

INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA, ET_0 , A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE

POR

MARCELA SÁNCHEZ MARTÍNEZ¹
Y EMILIO CHUVIECO SALINERO²

Introducción

Como es bien sabido, la evapotranspiración (ET) o flujo de calor latente (FCL) es un elemento clave del balance de radiación terrestre. La ET permite la transferencia de agua en forma de vapor desde la superficie terrestre a la atmósfera y asegura que la energía recibida por aquella sea devuelta a ésta y se mantenga un balance energético superficial adecuado. Además, la ET resulta clave en el análisis del ciclo hidrológico, de los patrones climáticos, y en la estimación de la productividad agrícola.

A pesar de esta importancia, resulta complejo cuantificar directamente la ET , debido a la diversidad de factores de los que depende: meteorológicos, fisiológicos, edáficos y topográficos, que explican una gran variedad temporal y espacial del fenómeno. Los métodos más utilizados, estiman la ET a partir de ciertas variables meteorológicas, normalmente con un enfoque global (escaso detalle espacial), o bien a escala local bajo una óptica eminentemente agronómica o agrometeorológica de gran detalle y precisión. En consecuencia, se advierte una falta generalizada de estudios destinados a la determinación del FCL o ET a escala regional, ya que es complejo disponer de medidas directas en un número suficiente de puntos para analizar la variación espacial de este fenómeno.

¹ Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

² Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.

La teledetección puede contribuir en forma notable con los métodos usados tradicionalmente en la estimación espacial de la *ET*. En este trabajo presentamos la aplicación de las imágenes que facilita el sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a bordo de los satélites NOAA, para determinar la *ET* a escala regional, empleando como ejemplo el territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

Las imágenes de satélite en la determinación de la evapotranspiración

Teniendo en cuenta la baja densidad de información que facilitan las redes de estaciones meteorológicas, el análisis espacial de la *ET* requiere aplicar distintos criterios de interpolación/extrapolación, que permitan estimar su valor en aquellas zonas sobre las que no existe un registro real de las variables de interés. El empleo de imágenes de satélite puede paliar este problema, ya que implican una medición sistemática de la superficie terrestre, a un intervalo equivalente a la resolución espacial del sensor. En el caso de las imágenes AVHRR, la resolución aproximada es de 1 km², lo que implica que si pudiéramos establecer una sólida relación entre la *ET* y las medidas del sensor, tendríamos disponible una imagen espacial bastante detallada del fenómeno.

El empleo de la teledetección para estimar una serie de parámetros biofísicos se ha abordado a través del empleo de modelos deductivos y empíricos (Choudhury, 1994; Chuvieco, 1996). En el caso de la *ET*, se ha demostrado la conveniencia de esta técnica para extender modelos locales a escalas regionales (Engman y Gurney, 1991; Caselles *et al.*, 1993 y 1998), al aprovechar la observación sistemática, completa y espacialmente exhaustiva de toda la región estudiada.

La mayor parte de los modelos que utilizan información obtenida por teledetección son complejos y utilizan, en mayor o menor proporción, datos de las redes meteorológicas convencionales o medidas directas de *ET* obtenidas con los métodos clásicos directos. Esta información de apoyo permite convertir en datos absolutos las observaciones obtenidas por el sensor en términos relativos, así como calibrar nuevos modelos. Según esto, todavía no se puede afirmar que la teledetección constituya un medio alternativo a los métodos clásicos, sino una vía complementaria a los mismos, aportando como gran ventaja su capacidad para observar variaciones espaciales de la superficie.

Aunque los intentos que tratan de clasificar los modelos, procedimientos o aproximaciones que están orientados a la estimación de la *ET* y que utilizan información obtenida por teledetección, al igual que ocurre con los modelos clásicos, son diversos (Delegido *et al.*, 1991; Caselles *et al.*, 1993; Kustas y Norman, 1996), se pueden distinguir aquí dos grupos; aquellos que han sido elaborados con este fin (directos) y los que han sido creados para el estudio de otros fenómenos o procesos superficiales, pero son útiles en el campo que aquí interesa dada su relación con el problema (indirectos). Pueden ser considerados directos el modelo general que se basa en la resolución de la ecuación del balance de energía³ y los diversos modelos, muy precisos, que se siguen desarrollándose a partir de ella. Todos éstos se presentan como métodos muy atractivos para determinar la *ET*, ya sea en forma directa o como residual, en la medida en que la teledetección aporta información a la solución de la ecuación, pero requieren para su total y operativa aplicación información sobre la superficie terrestre colectada en estaciones meteorológicas convencionales.

Métodos indirectos se consideran aquellos basados en las relaciones entre *ET* y ciertas características de la vegetación o la temperatura superficial, o bien los que aprovechan la combinación de ambos aspectos. La asociación entre *ET* y ciertas características de la vegetación obtenidas a partir de imágenes de satélite, se basa en la sensibilidad de estas imágenes para medir las condiciones de la vegetación, igualmente afectadas que la *ET* por el régimen de radiación y temperatura, el déficit de presión de vapor y otras condiciones meteorológicas (Yang, W. *et al.*, 1997).

