

Evapotranspiración estimada a partir de la temperatura radiativa: 2. Aplicación a imágenes AVHRR- NOAA

M. Ibáñez* y V. Caselles**

*Dept. Medi Ambient i Ciències del Sol, Universitat de Lleida, Av. Rovira Roure 177, 25198 Lleida (Spain)

E-mail: m.ibanez@macs.udl.es

**Dept. Termodinamica, Universitat de Valencia, Doctor Moliner 50,46100 Burjassot-Valencia (Spain)

RESUMEN

El método razón de Bowen radiativa-balance de energía es aplicado para estimar la evapotranspiración a escala regional incorporando la información aportada por las imágenes de satélite. Los datos del sensor AVHRR-NOAA permiten determinar el albedo y la temperatura radiativa de superficie. La metodología desarrollada se aplica en un ejemplo concreto de un día de verano y se comparan los resultados con el flujo de calor latente estimado mediante la metodología tradicionalmente utilizada en superficie FAO-24.

PALABRAS CLAVE: Evapotranspiración, razón de Bowen radiativa, AVHRR.

ABSTRACT

The radiative Bowen ratio - Energy balance method is applied for estimating evapotranspiration at regional scale using the information obtained from satellite images. Albedo and surface radiative temperature are determined from AVHRR-NOAA data. The methodology developed is applied for a given summer day and the results are compared with the latent heat flux estimations given by surface traditional methodology FAO-24.

KEY WORDS: Evapotranspiration, radiative Bowen ratio, AVHRR.

INTRODUCCION

El progreso en la determinación de la evapotranspiración a partir de la temperatura radiativa en superficie ha sido prácticamente simultáneo con el desarrollo de algoritmos aplicables a imágenes captadas desde satélites. Un bloque importante de los trabajos dedicados al tema se basan en la formulación aerodinámica. Estos expresan el flujo de calor sensible directamente como una función de la diferencia entre la temperatura radiativa de la superficie y la temperatura del aire junto con una resistencia aerodinámica que depende entre otros factores de la velocidad del viento y la estructura de la cubierta. Evaluando la radiación neta y el flujo de calor en el suelo, la evapotranspiración se determina como término residual en la ecuación de balance de energía (Moran et al., 1989, Caselles y Hurtado, 1992, Choudhury, 1994, Kustas et al., 1994).

Las limitaciones de este método han sido expuestas proponiéndose una aproximación alternativa, el método razón de Bowen radiativa-balance de energía, que con datos tomados en superficie da mejores resultados en cubiertas completas sin estrés hídrico (Ibáñez y Caselles, en este mismo número).

La aplicación de los modelos desarrollados en superficie a imágenes de satélite presenta enormes dificultades teóricas y prácticas. Junto con los cuestionamientos hechos a cualquier método de

superficie que incorpore la temperatura radiativa hay que añadir por lo menos dos dificultades importantes: el problema de la escala y la realización de las medidas a distancia.

El problema de la escala es debido a la resolución espacial de los sensores operativos en la actualidad. El sensor AVHRR-NOAA, el único con dos bandas adecuadas en el infrarrojo térmico para tener una estimación aceptable de la temperatura de superficie, obliga a trabajar con datos que son valores promedio de un área mayor de 1 km². La utilización de la formulación aerodinámica no es posible pues ésta incorpora parámetros que no son estimables a una escala en la que la heterogeneidad del píxel es segura (Zhang et al. 1995).

Al realizar las medidas de temperatura y reflectividad de la superficie desde satélite incorporamos nuevas imprecisiones en las estimaciones de la evapotranspiración. Las principales fuentes de error son el efecto atmosférico y la emisividad de la superficie. Cuando la diferencia de temperaturas entre la cubierta y el aire es pequeña induce a un gran error en el flujo de calor sensible, incluso de un 50% (Choudhury 1991). La corrección de la temperatura radiativa debida al efecto atmosférico y la emisividad de superficie ya han sido bien resueltos (Coll et al., 1994 y Valor y Caselles, 1996).

En la segunda parte de este trabajo se presenta una metodología para aplicar el método razón de

Bowen radiativa-balance de energía a escala regional que, tal y como se ha expuesto en la primera parte de este estudio, ha dado buenos resultados en superficie. Esta aproximación evita la incorporación de parámetros como la velocidad del viento y la altura del cultivo difícilmente evaluables a escala regional. Los resultados obtenidos con la metodología desarrollada se comparan con los obtenidos a partir de la metodología FAO-24 que es la más extensamente aplicada en estimaciones de la evapotranspiración en superficie a escala regional para planificación, diseño y gestión de zonas regadas.

