

Estimación de evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_0 , a partir de imágenes NOAA-AVHRR.

M. Sánchez, y E. Chuvieco
Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile
Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá

RESUMEN

A partir de análisis de regresión múltiple entre valores de evapotranspiración del cultivo de referencia diaria, ET_0 , estimados con el método de Penman-Monteith y diversas variables derivadas de imágenes NOAA-AVHRR, se generan modelos que permiten estimar la ET en la Comunidad Autónoma de Andalucía en el periodo comprendido entre los años 1994 y 1997. Los modelos fueron evaluados satisfactoriamente en las estaciones meteorológicas utilizadas, así como también a través de mapas regionales de porcentajes de variación entre valores observados y estimados. De acuerdo con estos resultados es posible afirmar la utilidad de la teledetección en la determinación de la ET_0 a escala regional.

PALABRAS CLAVE: NOAA-AVHRR, Evapotranspiración, Andalucía

ABSTRACT

This paper intends to obtain accurate estimations of reference evapotranspiration from multitemporal analysis of NOAA-AVHRR images. The study area corresponds to the Autonomous Community of Andalucía, and the period of analysis comprehends the spring and summer seasons of 1994 to 1997. Results obtained from multiple regression analysis are compared with those derived from spatial interpolation, using geostatistical methods. The results show a better fitting and more realistic trends for those maps derived from satellite data than those generated from spatial interpolation.

KEY WORDS: NOAA-AVHRR, Evapotranspiration, Andalucía

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) como proceso a través del cual la superficie terrestre devuelve a la atmósfera en forma de vapor el agua que precipita sobre ella, constituye un importante elemento que enlaza el ciclo hidrológico y el balance de energía superficial, permitiendo a través de la transferencia de masa y energía mantener unos niveles energéticos e hídricos adecuados en el sistema tierra-atmósfera. Pese a la importancia de conocer bien la ET, ya sea expresada como volumen de agua transpirada o como energía involucrada en el proceso, resulta muy complejo realizar estimaciones precisas, al tratarse de un proceso relacionado con múltiples factores. Por un lado, estarían aquellas variables relacionadas con las condiciones climáticas y/o meteorológicas imperantes en el momento en que se realiza su determinación; por otro, resultan clave también las características fisiológicas de las especies vegetales, ya que la transpiración está directamente relacionada con los mecanismos de resistencia a la sequía que posee cada planta.

A pesar de la larga tradición con que cuentan los estudios de ET, y de la amplia cantidad de índices propuestos, no existe un acuerdo generalizado sobre los métodos más recomendables en cada

zona, que muchas veces se verán constreñidos por las propias limitaciones en el registro de algunas variables críticas en este proceso (radiación, viento...etc). Además, aun utilizando métodos consistentes, la estimación de la ET se realizará de modo puntual; es decir, en los lugares donde se sitúan los observatorios meteorológicos o el instrumental destinado a tal propósito. Si se pretende obtener unaimagen de la variación regional de esta variable, aumenta notablemente la incertidumbre de la estimación, al precisarse métodos de interpolación / extrapolación suficientemente fiables (Sánchez y Chuvieco, en revisión).

En este artículo pretendemos analizar las posibles aportaciones de la teledetección a solventar algunos de estos problemas. Por un lado, se trata de una técnica que recoge información de la vegetación misma, y no de las condiciones de la atmósfera, lo que permitiría una estimación más directa de la ET en las plantas. Por otro, proporciona una información espacialmente exhaustiva, lo que ofrece una visión regional de la variable de interés. Lógicamente, el interés de esta técnica sólo se demostrará si verificamos sólidas relaciones entre la ET y la información espectral proporcionada por las imágenes.

DETERMINACION DE LA ET A PARTIR DE METODOS DE TELEDETECCION

Entre los métodos utilizados hasta el momento para estimar la ET a partir de la teledetección, podemos establecer dos grandes grupos, según se trate de modelos que han sido elaborados con este fin (directos), o hayan sido creados para el estudio de otros fenómenos o procesos superficiales, pero son útiles en el campo que nos ocupa dada su relación con el problema (indirectos). Dentro de los primeros se encuentra el modelo general basado en el balance de energía, en tanto que en los segundos se insertan todas las aproximaciones relacionadas con la temperatura superficial, con ciertas características de la vegetación y aquellas que aprovechan simultáneamente ambos aspectos.

Uno de los métodos teóricos más sólidos para estimar la ET es la ecuación del balance de energía¹, que describe la distribución de la radiación neta recibida por la superficie terrestre en diferentes procesos; esta ecuación deriva en el denominado método residual² que constituye una de las aproximaciones más ampliamente utilizadas en la determinación de la ET instantánea y diaria (Choudhury, 1994) al calcular cada uno de los términos que igualan al flujo de calor latente y obtener éste como el residuo de la ecuación. De los procesos incluidos en la ecuación, sólo la R_n puede obtenerse en forma relativamente directa a partir de medidas satelitales (López-Baeza, 1991), los demás términos se pueden conseguir tras la combinación con información observada en tierra. En Desbois *et al.* (1997) se presenta la solución a cada uno de los términos apoyada en información proporcionada por teledetección. Ahí se observa que el aporte de esta técnica radica en buena parte en la medida de la temperatura superficial, parámetro que es requerido por algunos de los términos, y en la entrega de datos sobre ciertas características de la vegetación. El método residual no resulta fácilmente aplicable, por lo que ha sido modificado por R.D. Jackson y colaboradores (1977) y derivado en la denominada "ecuación simplificada"³; en ésta, la temperatura superficial también es un elemento importante al constituirse en el principal indicador de la distribución de la energía disponible en la superficie de la Tierra a través de su efecto sobre el flujo de calor latente y sensible a la atmósfera,

flujo de calor sensible hacia el suelo y radiación hacia la atmósfera. Esta ecuación sigue siendo revisada y modificada para alcanzar una mayor operatividad en su uso; en este sentido destacan los modelos elaborados y/o aplicados por Seguin *et al.* (1989, 1991 y 1994), Seguin (1993), Artigao *et al.* (1997) y Caselles *et al.* (1998) para determinar la evapotranspiración real y el presentado por Delegido *et al.* (1991); Caselles *et al.* (1992 y 1993) y Delegido y Caselles (1993) para calcular la ET_o y ET_m .