Distintos autores han demostrado una relación entre estimaciones de la *ET* y la información generada a partir de las imágenes, principalmente con los índices espectrales de vegetación (que estiman su vigor y actividad fotosintética) y con la temperatura de superficie (*T_s*) (Wiegand y Richardson, 1990; Cihlar *et al.*, 1991; Mora e Iverson, 1998). La relación negativa observada entre estos índices espectrales y la *T_s* se ha puesto en relación con el enfriamiento provocado por la *ET* cuando las condiciones vegetales son vigorosas (Nemani y Running, 1989; Yang, *et al.*, 1997; Caselles *et al.*, 1998). Algunos autores han sugerido que las relaciones entre

³ $Rn = \lambda ET + H + G + PH$ donde: *Rn* es la radiación neta; λET 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, 1992).

esas dos variables facilitan una estimación del estrés hídrico de las plantas, de especial claridad cuando la T_s se pone en relación con la temperatura del aire (Jackson *et al.*, 1981; Moran *et al.*, 1994).

Objetivos

El presente trabajo pretende ensayar la aplicación de las imágenes NOAA-AVHRR para interpolar espacialmente la ET calculada por vías tradicionales. En este estudio la estimación con los datos meteorológicos se ha realizado utilizando el método de Penman-Monteith en 30 estaciones meteorológicas distribuidas en la Comunidad Autónoma de Andalucía. El período de análisis está comprendido entre marzo y septiembre de los años 1994, 1995, 1996 y 1997. Área y período de estudio consideran la gran variedad geográfica y temporal del fenómeno, estimamos que el ensayo puede resultar esclarecedor de las relaciones entre ET e información generada a partir de estas imágenes de satélite.

Metodología

El trabajo se estructura en torno a cuatro etapas fundamentales. Respecto de las dos primeras fases, se comienza con la estimación de la ET con un método convencional y con la generación de la información a partir de las imágenes NOAA-AVHRR respectivamente. Se realiza un análisis de correlación espacial y temporal entre ambos tipos de información con la finalidad de verificar las relaciones existentes entre ellas y fundamentar la cuarta etapa, relativa a la estimación o interpolación espacial de la ET a partir de los datos de satélite.

La estimación de la ET con los datos meteorológicos se realizó a partir de la información proporcionada por 30 estaciones meteorológicas representativas de los siete tipos climáticos definidos en la región (ANAYA, 1996). La estimación se llevó a cabo en dos fases; en primer lugar, se estimó la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) con el método Penman-Monteith y posteriormente la evapotranspiración máxima (ET_m). Tomando un concepto ampliamente difundido, se definió la ET_o como la 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, asumiendo que ese cultivo cubre toda el área estudiada y no sufre de falta de agua (Sánchez, 1992). Por su parte, la ET_m hace referencia a la cantidad de agua evapotranspirada por un tipo vegetal determinado. La relación entre ET_o y ET_m se concreta en la aplicación de unos coeficientes de cultivo, K_c , que son específicos para cada tipo de vegetal y etapa fenológica en la que se encuentran.

El método de Penman-Monteith corresponde a una modificación realizada por J. L. Monteith en 1965 de la ecuación de combinación del balance de energía y la transferencia turbulenta del vapor de agua propuesta originalmente por Penman en 1948. Este método se considera uno de los más precisos en la determinación de la ET_o (Jensen *et al.*, 1990; Villar y Elías, 1996). Además, este método permite estimaciones instantáneas, por lo que resulta muy apropiado para relacionarlo con la adquisición realizada por los satélites NOAA. En nuestro caso, el cálculo se hizo para las 14:30 h., hora aproximada de paso del satélite por la región.

Para este trabajo, hemos empleado la formulación propuesta por Allen *et al.* (1989):

$$\lambda ET = \frac{\Delta \times (R_n - G) + \rho \times C_p \times (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \times (1 + r_c / r_a)}$$

donde:

- λET : flujo de calor latente, expresado en MJ/m²/t, siendo t el período para el cual se realiza la estimación
- Δ : pendiente de la curva de saturación de vapor/temperatura, expresada en kPa/°C
- R_n : radiación neta, expresada en MJ/m²/t
- G : flujo de calor del suelo, expresado en MJ/m²/t
- ρ : densidad del aire, expresada en kg/m³
- C_p : calor específico del aire, expresado en MJ/kg/°C
- $(e_s - e_a)$: déficit de presión de vapor, expresado en kPa
- γ : constante psicrométrica, expresada en kPa/°C
- R_a : resistencia aerodinámica a la difusión del vapor y calor, expresada en t/m
- R_c : resistencia de la cubierta vegetal, expresada en t/m

Los parámetros necesarios para calcular esta fórmula se extrajeron de datos meteorológicos procedentes de estaciones automáticas. Los más complicados de obtener son la radiación neta, que no es habitual se registre en estas estaciones, y la resistencia de la cubierta vegetal. En el primer caso, aplicamos una simplificación del cálculo, basada en la radiación extraterrestre, que resulta apropiada siempre que no exista una cubierta apreciable de nubes. En cuanto a los valores de la resistencia de la cubierta vegetal, adoptamos los correspondientes a la gramínea como cultivo de referencia, considerando valores distintos a lo largo del período estudiado.