METODOLOGIA

En esta sección se exponen dos métodos de estimación de la evapotranspiración a escala regional. El primero únicamente utiliza medidas de superficie mientras que el segundo incorpora la información aportada por los satélites.

Método de superficie FAO-24

El método más extendido para estimar la evapotranspiración en zonas de intensa explotación agrícola consiste en multiplicar la evapotranspiración de referencia por un factor que refleja el estado de la vegetación. Este factor naturalmente es una función del tiempo a lo largo del periodo de desarrollo del cultivo (Doorenbos and Pruitt 1977). Para determinar la evapotranspiración de referencia se han propuesto diferentes alternativas pero actualmente se recomienda cuando sea factible su aplicación el método de Penman-Monteith (Smith 1991). Esta expresión da muy buenos resultados debido a que tanto la resistencia aerodinámica como la de la cubierta son bien conocidas para el cultivo de referencia (Alfalfa o trigo). La evapotranspiración de referencia se estima según la ecuación de Penman-Monteith, a partir de la siguiente expresión:

$$\lambda E_{PM} = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (1)$$

donde (E_{PM} es evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d^{-1}), (Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor saturante ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), (γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), R_n es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G es el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T_a es la temperatura media del aire ($^\circ\text{C}$), ($e_a - e_d$) es el déficit de presión de vapor (kPa), u es la velocidad media del viento (ms^{-1}), 900 es un coeficiente para el cultivo de referencia ($\text{kJ}^{-1} \text{kg K d}^{-1}$) y 0.34 es un coeficiente del viento para el cultivo de referencia (s m^{-1}).

La evapotranspiración de referencia se estima en estaciones meteorológicas automáticas de la zona y mediante interpolación se obtiene una mapa para el

área estudiada. Un coeficiente de cultivo medio nos permite aplicar la metodología FAO-24 en la región de interés.

Método Razón de Bowen radiativa-Balance de energía

Un paso importante en la determinación de la evapotranspiración a escala regional es la obtención de la máxima información posible de la superficie a partir de las imágenes de satélite. La información que proporciona el satélite corregida adecuadamente tiene una mayor representatividad espacial que las dadas por las estaciones meteorológicas automáticas en superficie. En este trabajo se determinaron el albedo y la temperatura radiativa de superficie a partir de imágenes del sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA. Junto con esta información la aplicación del método razón de Bowen radiativa -balance de energía, descrito en la primera parte de este trabajo, requiere información meteorológica en cada píxel de la imagen: temperatura (T_a), presión de vapor del aire (e) y radiación solar (R_s). Estos tres parámetros se estiman interpolando mediante el método del gradiente y el inverso de la distancia al cuadrado (Nalder and Wein, 1998) medidas adquiridas en las estaciones meteorológicas.

La formulación necesita de la determinación de la energía utilizable, $R_n - G$, para su aplicación. El cálculo de la radiación neta a escala regional incorporando la temperatura radiativa de la superficie ha sido adecuadamente resuelto por Jackson et al. (1985) sobre cultivos agrícolas y Goodin (1995) en un paisaje semiárido. La relación entre R_n y G para cultivos desarrollados es aproximadamente constante valiendo 0.10 para la alfalfa (Clothier et al., 1986) y 0.07 para el trigo (Denmead, 1969) y maíz (Uchijima, 1976). Pero para el cálculo de G en cubiertas incompletas a partir de datos de satélite es fundamental la relación entre el flujo de calor en el suelo, la radiación neta y algún parámetro de la vegetación (Kustas y Daughtry, 1990).

El siguiente paso es determinar los parámetros que relacionan la razón de Bowen radiativa (β_r) y aerodinámica (β) estas dependen del cultivo que predomina en cada píxel. Conocida la energía utilizable y la razón de Bowen aerodinámica es inmediato el cálculo de la evapotranspiración en el instante de paso del satélite.

Finalmente, el algoritmo propuesto por Jackson et al. (1983) determina el flujo de calor latente diario a partir del valor instantáneo calculado hacia el mediodía. En la Figura 1 se presentan esquemáticamente los pasos seguidos para la obtención de la evapotranspiración diaria, λE_d , mediante imágenes de satélite.