En el otro lado se encuentran los modelos indirectos, fundamentados como se ha dicho en las relaciones entre ET y la temperatura de superficie y algunas características de la vegetación como la expresada a través de ciertos índices especialmente el NDVI (*Nonnormalized Difference Vegetation Index*). La relación entre ET y la vegetación se basa en el efecto de la ET sobre el vigor de los tejidos vegetales y la fotosíntesis. Por otro lado, como señalan Yang *et al.* (1997) ambos parámetros son afectados por elementos meteorológicos como la temperatura, la radiación solar y el déficit de presión de vapor, entre otros. De acuerdo con lo anterior, para comprender las variaciones de la transpiración y ET es necesario contar con información cuantitativa de los cambios espaciales y temporales de las características de la vegetación, lo cual sería abordable mediante teledetección (Choudhury y de Bruin, 1995; Kalluri *et al.*, 1998).

Entre la temperatura de superficie e índices de vegetación se ha demostrado una alta correlación negativa, dado que una disminución en la temperatura, a medida que aumenta el vigor vegetal, es producto del enfriamiento provocado en la misma por el flujo de calor latente o ET (Nemani y Running, 1989, Yang, X., *et al.*, 1997; Caselles *et al.*, 1998, entre otros). Aunque esta relación ha sido estudiada en superficies completamente cubiertas por vegetación, también es válida en superficies compuestas, en cuyo caso las variaciones espaciales en la temperatura superficial son determinadas ampliamente por la distribución del contenido de agua en la superficie del suelo, lo cual es modificado por la cubierta vegetal.

Otra relación de importancia que vincula temperatura de superficie e índices de vegetación con la ET es la existente entre la diferencia de temperatura de superficie y del aire ($T_s - T_a$) y la ET. Esta relación se basa en el hecho de que normalmente en un punto cualquiera la T_s es mayor a la T_a . Esta diferencia tiende a reducirse si en la cubierta se produce flujo de calor latente o ET, con el consecuente efecto refrigerante, dependiente a su vez del contenido de agua de la cubierta; de esta manera se asocia ET y estrés hídrico vegetal. Esta relación ha favorecido la generación de métodos para la estimación del estrés a partir de información satelital, en especial el *Water Deficit Index* (WDI) elaborada

¹ $R_n = \lambda ET + H + G + PH$ donde: R_n es la radiación neta; (ET es el flujo de calor latente o evapotranspiración donde λ es el calor latente de vaporización y ET el flujo de agua evaporada; H es el flujo de calor sensible; G es el flujo de calor del suelo; PH es la energía utilizada en la fotosíntesis y en calentar la biomasa vegetal (Sánchez T., 1992).

² $\lambda ET = R_n - H - G$ donde los términos ya han sido definidos.

³ $ET_d = R_{nd} * - B (T_s - T_a)$, donde: ET_d es la evapotranspiración real diaria; $R_{nd}*$ es la radiación neta diaria, expresada en mm/día; B es una constante empírica y $(T_s - T_a)$, es la diferencia entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire medidas cerca del mediodía.

do por Moran y colaboradores en 1994⁴. Según los fundamentos del WDI, existe una relación entre la magnitud de la $T_S - T_A$ y el valor alcanzado por el NDVI. Para un mismo valor de NDVI, una mayor diferencia entre T_S y T_A indicará que la cubierta está padeciendo estrés hídrico y que el efecto refrigerante que genera el flujo de calor latente o ET es limitado o no se produce por falta de agua. Este índice se relaciona también con el cociente entre ET real y ET potencial (ETR/ETP), con lo cual se evidencia de nuevo la estrecha relación entre ET y estrés hídrico vegetal. Por último, debe destacarse el hecho de que conociendo el valor del WDI y la ETP con algún método convencional es posible obtener la ETR, parámetro muy difícil de determinar con precisión en superficies extensas con los métodos convencionales; esto constituye un gran aporte de la teledetección al estudio de la ET.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es demostrar la utilidad de la información obtenida por teledetección en la determinación de la ET a escala regional. En términos más precisos, se intenta utilizar los datos satelitales en la interpolación o estimación de la ET del cultivo de referencia, ET_0 , en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Para cumplir con este objetivo es necesario determinar la ET a partir de datos meteorológicos con un método convencional de cierta precisión, reconociendo su variabilidad espacial y temporal; como contrapartida, se debe generar la información satelital teóricamente asociada al fenómeno, observando también sus cambios espaciales y su evolución temporal. Como otro objetivo se plantea relacionar los dos tipos de datos para detectar las asociaciones existentes entre ellos y en función de las cuales generar modelos de estimación que permitan dar una imagen de la ET a escala regional y de precisión adecuada.

El método convencional a utilizar es el método de Penman-Monteith y las imágenes de satélite son las proporcionadas por el sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo de los satélites de la serie NOAA.

AREA Y PERIODO DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la Comunidad Autónoma de Andalucía la cual posee una superficie de 87.268 km² dadas sus dimensiones y los variados contrastes espaciales que generan elementos como el clima, el relieve o la vegetación constituye un área idónea para realizar un estudio de estas características.

De acuerdo a su posición con respecto a las grandes zonas climáticas, el clima de Andalucía

está situado dentro de los mediterráneos propios de las fachadas occidentales de los continentes localizados en la zona de los climas templado-cálidos. Presenta una variante de matiz atlántico en el sector occidental que debe sus características al flujo del oeste, a las aguas frescas del océano y a la acción directa del anticiclón de las Azores; mientras que en la zona oriental, que mira al mar Mediterráneo, esos caracteres se matizan con los mecanismos atmosféricos ligados a las aguas cálidas, los flujos del este e incluso los del sur, de procedencia sahariana. El clima de Andalucía tiene un carácter oceánico en otoño, invierno y primavera, es decir, durante las estaciones lluviosas del año, y una apariencia temporal de desierto en los meses de verano.

