

ESTIMACIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES NOAA Y DATOS METEOROLÓGICOS

Marcela Sánchez¹, Inmaculada Aguado² y Emilio Chuvieco²

¹Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

²Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá

RESUMEN

Se presenta un método para estimar evapotranspiración máxima a partir de datos de imágenes NOAA-AVHRR, tomando como ejemplo el período comprendido entre marzo y septiembre de 1995 en la Comunidad Autónoma de Andalucía. El método se basa en ajuste estadístico con la evapotranspiración de referencia calculada por el método de Penman-Monteith, corregida con la aplicación de coeficientes adaptados a las cubiertas vegetales presentes en la región. Se calcularon porcentajes de variación entre mapas generados por ambos medios, obteniéndose un grado de ajuste que permite afirmar la utilidad de las imágenes NOAA-AVHRR en la estimación de la evapotranspiración a escala regional.

1. Introducción

El agua es un elemento vital para la vida vegetal y animal. El conocimiento de las pérdidas de agua por evapotranspiración permite estimar las disponibilidades de este recurso y, consecuentemente, puede realizarse una mejor distribución y manejo del mismo. Desde el punto de vista agronómico, la estimación de la evapotranspiración es clave en varias facetas, principalmente para programar las tareas de irrigación y conocer pérdidas de humedad del suelo (Rosenberg *et al.*, 1983).

El clima Mediterráneo se caracteriza por su irregularidad hídrica. Las precipitaciones sufren notables alteraciones anuales, que dan lugar a sequías o inundaciones, según el signo de la irregularidad. Por ello, conocer la cantidad de agua perdida por evapotranspiración resulta crítico, toda vez que el riego y su correcta programación es el único medio de complementar las precipitaciones y producir altos y estables rendimientos en las zonas de cultivo.

Existe una carencia generalizada de estudios encaminados a la determinación de la evapotranspiración a escala regional. La mayor parte de los cálculos existentes han sido realizados a dos diferentes niveles espaciales: global, con una resolución muy pequeña, dando una imagen del fenómeno bajo una óptica climática, o bien a escala local en

estudios realizados desde el punto de vista meramente botánico y a veces agronómico, pero de validez puntual. Sin duda la extrema situación anterior deriva de la dificultad de obtener medidas directas de la evapotranspiración en un número suficiente de puntos que permitan dar una visión válida del fenómeno a escala regional. El trabajo que se presenta intenta precisamente demostrar la utilidad de la información generada a partir de las imágenes de satélite en el estudio de la evapotranspiración a escala regional.

2. Área y período de estudio

El área de estudio corresponde a la Comunidad Autónoma de Andalucía y el período de análisis está comprendido entre marzo y septiembre de 1995. Aun reconociendo que se trata de una serie corta, pensamos que tanto las dimensiones del área de aplicación, con sus más de 87.000 km² de superficie y sus variadas condiciones climáticas y vegetacionales, como la variación estacional de la serie de datos, garantizan una suficiente variabilidad espacial y temporal para contrastar los resultados.

La información meteorológica base para estimar la ETr es la proporcionada por 27 estaciones meteorológicas distribuidas en la región. Estas estaciones son representativas de los 7 tipos climáticos definidos en Andalucía por el grupo de climatología de la A.G.E. (ANAYA, 1996).

3. Metodología

El trabajo consta de 4 etapas fundamentales. Las dos primeras fases se refieren a la estimación de la evapotranspiración con un método convencional y a la generación de la información a partir de las imágenes NOAA-AVHRR respectivamente; la tercera corresponde a un análisis de correlación entre ambos tipos de información con la finalidad de verificar las relaciones entre ellas y fundamentar la cuarta etapa, relativa a la estimación directa de la evapotranspiración a partir de los datos de satélite.

La estimación de la evapotranspiración se realizó a su vez en dos pasos. La primera corresponde a la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETr) con el método Penman-Monteith y la segunda al cálculo de la evapotranspiración máxima (ETm). La ETr se puede definir como la evapotranspiración que corresponde a un cultivo imaginario (en este caso gramíneas) bajo las condiciones meteorológicas



prevalecientes en el momento en que se realiza la estimación, considerando que este cultivo cubre toda el área estudiada y no sufre de falta de agua (Sánchez, 1992). Para efectos prácticos lo que interesa conocer es la cantidad de agua requerida por las diferentes cubiertas vegetales presentes en la región, por ello la ETr debe corregirse y adaptarse a la vegetación real. Esta corrección se realiza con la aplicación de los denominados coeficientes de cultivo Kc, que relacionan la cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo de referencia con la correspondiente a cualquier otro cultivo. Los Kc son específicos para cada tipo de vegetal y etapa fenológica en la que se encuentran.