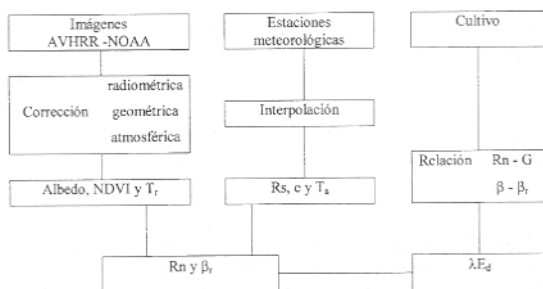


Figura 1. Esquema de la metodología propuesta para la determinación de la evapotranspiración a escala regional (Ver el texto para la definición de los símbolos)

EJEMPLO DE APLICACION

Método Razón de Bowen radiativa-Balance de energía

La metodología expuesta en este trabajo se aplicó a una zona de 30 km x 40 km centrada en el Pla d'Urgell (Lleida). En esta zona los cultivos más extendidos son con notable diferencia el maíz y la alfalfa. Para el estudio se empleó una imagen de la zona captada por el sensor AVHRR a bordo del NOAA12 a las 13.05h T.M.G. del 23 de Julio de 1995.

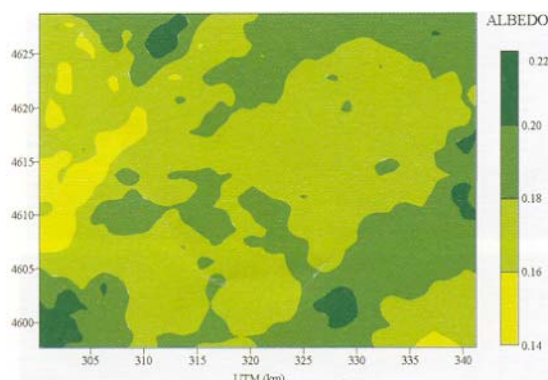


Figura 2. Mapa de albedo en la zona estudiada del Pla d'Urgell. 23 de Julio de 1995.

Para calcular la radiación neta y la razón de Bowen radiativa se requieren el albedo y la temperatura radiativa de la superficie. El primero se determinó partiendo de las señales captadas por los canales 1 y 2 del sensor AVHRR. Las reflectividades en la cima de la atmósfera se corrigieron utilizando el programa SMAC (Rahman and Dedieu, 1994) para obtener los valores en superficie. Estos permitieron determinar el albedo utilizando el algoritmo de Saunders (1990). Este es una primera aproximación aplicada por su simplicidad aunque existen trabajos posteriores más precisos y complejos (Li y Leighton, 1992). El resultado para la zona estudiada se presenta en la Figura 2.

La determinación de la temperatura de superficie a partir de las temperaturas de brillo de las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR se realizó empleando el método propuesto por con et al. (1994) considerando que la emisividad de la superficie es 0.99

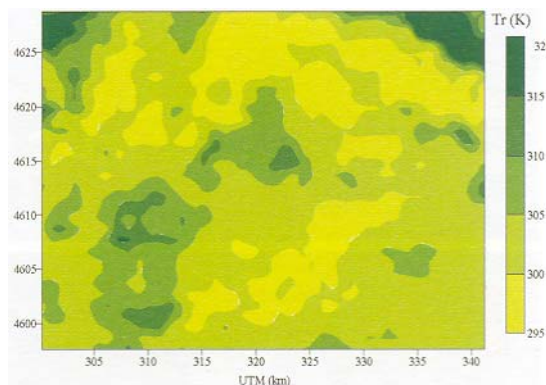


Figura 3. Imagen de temperatura radiativa de superficie en la zona estudiada del Pla d'Urgell. 23 de Julio de 1995.

dato que estamos en cultivos con cubierta completa. El resultado es el mapa mostrado en la Figura 3.

El Departament d' Agricultura, Ramaderia i Pesca (Generalitat de Catalunya) dispone de esta red de estaciones meteorológicas que es especialmente densa en la comarca del Pla d'Urgell próxima a Lleida. Los datos instantáneos adquiridos en estas estaciones, debidamente interpolados (Nalder and Wein, 1998), dieron estimaciones de temperatura del aire, radiación solar y presión de vapor del aire en cada píxel de una imagen de satélite. Estos tres parámetros, el albedo y la temperatura radiativa de cada píxel junto con el método de la razón de Bowen radiativa-Balance de energía a escala regional cuando el cultivo es conocido permitieron estimar la evapotranspiración en el instante de paso del satélite.

Al no disponerse de una clasificación adecuada a partir de imágenes de satélite de los diferentes cultivos se recurrió a las estadísticas agrarias del año anterior para tener una estimación del porcentaje de suelo cubierto por cada cultivo. El mapa de evapotranspiración diaria obtenido con la metodología desarrollada se muestra en la Figura 4.