Morfológicamente, el territorio andaluz está constituido por tres grandes unidades: la Sierra Morena al norte; al centro, aunque desplazada hacia occidente, la gran Depresión del Guadalquivir y por último, a lo largo del Mediterráneo y con su máxima expansión al este, donde alcanza su mayor anchura, las cordilleras Béticas, conjunto montañoso que contiene las máximas altitudes regionales y peninsulares. Estas unidades imprimen a Andalucía grandes contrastes, a tal punto que se puede hablar de una Alta Andalucía, la de las sierras, fundamentalmente las Béticas en el sector oriental de la región, y una Baja Andalucía identificada con la amplia Depresión del Guadalquivir, especialmente en su mitad occidental en donde las partes bajas son dominantes.

Las cubiertas vegetales se pueden dividir en dos grandes grupos: las superficies agrícolas y las cubiertas de vegetación natural y repoblada. Las áreas agrícolas, asociadas con las zonas bajas y relieves suaves de la parte central de la región, representan el 58,1 % de Andalucía; están compuestas por cultivos de secano (22,7% regional), los olivares (12,7), los sistemas agroforestales o dehesas (7,7%) y los cultivos de regadío permanentes (5,5%); por su parte las superficies con vegetación natural y repoblada corresponden al 34,1% de la superficie regional. Su localización se reduce a aquellas zonas que han ofrecido dificultades a la expansión de la agricultura y a los principales relieves de la región. La cubierta más importante en extensión es la vegetación esclerófila con el 12,7% de la superficie regional, los pastizales con poco menos del 5% y el arbolado que ocupa casi el 14% regional y corresponde fundamentalmente a frondosas y coníferas.

El período de estudio corresponde a los meses comprendidos entre marzo y septiembre de los años 1994 a 1997. Tanto los contrastes estacionales del período seleccionado, primavera y verano, como la consideración de cuatro años distintos asegura contar con una variabilidad temporal del fenómeno que favorece el contraste de resultados. Debe señalarse que los años estudiados resultan significativos en un estudio como este, puesto que

⁴ Este índice se basa en algunas propuestas previas, como el *Crop Water Stress Index* (CWSI) elaborado por Jackson y colaboradores en 1981

ellos han presentado características climáticas extremas; 1994 y 1995 han formado parte de uno de los ciclos secos más importantes del siglo, contrariamente, 1996 y 1997 han sido calificados como muy húmedos.

METODOLOGIA

Para realizar el trabajo se han debido desarrollar cuatro etapas fundamentales. La primera de ellas se refiere a la estimación de la ET a través de un modelo convencional basado en datos de carácter meteorológico, en tanto, la segunda se relaciona con la generación de la información satelital a partir de las imágenes NOAA-AVHRR. La tercera fase se refiere a la búsqueda de relaciones entre los dos grupos de información, relaciones sobre las cuales se fundamentan los modelos finalmente elaborados para la estimación de la ET_o.

Obtención de la ET local

En este estudio consideramos que la ET_o indica la máxima ET que corresponde a un cultivo imaginario (en este caso gramíneas) bajo las condiciones meteorológicas prevalecientes en el momento en que se realiza la estimación; se asume que este cultivo cubre toda el área estudiada y no sufre carencia de agua (Sánchez, 1992). Su estimación se realiza con el método de Penman-Monteith que corresponde a una modificación de la formulación original de Penman realizada por J. L. Monteith en 1965. Perteneció al grupo de modelos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y la transferencia turbulenta de vapor de agua y a pesar de su complejidad es uno de los que ofrece resultados más precisos y permite estimaciones en lapsos pequeños como la que aquí se pretende (Jensen *et al.*, 1990; Villar y Elías, 1996). El modelo calcula el FCL, es decir, la cantidad de energía utilizada en realizar el proceso de ET, por tanto está expresado en unidades de energía, en este caso W/m^2 puesto que la ET_o se calcula a las 14:30 hrs. coincidiendo con la hora de paso del satélite por el lugar. Para hacer más comprensible el resultado, éste se ha expresado en unidades de agua "evapotranspirada" dividiendo el FCL por el calor latente de vaporización, es decir, la cantidad de energía necesaria para la ET de un determinado volumen de agua. Otra transformación realizada simultáneamente es la extrapolación del valor instantáneo a diario (mm/día), para lo cual hemos aplicado el método propuesto por Jackson *et al.* (1983) que facilita buenos resultados si se aplica en días despejados (Delegido *et al.*, 1991; Zhang y Lemeur, 1995; Kustas y Norman, 1996; Yang, X. *et al.*, 1997).

Los datos meteorológicos que hemos utilizado para este trabajo fueron proporcionados por 30 estaciones automáticas situadas en distintas zonas

de la región. Procuramos que fueran representativas de los tipos climáticos definidos en la región.

Para obtener una imagen continua de la ET_o en toda Andalucía se realizaron interpolaciones espaciales mediante el método de *kriging*.

Análisis de las imágenes

Por su parte, las imágenes utilizadas en este estudio corresponden a las proporcionadas por el sensor AVHRR embarcados en satélites de la serie NOAA.

Dada su resolución espacial, espectral y temporal estas imágenes han sido profusamente utilizadas en estudios a escalas globales y regionales y proporcionan información sobre diversos aspectos de la superficie que en estudios previos se han asociado al fenómeno que aquí nos interesa. En función de su calidad geométrica, radiométrica y según la cobertura nubosa que presentaran, se seleccionaron un total de 141 imágenes para los cuatro años estudiados; a partir de éstas fueron generadas las siguientes variables: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y las composiciones de máximo valor (MVC), el verdor relativo (VERDOR), el decremento del NDVI (DEC), la temperatura de superficie (TS), el cociente entre el NDVI y la TS (NDVI/TS), la diferencia entre temperatura de superficie y del aire (TS-TA) y el índice *Water Deficit Index* (WDI). La información satelital generada, al igual que los datos de ET_o obtenidos previamente fueron analizados en función de valores diarios como también de valores promedio para períodos de cuatro a ocho días; con esto se quería observar si existe diferencia en los resultados al alterar la periodicidad de los datos.

