI - SAVI_{\min}}{SAVI_{\max} - SAVI_{\min}} = K_{cb,max} f_c \quad (9)$$

Esta ecuación lineal permite determinar K_{cb} de una forma sencilla a partir de medidas de fracción de cobertura del suelo (que es fácil de determinar en campo) o bien mediante la reflectividad del cultivo en las regiones del rojo e infrarrojo cercano medida por sensores a bordo de cualquier tipo de plataforma.

Se ha considerado como factor adicional en la determinación de K_{cb} el hecho de que éste alcanza un valor máximo antes de la cobertura completa del suelo (a una cobertura considerada efectiva, $f_{c,mx}$). Por tanto, la Eq.(9) se ha modificado de la forma:

$$K_{cb} = \frac{K_{cb,mx}}{f_{c,mx}} f_c = \frac{K_{cb,mx}}{f_{c,mx}} \left(\frac{SAVI - SAVI_{min}}{SAVI_{max} - SAVI_{min}} \right) \text{ si } f_c < f_{c,mx} \quad (10a)$$

$$K_{cb} = K_{cb,max} \quad \text{si } f_c \geq f_{c,mx} \quad (10b)$$

Este tipo de relación fue descrita hace más de dos décadas para frutales y el mismo concepto ha sido aplicado más recientemente en varios modelos de cálculo de la transpiración y evaporación desde el suelo para cultivos extensivos (Hanson y May, 2006).

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS BIOFÍSICOS MEDIANTE VIIS

El trabajo experimental se ha abordado en una zona regable situada en el Bajo Guadalquivir (Sector B-XII del Bajo Guadalquivir, Fig.1).

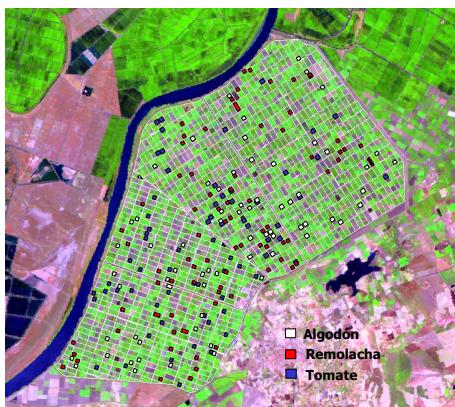


Figura 1.- Z.R. Sector B-XII del Bajo Guadalquivir. Localización de las parcelas en que se ha realizado el análisis de productividad del agua.

Las características topográficas y de tamaño y forma de las parcelas agrícolas de esta Z.R. facilitan el análisis mediante sensores remotos. Durante varias campañas se ha realizado un seguimiento de forma regular de la respuesta espectral y de las principales variables de crecimiento de los cultivos mayoritarios en la zona (algodón, remolacha y tomate) a lo largo de su ciclo completo de crecimiento. Este seguimiento se ha abordado en parcelas experimentales de pequeño tamaño y en parcelas comerciales de alrededor de 4-6 ha de superficie.

Los resultados obtenidos en las parcelas experimentales se presentan en la Fig.2, que muestra las medidas de f_c , IAF y biomasa frente a los índices seleccionados (NDVI y SAVI). En todos los casos se puede observar una firme correlación entre ellos. Durante los primeros estadios del desarrollo de los cultivos, las variables de crecimiento aumentan gradualmente con el incremento de los índices, pero tanto la biomasa como el IAF aumentan de forma mucho más pronunciada al sobrepasar un umbral, situado alrededor de 300 g/m² y 3, respectivamente, para la remolacha, y 250 g/m² y 1.3, respectivamente, para el algodón. A partir de estos valores, ambas variables se muestran muy sensibles a pequeñas variaciones en ambos índices. Es conveniente destacar que para ambos cultivos la relación IV-f_c no muestra ese marcado cambio. Por otro lado, ambos índices mostraron sensibilidad a la senescencia de las hojas, con valores de los índices distintos para un mismo valor de una variable de crecimiento según la medida ocurra antes o después de alcanzar el máximo del crecimiento. El caso del tomate es ligeramente distinto debido a la arquitectura de la planta.

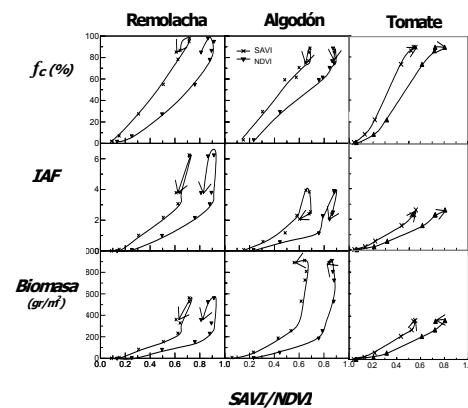


Figura 2.- Variación medida en campo de NDVI y SAVI con f_c , IAF y biomasa seca. La flechas muestran la secuencia temporal de las medidas.