El método de Penman-Monteith fue introducido en 1965 y corresponde a una variación del método original propuesto por Penman en 1948. Está basado en la ecuación de combinación del balance de energía y la transferencia turbulenta del vapor de agua. Ha demostrado ser uno de los métodos más precisos en la determinación de la ETr. Su formulación general, tomada de Allen *et al.* (1989) es la siguiente:

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

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

El método Penman-Monteith ofrece como resultado el flujo de calor latente expresado en unidades de energía, en este caso W/m² puesto que se realizó una estimación instantánea para las 14:30 h., hora aproximada de paso del satélite por la región. El flujo de calor latente puede ser transformado fácilmente en volúmenes de agua evapotranspirada si se divide su valor por el calor latente de vaporización, es decir, la cantidad de calor necesaria para evapotranspirar una unidad determinada de masa de agua.

El flujo de calor latente instantáneo puede servir para estimar la Etr diaria utilizando el modelo propuesto por Jackson *et al.* (1983). Este método se basa en asumir que la evapotranspiración sigue el ritmo de la radiación solar diaria y que la relación J entre la irradiancia total diaria y una medida de radiación instantánea sigue una función sinusoidal. Según esto es posible obtener una medida de la estimación de evapotranspiración diaria si se tiene una estimación instantánea y se conoce la relación J que es función de la latitud, fecha y hora del día. Con este modelo se obtienen buenos resultados si se aplica en días con cielos despejados.

A partir de los datos puntuales de ETr se obtuvo una imagen continua del fenómeno para toda la región, luego de interpolar espacialmente los valores de las estaciones a través de la aplicación del método *kriging*. La precisión del método, evaluada en función del porcentaje de variación alcanzado por la diferencia entre valor observado y estimado respecto del valor observado para algunas estaciones reservadas para la verificación fue satisfactoria (en el 60% de los casos menor al 10% y en dos de ellos entre 21 y 22% como máximo). Se observó una ligera tendencia hacia la sobreestimación de los valores.

Para establecer la ETm se corrigió la ETr aplicando los coeficientes de cultivo (K_c) adecuados a la vegetación regional. En la bibliografía más común sobre estos temas, 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 la cubierta vegetal con el correspondiente a las gramíneas (Sánchez, 1998). Finalmente se contó con coeficientes adaptados a todos los tipos vegetales de la región y a todos los períodos estudiados, que permitieron estimar la ETm a partir de la ETr previamente interpolada.

De las imágenes de satélite disponibles fueron seleccionadas 30 que presentaban una calidad geométrica y radiométrica adecuada, y cumplían con la condición de que la Comunidad de Andalucía se presentara libre de nubes para poder derivar de ellas toda la información deseada. Las variables generadas a partir de estas imágenes fueron: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), verdor relativo (VERDOR), decremento del NDVI (DEC), temperatura de superficie (TS), cociente entre el NDVI y

la TS (NDVI/TS) y la diferencia de temperaturas entre la de superficie y del aire (TS-TA).

Los datos obtenidos para la ETr y ETm en cada estación fueron sometidos a un análisis de correlación con las variables de satélite antes señaladas. Este análisis fue realizado desde el punto de vista espacial para determinar si las grandes diferencias espaciales influyen 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. Los análisis de correlación fueron realizados con los datos de las imágenes para 30 días como también para períodos agregados de 3 a 5 días distribuidos en los meses de marzo, junio, julio, agosto y septiembre.

Finalmente la estimación de la ETr y ETm a partir de las imágenes de satélite se realizó a partir de las ecuaciones de regresión múltiple obtenidas para cada uno de los 5 períodos mensuales señalados. Se utilizó un método inclusivo de selección de variables significativas entre los dos tipos de información, tomando como variable dependiente la ET y las independientes las variables de satélite.

4. Resultados

La estimación de la ETr con el método Penman-Monteith indicó que la ETr alcanza sus valores más bajos en marzo y su mayor intensidad en julio para disminuir hacia septiembre, aunque en este último mes no se alcanzan tan bajos valores como en marzo. La ETr es mayor en las zonas interiores que en las costeras. Las estaciones de interior (16) son muy homogéneas entre sí en cuanto al comportamiento del fenómeno, prácticamente no se observan diferencias entre los distintos tipos de clima. Por el contrario, las estaciones de costa (11) son muy variables entre sí, incluso dentro de un mismo tipo de clima. La ETm, por su parte, conserva los grandes rasgos temporales definidos por la ETr, aunque en este caso se observa una mayor variabilidad espacial impuesta por los matices que se introducen al incorporar la vegetación y sus diferencias temporales.