Finalmente de los 141 días y 26 períodos definidos se seleccionaron siete días y períodos para realizar algunos de los análisis siguientes.

Análisis de correlación

Una vez obtenida la información meteorológica y satelital básica, se procedió a realizar análisis de correlación sobre esta información con el fin de determinar las variables que mejor se asociaban con la ET_o, analizar su significado temático y valorar su fuerza. Se realizó un análisis desde el punto de vista espacial que intentaba determinar si la localización de las estaciones meteorológicas tiene algún efecto sobre las relaciones que se producen entre la ET_o y la información satelital, el cual se realizó para los 14 casos seleccionados. A través de un análisis de correlación temporal se quería observar si la evolución temporal de la ET_o se asociaba con los cambios experimentados en las variables de satélite; en este caso, el análisis se realizó con las observaciones de cada año por separado.

Una vez comprobada la asociación existente entre los dos tipos de datos se comenzó la fase de búsqueda de modelos que permitieran estimar la ET_0 partir de las imágenes de satélite en cualquier momento dentro del período considerado (marzo a septiembre de los años 1994 a 1997). Estos modelos correspondieron a ecuaciones de regresión múltiple considerando toda la variación espacial y temporal de los datos de las 30 estaciones y los 141 días de observaciones. Con estas ecuaciones se realizaron mapas de ET_0 para las 14 fechas seleccionadas los cuales fueron contrastados con los obtenidos con la interpolación espacial con el método de interpolación por *kriging*.

RESULTADOS

Los primeros resultados obtenidos en este estudio se relacionan con la dinámica temporal, tanto estacional como interanual del fenómeno y el distinto comportamiento que experimenta en las estaciones meteorológicas según su localización. En cuanto al ritmo estacional, la ET_0 alcanza los valores más bajos del período en marzo, para aumentar progresivamente hacia julio donde se obtienen los mayores valores; a partir de este mes disminuye hasta septiembre, aunque no se registran valores tan bajos como los de marzo, pero similares a los de abril. Este ritmo estacional se aprecia en todas las estaciones y en los cuatro años de observaciones. En cuanto a las diferencias entre un año y otro, de modo general se puede decir que la ET_0 ha sido más intensa en los años 1994 y 1995 y más baja en los dos últimos, lo que responde a las particularidades climáticas que tan brevemente se señalaron antes.

De acuerdo al aspecto espacial, y obedeciendo al carácter macroclimático de las estaciones, advertimos que la ET_0 alcanzaba mayor intensidad y oscilación a lo largo del año en las estaciones de interior que en las costeras (19 y 11 respectivamente según la clasificación climática realizada en la región por ANAYA, 1995). Estas diferencias se mantuvieron a lo largo de los meses de primavera y verano de los cuatro años estudiados lo cual demuestra la consistencia de la situación. Por otra parte, se detectó que las estaciones de interior manifestaban un comportamiento relativamente homogéneo entre sí en todo momento, a diferencia de lo que ocurría en las costeras, más variables entre ellas; no obstante, se puede decir que a medida que aumentaban los valores de ET_0 el grado de variabilidad entre estaciones tendía a acentuarse.

Con los datos de los días y períodos seleccionados se construyeron mapas de ET_0 para Andalucía mediante su interpolación espacial con el método de *kriging*. Estas interpolaciones permitieron distinguir zonas relativamente definidas en función de la intensidad de la ET_0 lo que confirmó las ideas generales antes señaladas: la Depresión del Guadalquivir cuenta con los valores más altos de ET_0 ,

los más bajos se dan en una franja prácticamente continua de este a oeste al sur de la región, coincidiendo en buena parte con la Cordillera Penibética y la zona costera mediterránea, mientras los valores intermedios se dan en el extremo occidental de Andalucía. En la Figura 1 se muestran los mapas realizados para los períodos seleccionados.

Las variables generadas a partir de las imágenes muestran un comportamiento estacional muy marcado y persistente en los cuatro años de observaciones; no obstante, se aprecian zonas que experimentan notables cambios a lo largo de los meses estudiados y otras en que las variaciones son más reducidas. La Depresión del Guadalquivir, con sus áreas de secano y regadío, en algunas variables a veces muy contrastadas entre sí, exhibe los cambios más drásticos; mientras, las zonas forestales del sector oriental y sur de la región presentan una relativa mayor inercia.

En cuanto a los análisis de correlación entre ET_0 y las variables satelitales se comprobaron ciertas relaciones que se preveían; no obstante, se puede decir que las que se detectaron desde el punto de vista temporal son más intensas y persistentes que las espaciales. Efectivamente, los cambios estacionales de la ET_0 demostraron estar asociados en forma significativa con los experimentados por la TS y el cociente NDVI/TS; situación que se mantiene entre los años 1995 a 1997 en que entre el 85% y 100% de las estaciones los coeficientes fueron significativos demostrando la consistencia de la asociación (en 1994 sólo fueron relevantes en el 50% de los observatorios). La TS-TA y NDVI siguieron en importancia a las variables señaladas. No se apreciaron diferencias de acuerdo al tipo climático ni según la cubierta vegetal característica de la zona.

Como se ha señalado, las correlaciones espaciales significativas fueron menos intensas y también menos frecuentes que las temporales. En términos generales, se apreció una asociación importante entre la ET_0 y las variables TS-TA y el WDI, tanto en las observaciones diarias como por períodos en el conjunto de las estaciones; pero si éstas se separaban en estaciones de costa e interior las relaciones cambiaban de dirección e intensidad. En las costeras se mantenía la asociación señalada, a diferencia de lo que ocurría en las de interior, en que adquiría más importancia las variables NDVI/TS y TS.

Una vez comprobada las relaciones entre la ET_0 y algunas variables satelitales en forma individual, se procedió a buscar modelos, a través de análisis de regresión múltiple, que permitieran aprovechar esta situación en la estimación de la ET_0 a partir de la imagen y sus variables. Estos análisis se aplicaron sobre todos los datos generados para los días en forma individual como también para los períodos; de esta manera se utilizaron 3.395 series de datos diarios y 762 series por períodos.