La ecuación de Penman-Monteith expresa la ET en flujo de calor latente, por tanto en unidades de energía, (W/m^2). Este flujo de calor latente se transformó en volumen de agua «evapotranspirada» dividiendo su valor por el calor latente de vaporización, es decir, la cantidad de calor necesaria para «evapotranspirar» una unidad determinada de masa de agua. Finalmente, se calculó la ET diaria utilizando el modelo propuesto por Jackson *et al.* (1983), que considera que la evolución diaria de la ET sigue una función sinusoidal, equivalente a la de la radiación diaria. De acuerdo a ello, puede obtenerse una estimación diaria de la ET a partir de un valor instantáneo, estimando la fracción de irradiancia solar que se produce en ese momento concreto. Esa relación entre irradiancia instantánea y diaria se calculó a partir de la función sinusoidal y de la latitud, fecha y hora del día. Los mejores resultados con este modelo se han obtenido en días con cielos despejados (Zhang y Lemeur, 1995)⁴, por lo que nosotros restringimos la selección de los días analizados a aquéllos con una cobertura muy baja o nula de nubes. Los datos de ET fueron tratados en función de sus valores diarios como también en valores promedios de 4 a 8 días.

Finalmente, a partir de los datos puntuales de ET_0 se generó una imagen continua del fenómeno para toda la región, empleando el método de interpolación geoestadística denominado *kriging*, que ya se ha aplicado en este ámbito (Martínez-Cob, 1996). Este método modifica la función de interpolación considerando la varianza espacial de la variable (en nuestro caso la ET_0). Se emplearon de 22 a 25 estaciones, según los períodos, dejando siempre 5 estaciones para verificar los errores.

⁴ Otras referencias sobre su aplicación son proporcionadas por Delegido *et al.*, 1991; Kustas y Norman, 1996 y Yang, *et al.*, 1997.

Para establecer la ET_m se corrigió la ET_o y los mapas obtenidos aplicando los coeficientes de cultivo (K_c) adecuados a la vegetación regional. Los K_c sólo están disponibles para cultivos de regadío y secano, viñedos y frutales, por lo tanto no podían ser evaluadas las cubiertas forestales de la región correspondientes a más del 35 % de su superficie. Los coeficientes adecuados a estos tipos de cubiertas fueron derivados a partir de referencias y comparaciones del parámetro resistencia de las distintas cubiertas vegetales con el correspondiente a la gramínea, adoptado aquí como referencia (Sánchez, 1998 y 1999). Finalmente se contó con coeficientes adaptados a todos los tipos vegetales de la región y a todos los períodos estudiados. Con éstos se realizaron mapas que fueron relacionados con los de ET_o logrados por interpolación con lo que se obtuvieron los mapas de ET_m .

De todas las imágenes de satélite disponibles para los cuatro años fueron seleccionadas 141 que presentaban una calidad geométrica y radiométrica adecuada, además de contar con muy baja o nula cobertura nubosa en Andalucía. En cuanto a las variables generadas a partir de estas imágenes se seleccionaron aquellas que, de acuerdo con referencias previas, teóricamente estaban más relacionadas con el flujo de calor latente o ET . Se seleccionaron las relativas a las características espectrales de la vegetación, a partir de las cuales se obtuvo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la temperatura de superficie (Ts). Teniendo en cuenta que el valor diario de estos índices puede estar influido por las condiciones de dispersión atmosférica y de los ángulos de observación (que pueden ser bastante amplios en el caso del sensor AVHRR), resulta una práctica habitual obtener también compuestos multitemporales de varias imágenes diarias. En nuestro caso utilizamos tanto las imágenes diarias como estos compuestos, con el objeto de evaluar el efecto de promedio que pueden introducir. El procedimiento más habitual para realizar estos compuestos es el denominado máximo valor compuesto MVC (*Maximum Value Composite*), que asume como más idóneo el día que cuente con un valor más alto de NDVI, ya que en principio en una serie corta de imágenes (7-10 días), cuanto más alto sea el NDVI, deberíamos esperar menor dispersión atmosférica y ángulos más verticales de observación.

Para cada día y período, además del NDVI y la Ts, se calcularon el vector relativo (VERDOR) y el cambio temporal del NDVI (DEC), la diferencia entre la temperatura de superficie y la del aire (Ts-Ta), el cocien-

te entre el NDVI y la Ts (NDVI/Ts), y el *Water Stress Index* (WDI), desarrollado por Moran *et al.* (1994). Estos dos últimos índices pretenden integrar la información relativa al vigor vegetal con la temperatura de superficie, que es indicador indirecto de la radiación recibida por la planta y de los mecanismos de evapotranspiración.