Las variables de satélite también experimentan grandes variaciones temporales, aunque se aprecian áreas de grandes contrastes y otras de mayor estabilidad. Las áreas más

dinámicas corresponden a las zonas de secano y regadío del valle y vega del Guadalquivir, mientras que las más estables son las zonas altas forestales del sector oriental de la región como las sierras Nevada, Cazorra, Segura y también del sur de la provincia de Cádiz, desde Tarifa al norte y las sierras de Grazalema y Ronda.

En cuanto a los resultados obtenidos de los análisis de correlación, el análisis espacial realizado entre los datos de los 5 períodos demostró que la ETr está relacionada con las variables asociadas a la temperatura de superficie (TS, NDVI/TS y TS-TA), es decir, aquellas que experimentan cambios a corto plazo; mientras que la ETm con las relacionadas con los índices de vegetación (NDVI-MVC, VERDOR y NDVI/TS), que manifiestan variaciones estacionales o de más largo plazo. En las estaciones de interior estas correlaciones son más consistentes tanto para la ETr como la ETm. Con respecto a las correlaciones temporales, las variables correlacionadas de manera significativa con la ETr son el cociente NDVI/TS, la diferencia TS-TA y en especial la TS, alta y significativamente correlacionada en 24 de las 27 estaciones. Las mismas variables son relevantes en la ETm, aunque aquí adquiere mayor importancia el cociente NDVI/TS. No se aprecian diferencias en las variables significativas según el tipo climático de las estaciones ni tampoco según el tipo de cubierta vegetal característico del lugar.

Las buenas correlaciones detectadas entre la estimación de evapotranspiración con el método Penman-Monteith y las variables derivadas de satélite permitieron estimar la ET a partir de los datos satelitales, para lo cual se aplicó el análisis de regresión múltiple previamente señalado. Las ecuaciones obtenidas para la ETr señalaron a las variables TS, TS-TA y VERDOR como significativas en los 5 períodos. Para el caso de la ETm las variables cambian según el período considerado, aunque siempre es importante la TS-TA y el VERDOR en julio, agosto y septiembre. En el caso de las ecuaciones relativas a la ETr el parámetro r^2 fue superior al 75%, mientras que en la ETm fue algo menor.

El nivel de precisión de las ecuaciones obtenidas fue valorado a través del porcentaje de variación entre el valor obtenido por el método de Penman-Monteith y el estimado luego de aplicar las ecuaciones. Para la ETr esta variación fue inferior al 10% en 25 de las 27 estaciones consideradas en todos los períodos (las excepciones fueron las

estaciones costeras de Tarifa y Carboneras), e incluso menor al 5% en el 60% de todas las observaciones, con lo cual se considera que las ecuaciones conseguidas logran predecir con buena aproximación la ETr en la región. En la ETm se observaron variaciones más altas en algunas estaciones.

Debe señalarse que el método utilizado para el análisis de regresión múltiple no detectó una ecuación satisfactoria para predecir la ETm en el período de junio, por lo cual no fue evaluada en este período. Para superar este inconveniente y obtener el parámetro se siguió un procedimiento que utiliza los mapas de ETr obtenidos con las imágenes y la corrección por los coeficientes de cultivo. De esta forma, se aprovecha la buena calidad de la predicción de la ETr y la información específica para cada tipo vegetal y su estado fenológico. Los mapas obtenidos de esta manera (ver figura 1) presentan igual precisión que los mapas de ETr.

Para obtener una imagen continua de las variaciones que se producen en la región entre la ETr y ETm obtenidas con datos meteorológicos y con las imágenes de satélite se elaboró un mapa para cada período que expresa el porcentaje de variación que representa la diferencia entre los dos valores con respecto al valor obtenido con los datos meteorológicos. Se tomaron como observaciones los mapas obtenidos con la interpolación de datos meteorológicos y los mapas construidos con las ecuaciones de regresión. Los porcentajes de variación para cada uno de los períodos se presentan en la figura 2.