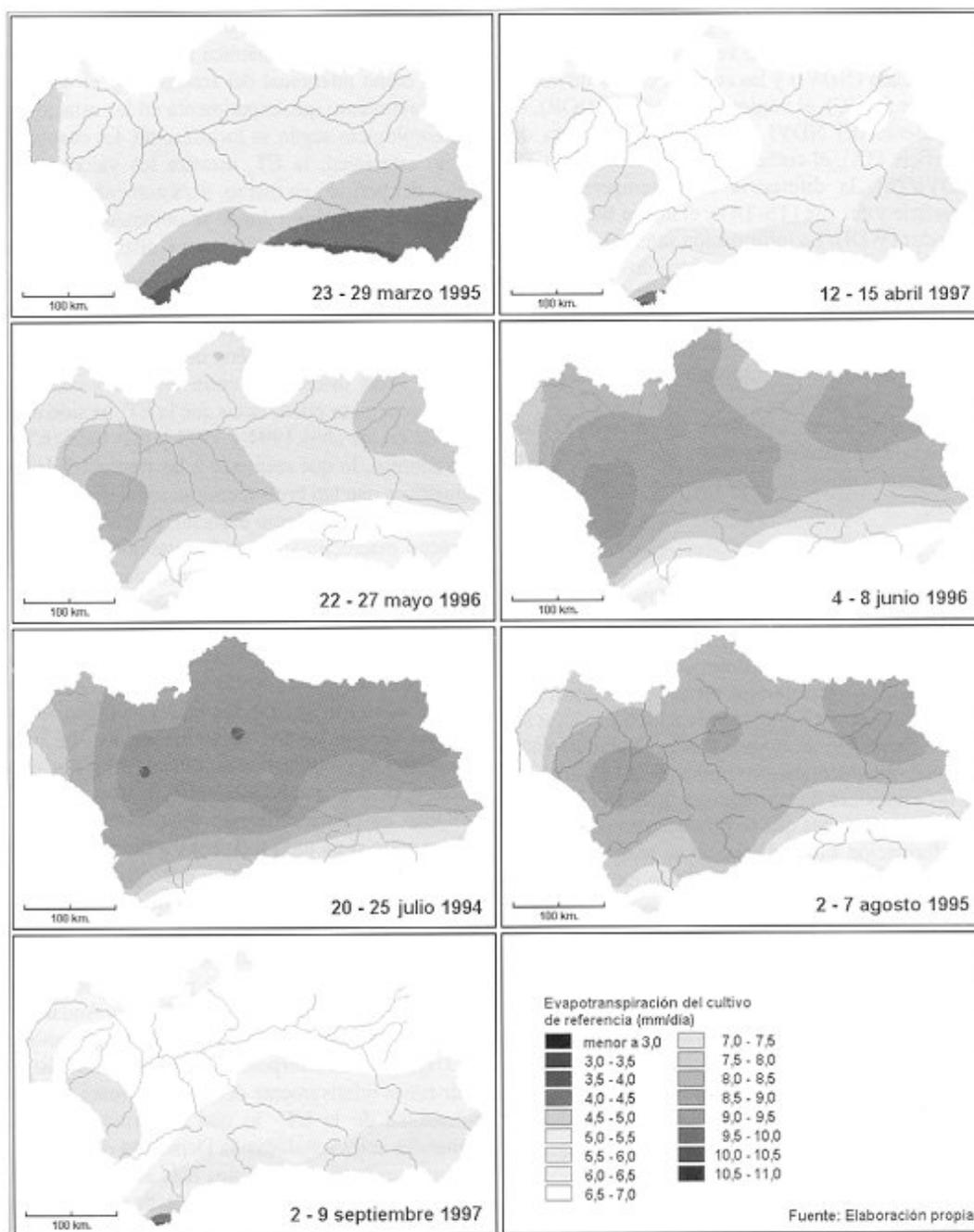


Figura 1. Interpolación espacial de la ET_0 (mm/día) mediante el método de *kriging* en periodos seleccionados.

Las distintas pruebas realizadas evidenciaron buenas relaciones entre la ET_0 y variables satelitales consideradas conjuntamente, especialmente la TS, la TS-TA y el VERDOR, aunque la mayor parte de la variación era explicada por las dos primeras. Los resultados mejoraron notablemente al introducir una variable asociada al comportamiento estacional del fenómeno, que se generó como una función del día juliano, dado que de esta manera se valoraba mejor la función sinusoidal de la ET_0 a lo largo del año y se mejoraba la predicción. Se realizaron tres análisis distintos en búsqueda de los mejores modelos para cada uno de los dos grupos de datos, por días y por periodos:

1. Análisis global. Se realizó un análisis de regresión múltiple sobre la totalidad de los datos de las 30 estaciones y todas las observaciones, obteniendo entonces una ecuación para días y una para periodos.
2. Análisis por ambiente macroclimático. Para probar el efecto de la diferenciación en el comportamiento de las estaciones según sus grandes rasgos climáticos, se separaron las observaciones de las estaciones de interior de las de estaciones de costa para obtener dos ecuaciones por cada tipo de datos.
3. Análisis por periodos estacionales. Dado que se ha comprobado sobre la ET_0 el fuerte efecto de la estacionalidad, se separaron los datos

por meses en distintas agrupaciones hasta encontrar las ecuaciones que mostraban los mejores resultados en la estimación; éstas fueron una ecuación para la primavera que incluye los meses de marzo, abril y mayo y una para los meses comprendidos entre junio y septiembre.

En la Tabla 1 se muestran los resultados para las distintas pruebas realizadas de acuerdo al parámetro r^2 corregido y error típico de la estimación.