La estimación de la ET_o y ET_m a partir de los datos meteorológicos de cada estación se correlacionó con las variables de satélite antes señaladas. Este análisis fue realizado desde el punto de vista espacial, para determinar si las grandes diferencias espaciales influían en las relaciones entre ambos tipos de información, así como temporal, para observar las relaciones entre el comportamiento temporal de la ET y el de las variables de satélite. La correlación se calculó con los días en que se contaba con una imagen adecuada. También generamos valores sintéticos para períodos de 4 a 10 días, lo que permitía reducir ruidos potenciales debidos a la adquisición de las imágenes o de los datos meteorológicos (Seguin *et al.*, 1994; Caselles *et al.*, 1998).

Finalmente, la estimación de los mapas de ET_o a partir de las imágenes se realizó empleando ecuaciones de regresión múltiple específicamente generadas para algunas fechas y períodos seleccionados.

Resultados

El análisis de los valores de ET_o calculados para los años y las estaciones del estudio nos permitió concluir que esta variable mostraba notables contrastes, tanto temporal como espacialmente. Observamos un claro aumento a partir de marzo, cuando se registraban los más bajos valores del período, hasta julio donde alcanzaba la máxima intensidad; a partir de este último comenzaba a descender hasta septiembre, aunque no alcanzó tan bajos valores como los de marzo. Este comportamiento estacional se observó en todos los observatorios y en los cuatro años analizados. Lógicamente, se detectaron diferencias en la magnitud de la ET_o , según la distribución espacial de las estaciones analizadas; su intensidad, así como su oscilación a lo largo del año resultaron mayores en las estaciones de interior y más bajas en las de costa. En cuanto a las diferencias entre un año y otro, 1994 y 1995 registraron los valores más altos, especialmente en las estaciones de interior. En las costeras, se observó un menor contraste en los cuatro años. El comportamiento entre

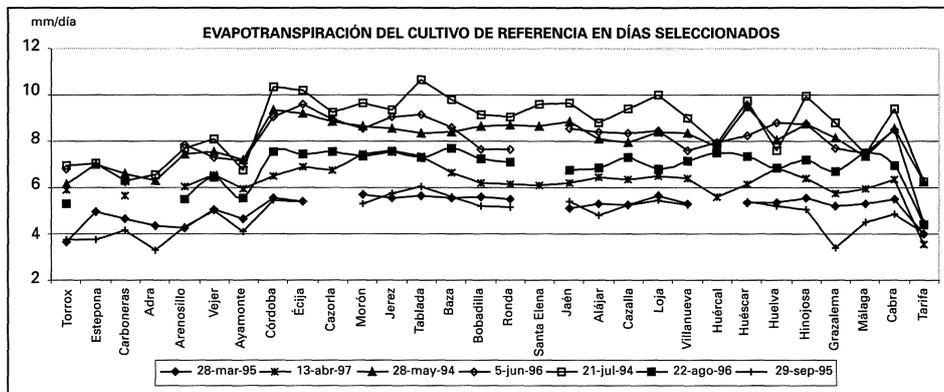


FIG. 1.—La ET_0 (mm/día) de los días seleccionados en las 30 estaciones meteorológicas disponibles

estaciones de interior fue relativamente homogéneo, a diferencia de lo que ocurrió en las costeras, más variables entre sí. Los aspectos señalados se pueden advertir con cierta claridad si observamos por ejemplo el gráfico (figura 1) que muestra la ET_0 en los siete días seleccionados para análisis posteriores. La ET_m por su parte, conserva los grandes rasgos temporales definidos por la ET_0 , aunque en este caso se observó una mayor variabilidad espacial impuesta por los matices que se introducen al incorporar la vegetación y sus diferencias temporales.

Las interpolaciones espaciales de la ET_0 realizadas a partir del método de *kriging* aparecen en la figura 2. En este caso, hemos seleccionado días específicos correspondientes a cada uno de los meses analizados. Aparecen transiciones graduales en la variable, fruto del método seleccionado. Los valores más altos siempre corresponden al interior del valle del Guadalquivir, mientras los más bajos se sitúan en el Estrecho, la costa de Málaga y Granada y el sector más occidental de Huelva. La influencia del relieve no es muy nítida, pues el método de interpolación es muy dependiente de la localización de las puntos muestrales, y no resulta fácil disponer de estaciones meteorológicas en zonas de fuerte relieve.

En cuanto a la interpolación basada en imágenes de satélite los análisis de correlación mostraron una clara significancia para las variables relacionadas con la temperatura de superficie: T_s , la diferencia $T_s - T_a$ y el WDI. Estas correlaciones podían matizarse si se consideraba el ambien-

te climático de los observatorios; así, en los costeros resultaron significativas la Ts-Ta y el WDI, mientras que en las de interior tendía a adquirir mayor importancia el cociente NDVI/Ts. Con respecto a las correlaciones