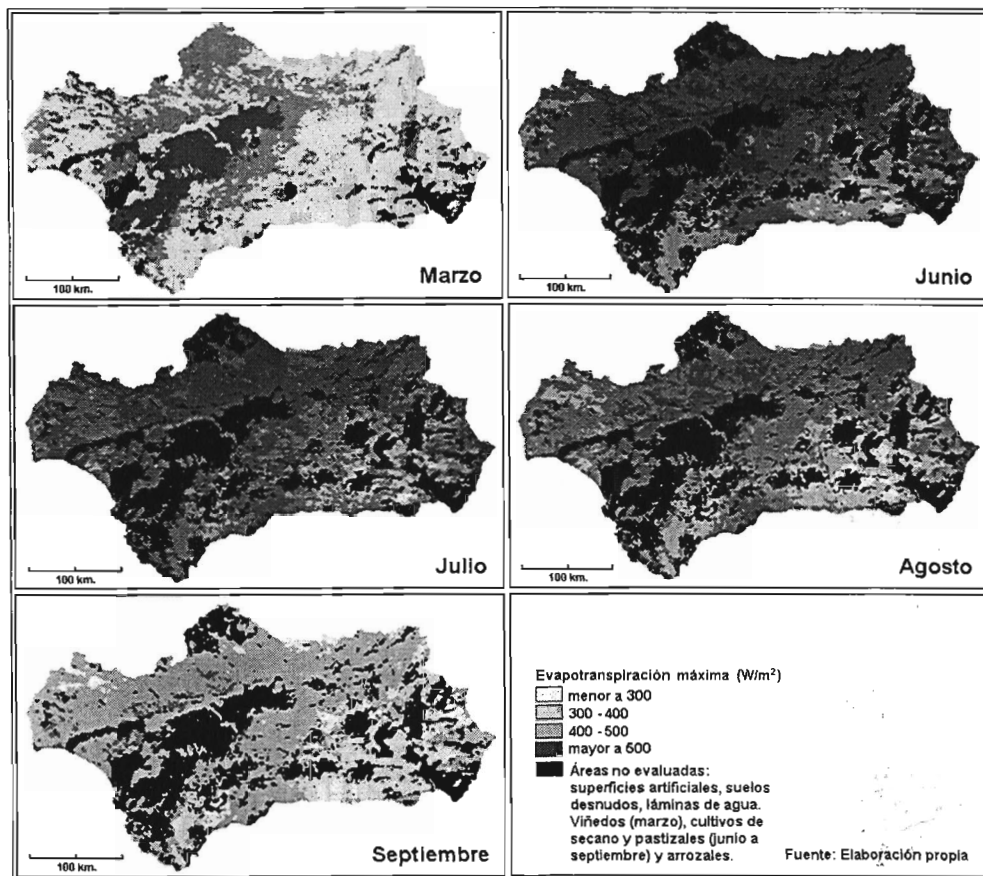


Figura 1. Evapotranspiración máxima estimada a partir de datos de satélite y coeficientes de vegetación.

En la figura 2 se puede observar que las mayores variaciones se presentan en el sector oriental de la región a diferencia de los que ocurre en el valle del Guadalquivir y las zonas occidentales, que registran valores inferiores al 15% e incluso en buena parte de ellas menores al 5%. Las mayores variaciones que experimentan las primeras zonas señaladas pueden atribuirse a la falta de estaciones meteorológicas en estas áreas lo que implica que el modelo no esté calibrado adecuadamente. El período de marzo (que compromete a los últimos días del mes) es el que registra las máximas variaciones lo cual parece deberse a las condiciones meteorológicas más inestables que se presentan a comienzos de primavera que durante el verano. Las diferencias máximas entre los dos grupos de mapas originales se producen principalmente porque las variables de satélite predicen valores de ETm menores a los obtenidos con los datos meteorológicos; no

obstante, debe recordarse que los mapas interpolados obtenidos con el método kriging tendían a sobreestimar la ET comparados con los valores observados en las estaciones de verificación. Los resultados contenidos en los mapas que se presentan deben ser considerados por tanto, sólo como una aproximación no como una medida de la precisión de la estimación de ETm con datos de satélite, puesto que ésta ya ha demostrado ser satisfactoria al considerar los valores obtenidos en las estaciones meteorológicas, los únicos que pueden ser evaluados con seguridad.