Análisis	r^2 corregido				Error típico de la estimación (mm/día)			
	Observaciones por días		Observaciones por periodos		Observaciones por días		Observaciones por periodos	
Análisis global	Total	0,79	Total	0,77	Total	0,64	Total	0,66
Ambiente macroclimático	Costa:	0,73	Costa:	0,71	Costa:	0,72	Costa:	0,73
	Interior:	0,84	Interior:	0,86	Interior:	0,52	Interior:	0,46
Período estacional	Marzo-Mayo	0,94	Marzo-Mayo	0,92	Marzo-Mayo	0,36	Marzo-Mayo	0,39
	Junio-Sept.	0,87	Junio-Sept.	0,87	Junio-Sept.	0,46	Junio-Sept.	0,45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Parámetros r^2 corregido y error típico de la estimación obtenidos en las distintas pruebas

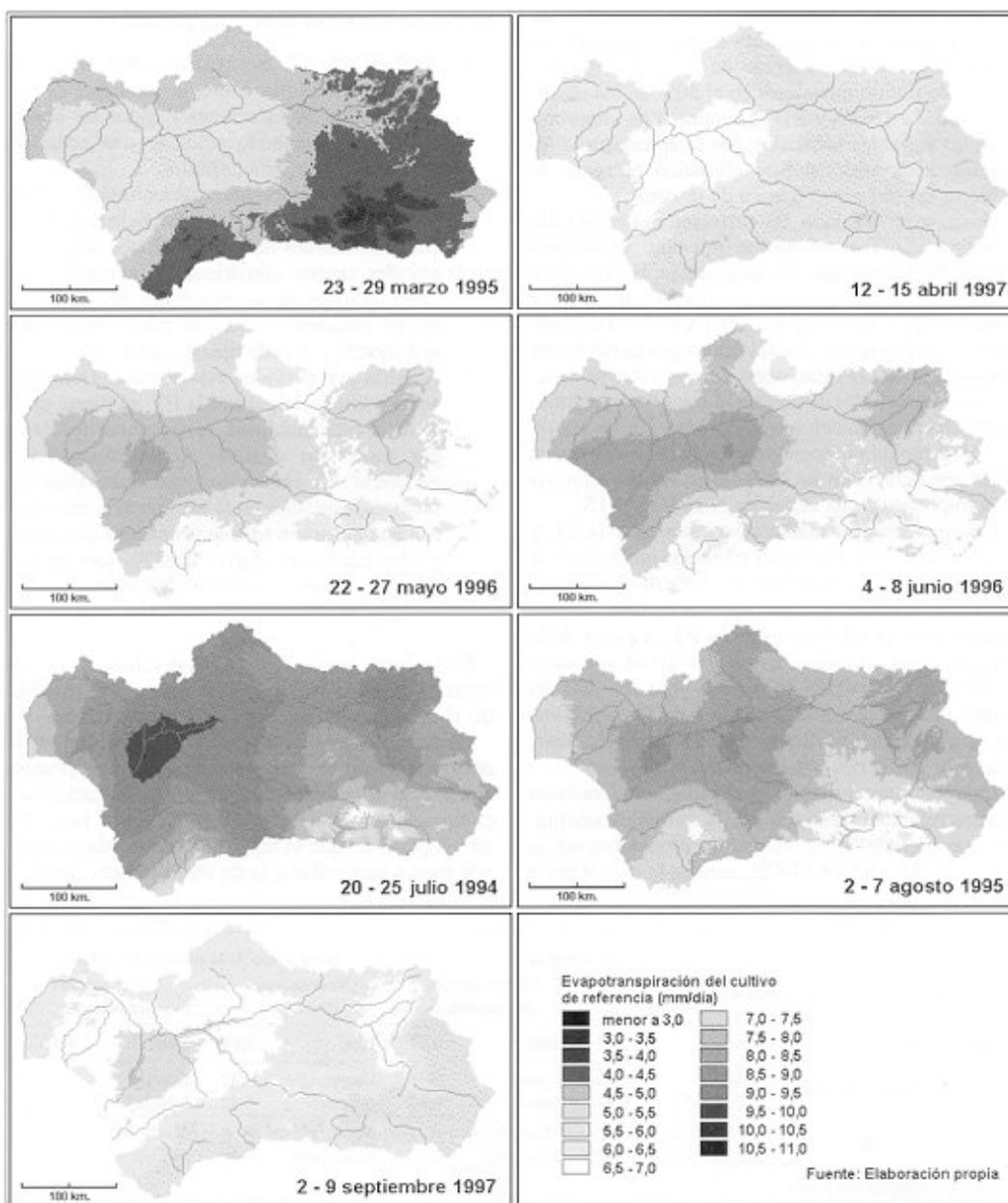


Figura 2. Estimación de la ET_0 (mm/día) mediante ecuaciones de regresión múltiple para los mismos periodos de la Figura 1.

Período estacional:	Variación en observaciones por días			Variación en observaciones por períodos		
	Menor a 5%	Menor a 10%	Mayor a 15%	Menor a 5%	Menor a 10%	Mayor a 15%
Marzo-Abril-Mayo	73,2%	93,1%	2,3%	71,1%	92,8%	1,7%
Junio a Septiembre	62,2%	88,7%	3,6%	64,6%	88,9%	4,2%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Porcentajes de datos estimados en estaciones meteorológicas según rangos de variación con respecto a valor calculado con método de Penman-Monteith