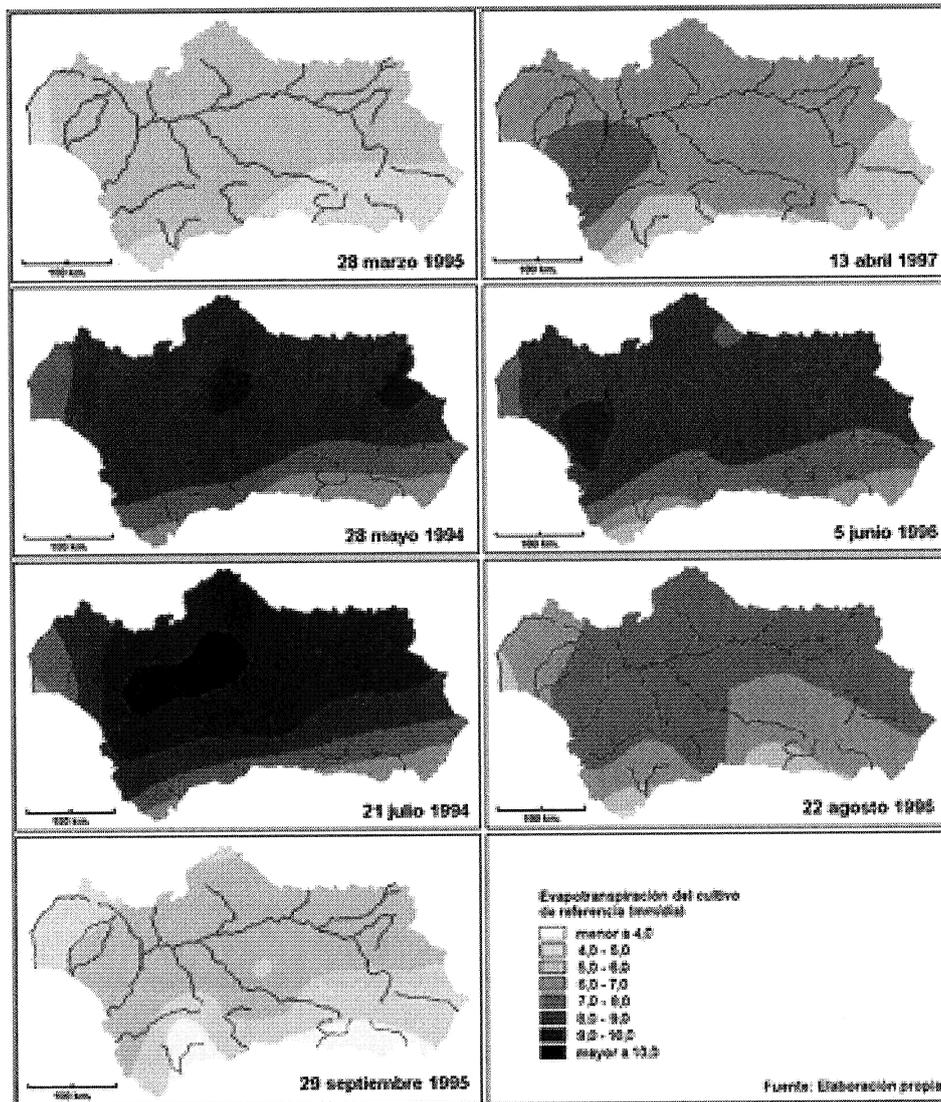


FIG. 2.—Interpolación espacial de la ET_c (mm/día) mediante el método de kriging en días seleccionados.

temporales, destacó la regularidad existente entre los cuatro años estudiados, respecto de las variables significativamente correlacionadas con la ET_o y ET_m , a pesar de que las mejores correlaciones se obtuvieron en 1995, luego en 1997, 1996 y finalmente en 1994. Las variables más destacadas fueron la Ts y el cociente NDVI/Ts, tanto por los altos coeficientes alcanzados como por su frecuencia. No se apreciaron diferencias en las correlaciones de acuerdo al tipo de cubierta vegetal característico, ni en las variables relevantes entre las estaciones según el tipo climático al que pertenecían.

Las buenas correlaciones detectadas entre la estimación de la ET con el método Penman-Monteith y las variables derivadas de satélite permitieron obtener la ET_o a partir de los datos satelitales utilizando ecuaciones de regresión múltiple (método de inclusión iterativa con umbrales de probabilidad). Los análisis de regresión realizados para días y períodos escogidos señalaron a las variables Ts, Ts-Ta y VERDOR o NDVI como significativas, especialmente las dos primeras que explicaban la mayor parte de la variación espacial de la ET_o . En la ET_m las variables relevantes cambiaban según el día o período considerado, aunque se mantuvieron como importantes la Ts-Ta y el VERDOR. En el caso de las ecuaciones relativas a la ET_o , el parámetro r^2 ajustado osciló entre 0,73 y 0,89, lo que indicaba un buen nivel de acierto en la estimación obtenida con los modelos generados. Al igual que se hizo con la interpolación espacial, estas ecuaciones de ajuste se calcularon para un conjunto de 22 a 25 estaciones, dejando siempre 5 al margen para la verificación.

El nivel de precisión de la ET_o estimada con estas ecuaciones fue valorado a través del error cuadrático medio (ECM), calculado para las 5 estaciones de verificación. Como puede observarse en el cuadro 1, en todos los casos el error alcanzado por la ecuación de regresión múltiple fue notablemente inferior al obtenido mediante interpolación espacial.