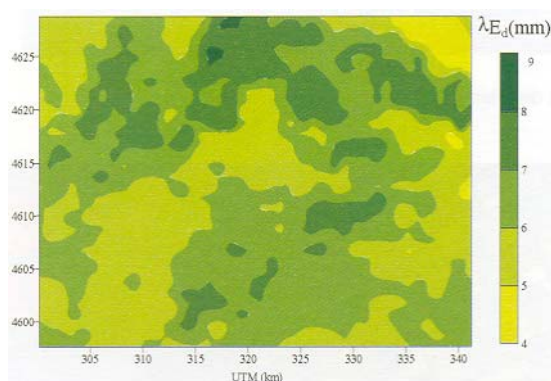


Figura 4. Mapa de evapotranspiración diaria a partir del método razón de Bowen radiativa-balance de energía en el Pla d'Urgell.

Comparación con el método de superficie

A partir de los datos meteorológicos de superficie haciendo uso de la velocidad del viento es posible estimar utilizando la ecuación (1) la evapotranspiración de referencia en las diferentes estaciones. La interpolación de estos valores permitió obtener un mapa de evapo-

transpiración de referencia para la zona estudiada. Este flujo de calor latente multiplicado por el coeficiente de cultivo adecuado a los cultivos que cubren la zona dió la evapotranspiración diaria estimada según esta metodología tradicional. El resultado para el día 23 de Julio de 1995 se presenta en la Figura 5.

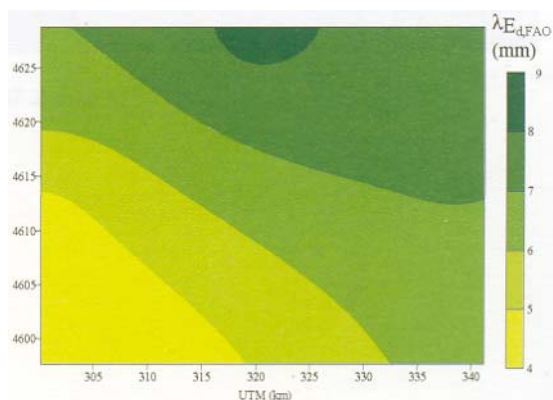


Figura 5. Mapa de evapotranspiración diaria a partir del método FAO-24 en la zona estudiada del Pla d'Urgell.

La evapotranspiración diaria obtenida en cada píxel de la imagen mediante la aplicación del método de la razón de Bowen radiativa, (E_b , se contrastó con la resultante de la aplicación del método FAO-24, (E_{FAO} en los mismos puntos. Los resultados se presentan de forma resumida en la Tabla 1.

Datos	A	ESE (mm)	r ²	IMDA (mm)	RECM (mm)
600	1.12	1.4	0.65	1.2	1.4

Tabla 1. Comparación de la evapotranspiración obtenida en los diferentes píxeles de la imagen estudiada mediante el método razón de Bowen radiativa-Balance de energía frente al valor determinado con la metodología FAO-24.

A, pendiente de la recta de regresión forzada a pasar por el origen entre los valores estimados (E_i) y las medidas (M_i);

$$\text{Media de la Diferencia Absoluta, } MDA = -\frac{1}{n} \sum |M_i - E_i|$$

$$\text{Raíz del Error Cuadrático Medio, } MDA = \left[\frac{1}{n} \sum (M_i - E_i)^2 \right]^{1/2}$$

Dado que el valor medio de la evapotranspiración dada por el método FAO-24 en el área estudiada fue de 6.4 mm y la RECM fue 1.4 mm se considera que las estimaciones de ambos métodos se aproximan razonablemente. El método desarrollado tiende a subestimar las determinaciones realizadas utilizando únicamente datos de superficie. El bajo coeficiente de determinación es aceptable dada la diferente fundamentación física y las aproximaciones realizadas para la aplicación de ambos métodos. Hay que considerar que el método basado en la teledetección no incorpora la velocidad del viento. Esta es una ventaja importante ya que esta magnitud varía considerablemente en unos pocos cientos de metros pues depende de factores como la topografía o la distribución de diferentes cubiertas vegetales.

CONCLUSIONES

La metodología razón de Bowen radiativa-Balance de energía validada con anterioridad en superficie es aplicable a escala regional incorporando la información aportada por las imágenes de satélite. El desarrollo de la teledetección permite utilizar el albedo, el NDVI y la temperatura radiativa de las cubiertas captadas por el sensor AVHRR-NOAA.