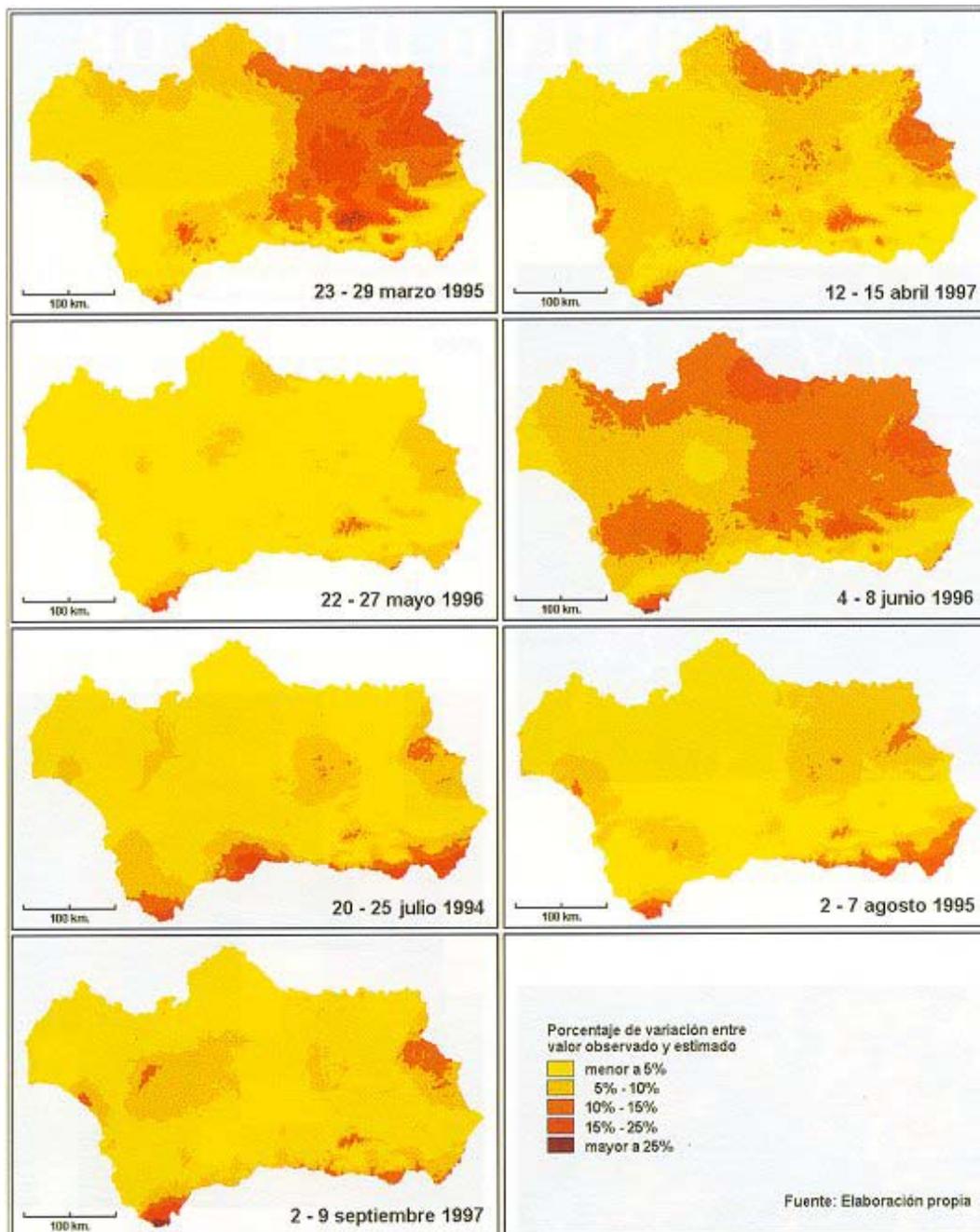


Figura 3. Porcentaje de variación entre los mapas de ET₀ obtenidos mediante interpolación espacial con el método de *kriging* (valores observados) y los obtenidos por regresión múltiple (valores estimados) en períodos seleccionados.

De acuerdo a estos datos los mejores ajustes se obtuvieron con los modelos de la última prueba, con la cual se verifica la existencia de un factor asociado a la estacionalidad de la ET₀, a lo largo del año, a pesar de que la magnitud alcanzada en algunos meses es similar a la de otros pertenecientes a grupos distintos. Aplicando estas ecuaciones

sobre las correspondientes variables derivadas de las imágenes se estimó la ET₀ para todas las series de datos disponibles. Como se muestra en la Tabla 2, los resultados obtenidos tienen una buena precisión, ya que alrededor del 90% de los datos en las estaciones meteorológicas son estimados con una variación inferior al 10% con respecto al dato cal-

culado con el método de Penman-Monteith, lo que se considera bastante aceptable en estudios de este tipo; por otro lado, menos del 5% de los datos tienen 4 variaciones mayores al 15%.

Con estas ecuaciones se construyeron mapas para Andalucía en las 14 fechas seleccionadas, de los cuales, los respectivos a los períodos se muestran en la Figura 2. El conjunto de mapas reproduce una variabilidad espacial y temporal muy marcada y similar que la obtenida con la interpolación espacial con el método de *kriging* en algunos de ellos. Para valorar la calidad de esta estimación se construyeron mapas de variación porcentual entre los mapas conseguidos con la interpolación espacial con el método de *kriging* y los logrados por regresión, tomando como referencia los primeros. En la Figura 3 se muestra como ejemplo los mapas de variación establecidos para los períodos.

En los mapas de variación para los 14 casos escogidos destaca la gran proporción de superficie en que las diferencias entre la ET estimada a partir de las imágenes y la obtenida por interpolación espacial son menores al 10%, en 11 casos (cerca del 90% de la región) alcanza valores inferiores al 10%; las excepciones se presentan el día 29 de septiembre de 1995 y los períodos de marzo de 1995 y junio de 1996 en que esta superficie corresponde al 50%, 68,4% y 45,8% respectivamente tal como se aprecia, en el caso de los dos últimos mencionados, en la Figura 3. Las mayores diferencias se producen en el sector oriental de la región y en algunas porciones del extremo suroriental, coincidiendo con las zonas más altas de Andalucía. En este caso, la disparidad entre las dos fuentes debe a la ausencia de estaciones en Sierra Nevada. Esto parece más debido a las limitaciones que tiene el método de *kriging* que a una deficiente estimación con las imágenes de satélite; aquel método considera isotrópico el espacio existente entre los puntos muestrales, situación que no ocurre con la información contenida en la imagen. El número y distribución de estos puntos, las estaciones meteorológicas, inciden en la calidad de la interpolación con *kriging* y también en la calibración de los modelos. Estas situaciones se reflejan en último término en las diferencias comentadas para ciertas zonas, coincidentes en los casos en que son mayores con áreas no cubiertas con los observatorios disponibles. En términos globales se puede decir que las estimaciones más certeras se logran con las ecuaciones de primavera y para los períodos y en cuanto a las estimaciones puntuales para las estaciones de interior.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos la conclusión general que se desprende de este trabajo es que las imágenes NOAA-AVHRR son útiles en la determinación de la ET_o a escala regional. Las relaciones entre las diferencias espaciales y el

comportamiento temporal del fenómeno analizado y el de algunas de las variables superficiales obtenidas por teledetección, establecidas en el área y período de estudio considerado, son lo suficientemente consistentes como para dar una imagen de cierta precisión a esta escala. Esta precisión fue valorada satisfactoriamente en las estaciones meteorológicas, únicos puntos que pueden ser contrastados con seguridad, y también en forma areal comparando los mapas obtenidos. No obstante, la exactitud real de la información generada en cuanto a la ET_o en las diferentes etapas, depende de las bondades del método convencional seleccionado y la certeza de la información derivada de las imágenes satelitales que se relacionan y generan los modelos obtenidos.