También fueron calculados los residuales entre valores observados y estimados por las ecuaciones de regresión. En el 96 % de los datos de ET_o diarios y en el 97 % de los sintéticos para períodos estas diferencias fueron menores al 10 % de variación. Los mayores residuales se obtuvieron en estaciones costeras.

De acuerdo a los datos anteriores se puede señalar que las imágenes de satélite, a través de la aplicación sistemática de las ecuaciones encontradas, pueden ser utilizadas en la obtención de una visión continua de la ET_o en el área de estudio, lo que en otras palabras significa «inter-

polar» espacialmente los datos obtenidos con el método de Penman-Monteith con una mejor precisión que la alcanzada con el método de *kri-king*. Estos resultados se encuentran dentro de umbrales adecuados en

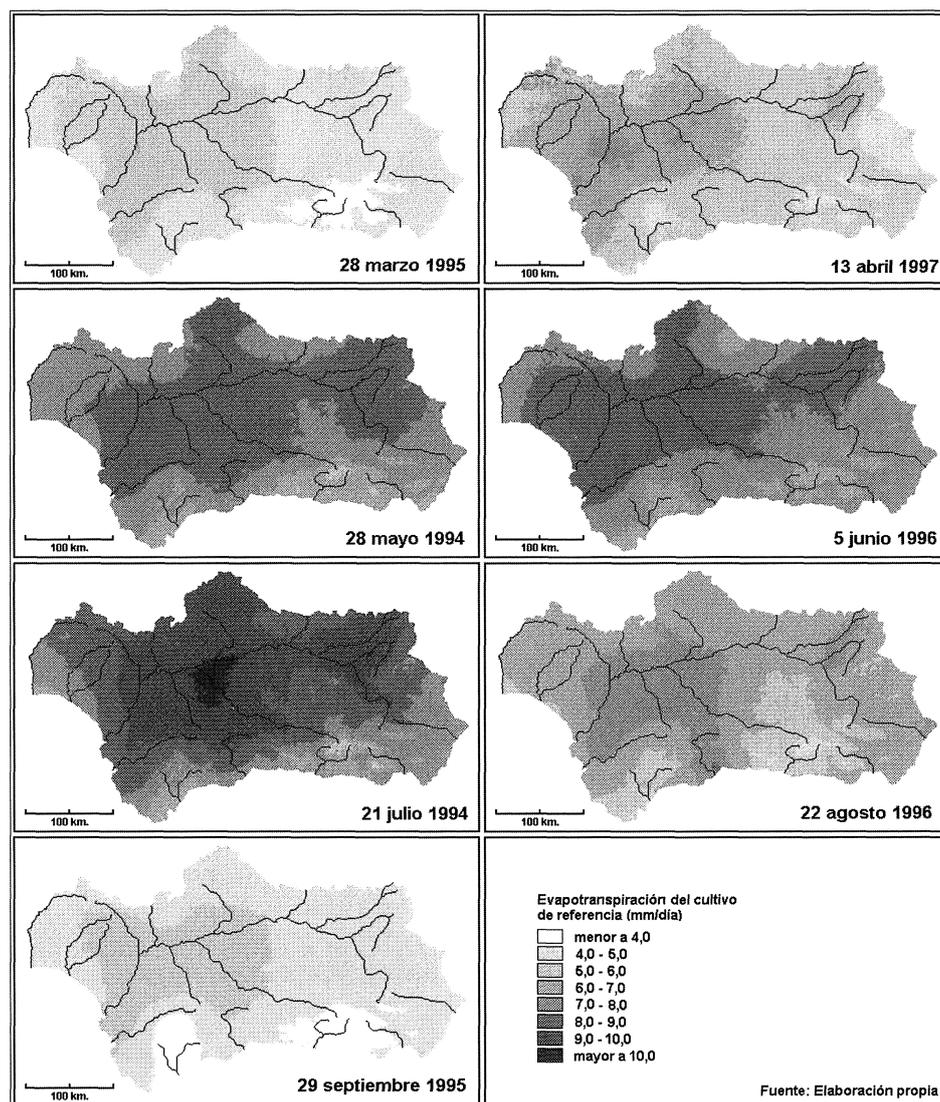


FIG. 3.—Interpolación espacial de la ET_0 (mm/día) mediante ecuaciones de regresión múltiple en días seleccionados.