Las medidas a escala de parcela comercial se han empleado para validar la aplicación del modelo a esta escala, permitiendo analizar la productividad del agua en un número representativo de parcelas (Fig.1). Los resultados obtenidos han permitido evaluar en condiciones de campo la relación entre el agua aprovechada por los cultivos y la producción obtenida, con el objetivo de mejorar nuestro conocimiento sobre los factores que pueden contribuir a reducir el rendimiento en campo respecto al obtenido en condiciones experimentales.

VALIDACIÓN DEL MODELO DE ET Y COMPARACIÓN CON MODELOS DE BALANCE DE ENERGÍA

Un conjunto de datos recogidos durante un mes y medio por 12 torres de medida de flujos de energía en Iowa (dentro de la campaña SMACEX descrita en Kustas *et al.* 2005), sobre un conjunto de parcelas de soja y maíz, permitieron validar el resultado en estos cultivos del modelo de estimación de ET presentado anteriormente. A su vez, se comparó el funcionamiento de tres modelos de balance de energía ampliamente utilizados en la actualidad, dos de ellos de una fuente (un modelo empírico denominado aquí 1S-Emp y el modelo METRIC) y un modelo de dos fuentes. Los resultados detallados de esta comparación se presentan en González-Dugo *et al.* (2009).

Los tres modelos de balance de energía mostraron valores de desviación media cuadrática (RMSD) inferiores a 50 Wm⁻² en las estimaciones instantáneas de calor latente y sensible, resultando el de doble fuente más ajustado a los valores medidos que los dos modelos de una fuente. Respecto a los valores diarios, cuyo resultado se muestra en la Fig.3, el modelo descrito, basado en la aproximación FAO-IV, presentó un RMSD de 0.42 mm dia⁻¹, intermedio entre las desviaciones presentadas por los modelos de una (0.57 mm dia⁻¹) y dos fuentes(0.39 mm dia⁻¹).

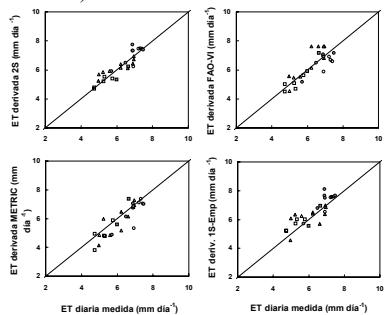


Figura 3.- Estimaciones de ET de los 4 modelos a escala diaria frente a medidas realizadas en campo.

SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO DE ET Y APLICACIÓN A GRAN ESCALA

Una modificación del modelo de estimación de ET, que simplifica la estimación de la evaporación desde el suelo, se ha aplicado a una zona extensa de la cuenca de río Guadalquivir durante los años 2007 y 2008. En 2009 se prevé la extensión a la Cuenca completa. La información

generada, junto a la clasificación de cultivos derivada de una serie de imágenes de los satélites Landsat e IRS, está sirviendo de ayuda a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para elaborar balances de agua del regadio de la cuenca.

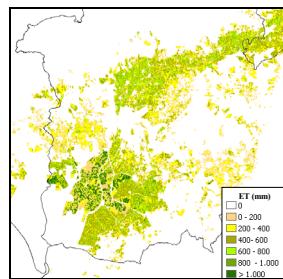


Figura 4.- ET estacional (Marzo a Sept, 2008) en los regadíos de la provincia de Sevilla.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen RG *et al.* 1998 FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome.
- Calera A *et al.* 2003 Space-assisted irrigation management. ICID workshop Montpellier, 17 Sept.
- Choudhury BJ *et al.* 1994 Relations between evaporation coeff and vegetation indices studied by model simulations *Rem Sens Enviro* 50, 1-17.
- Er-Raki S *et al.* 2007 Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region *Agric Water Manag* 87, 41-54.
- González-Dugo MP y L Mateos 2008 Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops *Agric Water Manage* 95(1): 48-58.
- González-Dugo MP *et al.* 2009 A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop ET- *Agric Forest Met* (en prensa).
- Hanson BR, DM May 2006 Crop coefficients for drip-irrigated tomato *Agri Water Manag* 81:381-99.
- Hunsaker DJ *et al.* 2005 Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. *Irrig Sci* 24: 1-14.
- Kustas WP *et al.* 2005 The soil moisture-atmosphere coupling experiment (SMACEX): background, hydrometeorological conditions, and preliminary findings *J Hydromet* 6: 791-804.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la financiación del RTA2005-047 y NRA 00OES-07 del NASA Terrestrial Hidrol. Program, y al Coop Research Prog. de la OCDE.