BIBLIOGRAFIA

- ANAYA Editorial 1996. Atlas de Andalucía y de España. Madrid, Anaya.
- ARTIGAO, M.M.; HURTADO, E.; CASELLES, V.; CASTERAD, A. y MARTÍNEZ, A. 1997. Estimación de la evapotranspiración en el polígono de regadío de Flumen (Huesca). En Teledetección. Usos y Aplicaciones, Eds.J.L. Casanova y J. Sanz, Serie Ciencias, ~ 14, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid, Valladolid, pp. 3-7.
- CASELLES M., V; DELEGIDO G., J.V. y HURTADO S., E. 1993. Teledetección: Aplicación a la determinación de la evapotranspiración. En Agronomía del Riego, coordinadores Martín de Santa Olalla M., F.J. y De Juan V., J.A. Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- CASELLES, V.; ARTIGAO, M.M.; HURTADO, E.; COLL, C. y BRASA, A. 1998. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA-AVHRR images: application to the Barrax area, Albacete, Spain. Remote Sensing of Environment. 63: 1-10.
- CHOUHDURY, B.J. 1994. Synergism of multispectral satellite observations for estimating regional land surface evaporation. Remote Sensing of Environment. 49: 264-274.
- CHOUHDURY, B.J. y DE BRUIN, H.A.R. 1995. First order approach for estimating unstressed transpiration from meteorological satellite data. Advances in Space Research. 16(10):167-176.
- DELEGIDO, J.; CASELLES, V. y HURTADO, E. 1991. Determinación a escala regional de la evapotranspiración. En La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Recursos Renovables: Agricultura, coordinadores de la edición S. Gandía y J. Meliá. Universidad Politécnica, Valencia, pp. 345-370.
- DELEGIDO, J. y CASELLES, V. 1993. Evapotranspiración. En La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Climatología y Desertificación (coordinadores de la edición S. Gandía y J. Meliá), Universidad de Valencia, pp. 205-213.
- DESBOIS, N.; PEREIRA, J.M.; BEAUDOIN, A.; CHUVIECO, E. y VIDAL, A. 1997. Short term fire risk mapping using remote sensing. En A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires, Ed. E. Chuvieco, Alcalá de Henares, pp. 29-60.

- JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J. y IDSO, S.B. 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*. 13: 651-656.
- JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. y PINTER, P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*. 17: 1133-1138.
- JACKSON, R.D.; HATFIELD, J.L.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. y PINTER, P.J. 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural Water Management*. 7: 351-362.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D. y ALLEN, R.G., (Eds.) 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, NO°70. American Society of Civil Engineers. New York.
- LÓPEZ-BAEZA, E. 1991. Climatología desde satélites. En *La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales*. Recursos Renovables: Agricultura (coordinadores de la edición S. Gandía y J. Meliá), pp. 325-344. Universitat de Valencia, Departament de Termodinàmica, Valencia.
- KALLURI, S.N.V.; TOWNSHEND, J.R.G. y DORAISWAMY, P. 1998. A simple single layer model to estimate transpiration from vegetation using multi-spectral and meteorological data. *International Journal of Remote Sensing*. 19(6): 1037-1053.
- KUSTAS, W.P. y NORMAN, J.M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*. 41: 495-517.
- MORAN, M.S.; CLARKE, T.R.; INOUE, Y. y VIDAL, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 49: 246-263.
- NEMANI, R.R. y RUNNING, S.W. 1989. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and Thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*. 28: 276-284.
- SÁNCHEZ M., M.I. 1998. Estimación de evapotranspiración máxima a través de datos meteorológicos e imágenes de satélite. Trabajo de investigación. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares.
- SÁNCHEZ M., M.I. 1999. Estimación de evapotranspiración a través de datos meteorológicos e imágenes de satélite. Tesis doctoral. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares.
- SÁNCHEZ T., M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración, Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones. Logroño.
- SÁNCHEZ, M. y CHUVIECO, E. 2000. Interpolación espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET o' a partir de imágenes de satélite, *Estudios Geográficos* (en revisión).
- SEGUIN, B. 1993. NOANAVHRR data for crop monitoring at a regional level: possibilities and limits in the European context. *EARSel Advances in Remote Sensing*. 2(2): 87-93.
- SEGUIN, B.; ASSAD, E.; FRETEAID, J.P.; IMBERNON, J.; KERR, Y. y LAGOUARDE, J.P. 1989. Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. *International Journal of Remote Sensing*. 10(6): 1101-1117.
- SEGUIN, B.; LAGOUARDE, J.P. y SAVANE, M. 1991. The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*. 35: 141-148.
- SEGUIN, B.; COURAULT, D. y GUÉRIF, M. 1994. SurCace temperature and evapotranspiration application of local scale methods to regional scales using satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 49: 287-295.
- VILLAR, J.M. y ELÍAS, F. 1996. Evapotranspiración. En *Agrometeorología*, editado por Elías C., F. y Castellvi S., F. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- YANG, W.; YANG, L. y MERCHANT, J.W. 1997. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*. 18: 2161-2180.
- YANG, X.; ZHOU, Q. y MELVILLE, M. 1997. Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept. *International Journal of Remote Sensing*. 18: 453-459.
- ZHANG, L. y LEMEURE, R. 1995. Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 74: 139-154.