CUADRO I

ERROR CUADRÁTICO MEDIO (ECM) DE LA INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA ET_0 (MM/DÍA) CON EL MÉTODO DE *KRIGING* Y LAS ECUACIONES DE REGRESIÓN MÚLTIPLE EN DÍAS Y PERÍODOS ESCOGIDOS

Días	Error cuadrático medio		Períodos	Error cuadrático medio	
	Método <i>kriging</i>	Regresión múltiple		Método <i>kriging</i>	Regresión múltiple
29 marzo 1995	0,56	0,31	23-29 marzo 1995	0,54	0,31
13 abril 1997	0,58	0,18	12-15 abril 1997	0,58	0,18
28 mayo 1994	0,47	0,41	22-27 mayo 1996	0,53	0,20
5 junio 1996	0,68	0,43	4-8 junio 1996	0,63	0,24
21 julio 1994	0,63	0,39	20-25 julio 1994	0,90	0,59
22 agosto 1996	0,72	0,38	2-7 agosto 1995	0,78	0,29
29 septiembre 1995	0,87	0,24	2-9 septiembre 1997	0,72	0,19

Fuente: Elaboración propia.

este tipo de estudios. Los mapas elaborados para los siete días seleccionados se muestran en la figura 3. Frente a la figura 2, puede observarse un mayor realismo en la distribución de la ET, especialmente en zonas de relieve quebrado como el macizo central de Sierra Nevada o la Serranía de Ronda.

La figura 4 recoge el porcentaje de variación entre ambos métodos de interpolación. El análisis de esta figura, permite observar que las mayores variaciones se presentaron en el sector oriental de la región a diferencia de lo que ocurrió en el valle del Guadalquivir y las zonas occidentales, que registraron las diferencias más reducidas. Estas mayores variaciones pueden atribuirse a la falta de estaciones meteorológicas en estas áreas, lo que implicaba que el modelo no estuviera calibrado adecuadamente en ellas. Obviamente, estos mapas de variación no pueden considerarse una verificación de la interpolación realizada con las imágenes de satélite, ya que en esos y otros sectores, con ausencias de información meteorológica, claramente proporcionan una estimación más ajustada que la producida por la interpolación espacial. La precisión de ésta se relaciona estrechamente con la calidad de los datos de partida, ya que se asume de alguna manera que el espacio entre estaciones es isotrópico, aunque pueda modelarse con funciones no lineales. Por el contrario, las imágenes de satélite representan una me-

dición sistemática y espacialmente exhaustiva del territorio, lo que permite recoger una variación espacial mucho más realista de las variables de interés.

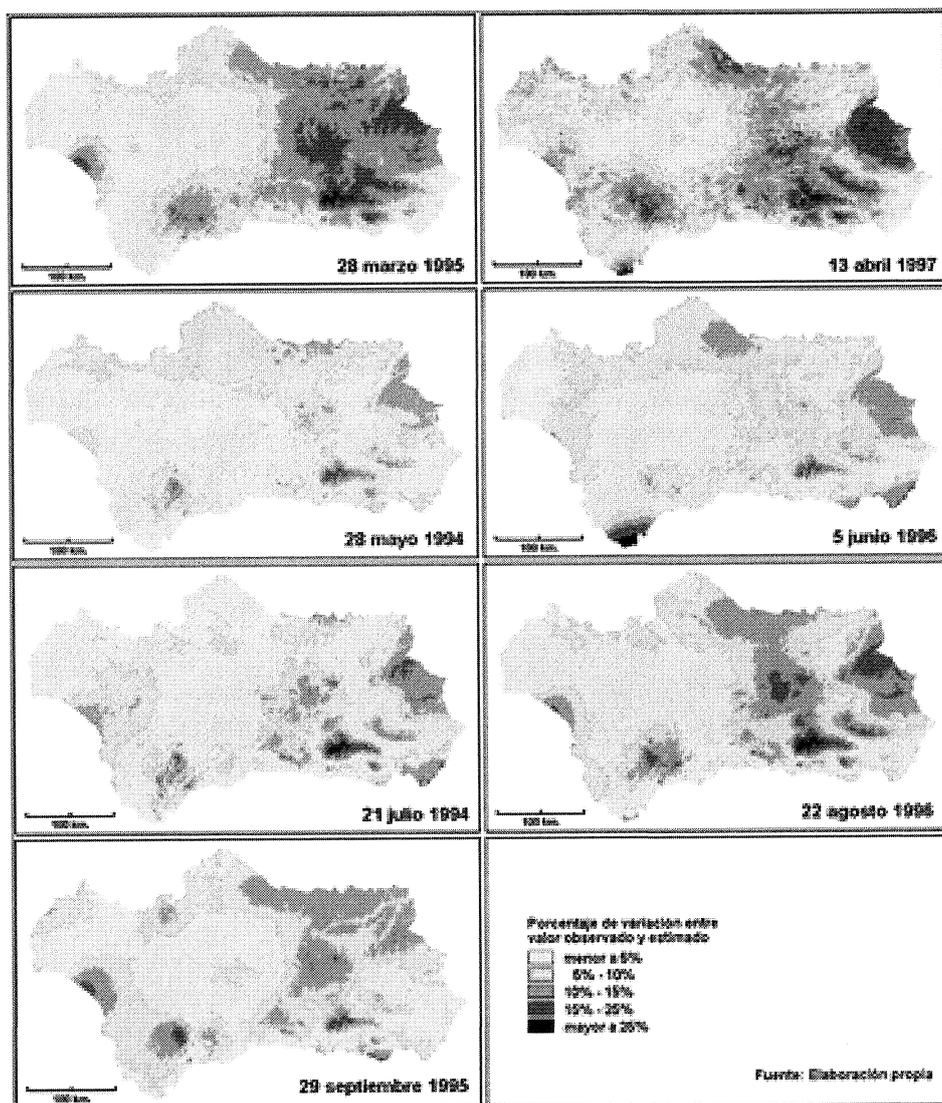


FIG. 4.—Porcentaje de variación entre los mapas de ET_0 obtenidos mediante interpolación espacial con el método de kriging (valores observados) y los obtenidos por regresión múltiple (valores estimados) en días seleccionados.