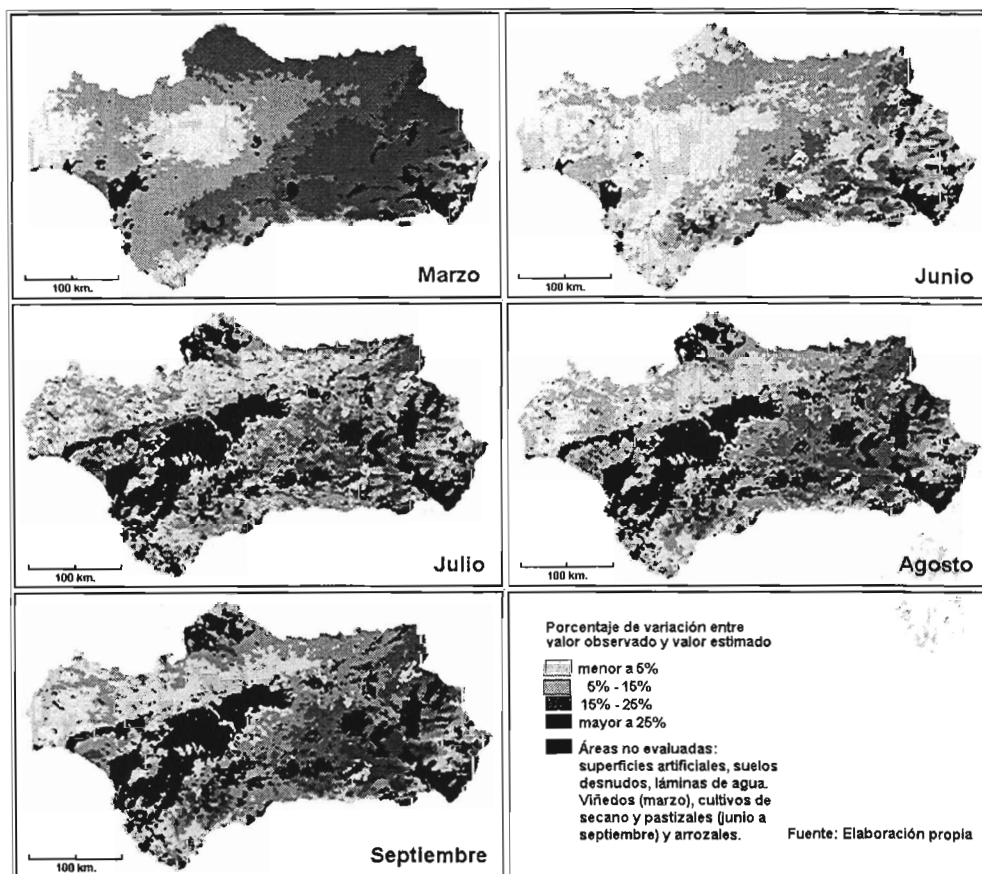


Figura 2. Porcentaje de variación entre la evapotranspiración máxima estimada con datos meteorológicos e imágenes de satélite

5. Conclusiones

Las buenas correlaciones entre la ET estimada con el método Penman-Monteith y la información obtenida de las imágenes de satélite demostraron la utilidad de la teledetección en la determinación de la ETm a escala regional. Sin embargo, para

obtener resultados más precisos debe disponerse de una red de estaciones meteorológicas más densa que permita calibrar el modelo en espacios característicos de la región; del mismo modo se requiere información más completa respecto de coeficientes adaptados a todos los tipos vegetales de la región.

Estamos conscientes que los resultados aquí alcanzados son de validez limitada si se considera las características extremas de sequía presentadas en el período analizado. Estudios más prolongados que permitan contrastar resultados obtenidos ante condiciones meteorológicas diversas permitirían reforzar la conclusión general alcanzada por este trabajo. Al mismo tiempo, es necesario considerar las particularidades espaciales de la región como son el relieve, las características edafológicas, y las diferencias en la influencia oceánica.

6. Bibliografía

- ALLEN, R.J.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L. y BURMAN, 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.
- BURMAN, R. y POCHOP, L.O. (1994): *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Developments in Atmospheric Science, 22. Elsevier.
- DE JUAN., J.A. y MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.J. (1993): Capítulo III: El estrés hídrico en las plantas. Capítulo IV: La evapotranspiración. Capítulo V: La medida de la evapotranspiración. Capítulo VI: El cálculo y la estimación 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.
- 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., ed. (1990): *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, N°70. American Society of Civil Engineers. New York.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (1997): La información ambiental de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. CDRom.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L. y VERMA, S.B. (1983): *Microclimate, The Biological Environment*. John Wiley & Sons. Second edition. New York.
- 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 T., M.I. (1992): *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*, Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones. Logroño.
- ZHANG, L. y LEMEURE, R. (1995): Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 74, N° 1-2, pp. 139-154.