El método propuesto evita la determinación de la velocidad del viento en el área estudiada. Magnitud que dada su gran variabilidad puede introducir importantes errores en la determinación de la evapotranspiración diaria a escala regional.

La comparación con el método propuesto por la FAO para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos a partir de datos en superficie da resultados razonables. Una validación más completa del método se está llevando a cabo en estos momentos, para ello se realiza un balance hídrico completo en el cual se incorporan imágenes de satélite diarias para estimar la evapotranspiración durante toda una temporada de riegos en la zona estudiada.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R. G., SMITH, M., PEREIRA, L.S., and PERRIER, A. 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43(2): 1-34
- ALLEN, R. G., SMITH, M., PEREIRA, L. S., and PERRIER, A. 1994b. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43(2): 35-91.
- CASELLES, V. y HURTADO, E. 1992. Estimación de la evapotranspiración del maíz a partir de una imagen térmica del satélite NOAA. *Anales de Física*. 88: 157-163.
- CHOUDHURY, B. J. 1991. Multispectral satellite data in context of land surface heat balance. *Review Geophysics* 29: 217-236.
- CHOUDHURY, B. J. 1994. Synergism of multispectral satellite observations for estimating regional land surface evaporation. *Remote Sensing Environment* 49: 264-274.
- CLOTHIER, B. E., CLAWSON, K. L., PINTER, P. J., MORAN, M. S., REGINATO, R. J. and JACKSON, R. D. 1986. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. *Agricultural and Forest Meteorology*. 31: 319-329.
- COLL, C., CASELLES, V., SOBRINO, J. A., and VALOR, E. 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*. 15: 105-122.
- DENMEAD, O. T. 1969. Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of Pinus Radiata. *Agricultural Meteorology* 6: 357-371.
- DOORENBOS, J., PRUIJT, W. O. 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper* 24. FAO, Rome. 144pp.
- GOODIN, D. G. 1995. Evaluation of a combined modeling-remote sensing method for estimating net radiation in a wetland: a case study in Nebraska Sand

- Hills, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*. 16: 1481-1494.
- JACKSON, R. D., HATFIELD, J. L., REGINATO, R. J., IDSO, S. B. and PINTER, P. J. 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one-time day measurements. *Agricultural Water Management*. 7: 351-362.
- JACKSON, R. D., PINTER, P. J. and REGINATO, R. J. 1985. Net radiation calculated from remote multispectral and ground station meteorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 35: 153-164.
- KUSTAS, W. P. and DAUGHTRY, C. S. T. 1990. Estimation of the soil heat flux / net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 49: 205-223.
- KUSTAS, W. P., PERRY, E. M., DORAISWAMY, P. C., and MORAN, M. S. 1994. Using satellite remote sensing to extrapolate evapotranspiration estimates in time and space over a semiarid rangeland basin. *Remote Sensing of Environment* 49: 275-286.
- LI, Z. and LEIGHTON, H. G. 1992. Narrowband to broadband conversion with spatially autocorrelated reflectance measurements. *Journal of Applied Meteorology*. 31: 421-432.
- MORAN, M. S. JACKSON, R., RAYMOND, L. H., GAY, L. W. and SLATER, P. N. 1989. Mapping surface energy balance components by combining Landsat thematic mapper and ground-based meteorological data. *Remote Sensing of Environment*. 30: 77-87.
- NALDER, I. A. and WEIN, R. W. 1998. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 92: 211-225.
- RAHMAN, H. and DEDIEU, G. 1994. SMAC: A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing* 15: 123-143.
- SAUNDERS, R. W. 1990. The determination of broadband surface albedo from AVHRR visible and near infrared radiances. *International Journal of Remote Sensing*. 11: 49-67.
- SMITH, M., ALLEN, R., MONTEITH, J., PERRIER, A., PEREIRA, L. and SEGEREN, A. 1991. Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO. Italy. 54 p.
- UCHIJIMA, Z. 1976. Maize and rice. In J.L. Monteith (ed.). *Vegetation and the atmosphere*. Vol. 2. Academic Press, N.Y. pp. 33-64.
- VALOR, E., and CASELLES, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. *Remote Sensing of Environment*. 57: 167-184.
- ZHANG, L., LEMEURE, R. and GOUTORBE, J. P. 1995. A one layer resistance model for estimating regional evapotranspiration using remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 77: 241-261.