En el caso de la ET_m no se encontró una ecuación satisfactoria en los términos aquí planteados para predecirla en todos los días y períodos seleccionados (r^2 corregido mayor a 0,70), para superar este inconveniente y conseguir todos los mapas deseados se siguió un procedimiento que utiliza los mapas de ET_o obtenidos con las imágenes y su posterior ponderación con los mapas de coeficientes de vegetación utilizados en el análisis de los datos meteorológicos; de esta manera se aprovecha la buena calidad de la predicción de la ET_o y la información específica para cada tipo vegetal y su estado fenológico contenida en los coeficientes. Los mapas así obtenidos presentan igual precisión que los mapas de ET_o .

Conclusiones

La conclusión general a la que se llega con este trabajo es que las imágenes NOAA-AVHRR resultan muy eficaces en la determinación de la ET_o y ET_m a escala regional. Así lo demuestran los buenos resultados obtenidos al contrastar la ET_o estimada con el método Penman-Monteith y con las imágenes de satélite en los puntos donde se sitúan las estaciones meteorológicas, así como también al comparar los mapas elaborados para toda Andalucía. Sin embargo, para obtener resultados más certeros y que informen realmente el fenómeno en la región debe disponerse de una red de observatorios más denso que permita calibrar el modelo en determinados espacios; del mismo modo se requiere información más completa respecto de coeficientes adaptados a todos los tipos vegetales de la región, de los cuales depende la calidad de la ET_m estimada, la cual hereda también las posibles carencias de la determinación de la ET_o .

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, ALLEN, R. J.; JENSEN, M; MRIGHT, J. L. y MURMAN, R. D. (1989): Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, vol. 81, pp. 650-662.
- ANAYA Editorial (1996): *Atlas de Andalucía y de España*. Madrid.
- CASELLES, M., V; MELEGIDO G., J. V. y MURTADO S., E. (1993): Teledetección: Aplicación a la determinación de la evapotranspiración. En *Agronomía del Riego* (coordinadores F. J. Martín de Santa Olalla y J. A. De Juan), Capítulo X. Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

- CASELLES, V.; ARTIGAO, M. M.; MURTADO, E.; MOLL, 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*, vol. 63, pp. 1-10.
- CHOUDHURY, B. J. (1994): Synergism of multispectral satellite observations for estimating regional land surface evaporation. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 264-274.
- CHUVIECO, E. (1996): *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Editorial Rialp. Tercera edición. Madrid.
- CIHLAR, J.; St. LAURENT, L. y DYER, J. A. (1991): Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, pp. 279-298.
- 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.
- ENGMAN, E. T. y GURNEY, R. J. (1991): *Remote Sensing in Hydrology*. Chapman and Hall. Cambridge.
- JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. y PINTER, P. J. (1981): Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources*, vol. 17, pp. 1133-1138, citado por Vidal, A., y Devaux-Ros, C. (1995): Evaluating forest fire hazard with Landsat TM derived water stress index. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 77, pp. 207-224.
- 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*, vol. 7, pp. 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, N° 70. American Society of Civil Engineers. New York.
- MUSTAS, W. P. y MORMAN, J. M. (1996): Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 41, N° 4, pp. 495-517.
- MARTINEZ-COB, A. (1996): Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain. *Journal of Hydrology*, vol. 14, pp. 19-35.
- MORA, F. e IVERSON, L. R. (1998): On the sources of vegetation activity variation, and their relation with water balance in Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, N° 10, pp. 1843-1871.
- 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*, vol. 49, pp. 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*, vol. 28, pp. 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. Geoforma Ediciones. Logroño.
- SEGUIN, B.; COURAULT, D. y GUÉRIF, M. (1994): Surface temperature and evapotranspiration application of local scale methods to regional scales using satellite data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 287-295.

- VILLAR, J. M. y ELÍAS, F. (1996): Evapotranspiración. En *Agrometeorología*. (coordinadores F. Elías y F. Castellvi), Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- MIEGAND, C. L. y RICHARDSON, A. J. (1990): use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield, I. Rationale. *Agronomy Journal*, vol. 82, pp. 623-629, citado por Cihlar, J.; St. Laurent, L. y Dyer, J. A. (1991).
- 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*, vol. 18, N° 10, pp. 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*, vol. 18, N° 2, pp. 453-459.
- ZHANG, L. y LEMEUR, R. (1995): Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 74, N° 1-2, pp. 139-154.

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_0 en la Comunidad Autónoma de Andalucía en el período 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..

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.