

La monitorització de l'evapotranspiració real diària mitjançant la teledetecció i els sistemes d'informació geogràfica: el cas de la conca del Foix

Jordi Cristóbal,^{1,3}
Miquel Ninyerola³
i Xavier Pons^{1,2}

1. Departament de Geografia

2. Centre de Recerca Ecològica
i Aplicacions Forestals (CREAF)

3. Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal
i Ecologia
Unitat de Botànica

Universitat Autònoma de Barcelona

Resum

El seguiment de l'evapotranspiració té importants implicacions en la modelització global i regional del clima i en el coneixement del cicle hidrològic, així com per assessorar sobre l'estrès mediambiental que afecta els ecosistemes agrícoles i forestals. A més, l'evapotranspiració està relacionada amb fenòmens d'alt interès per a la gestió dels espais naturals com la previsió del risc d'incendis i la producció primària neta dels ecosistemes. La teledetecció i els sistemes d'informació geogràfica (SIG) són, actualment, les úniques tecnologies capaces de proporcionar les mesures necessàries per al càlcul de l'evapotranspiració real d'una manera global i econòmicament factible. En aquest treball es presenten els primers resultats de la modelització de l'evapotranspiració real diària (ETR_d) a escala regional de la conca del Foix, mitjançant una sèrie temporal de 17 imatges del satèl·lit Landsat-7 ETM+ i dels sistemes d'informació geogràfica, durant el període 2002-2003, resultant-ne un conjunt de 17 mapes digitals amb una resolució espacial de 60 m i amb una resolució temporal gairebé mensual de l' ETR_d . Per a la determinació de l' ETR_d s'ha usat el mètode semiempíric proposat per Seguí i Itier (1989), per al qual és necessari el càlcul de tres variables: la temperatura de la superfície terrestre, la temperatura de l'aire i la radiació neta, obtingudes mitjançant l'ús combinat de la informació de les imatges de satèl·lit i la modelització amb els SIG. Els resultats obtinguts han estat de gran valor per la dificultat en l'obtenció de dades d'ETR en les cobertes forestals i agrícoles i per l'alta resolució espacial i temporal de la cartografia resultant.

Paraules clau

Evapotranspiració real, radiació neta, interpolació espacial, teledetecció, SIG, Landsat

Resumen

La monitorización de la evapotranspiración real diaria mediante la teledetección y los sistemas de información geográfica: el caso de la cuenca del Foix

El seguimiento de la evapotranspiración tiene importantes implicaciones en la modelización global y regional del clima y en el conocimiento del ciclo hidrológico, así como para asesorar sobre el estrés medioambiental que afecta a los ecosistemas agrícolas y forestales. Asimismo, la evapotranspiración está relacionada con fenómenos de especial interés en la gestión de los espacios naturales como son la previsión del riesgo de incendios y la producción primaria neta de los ecosistemas. La teledetección y los SIG son actualmente las únicas tecnologías capaces de proporcionar las medidas necesarias para el cálculo global y económicamente factible de la evapotranspiración. En este trabajo se presentan los primeros resultados de la determinación de la evapotranspiración real diaria (ETR_d) a escala regional de la cuenca del Foix, mediante el uso de una serie temporal de 17 imágenes del satélite Landsat-7 EMT+ y de los SIG, dando como resultado un conjunto de 17 mapas digitales con una resolución espacial de 60 metros y con resolución temporal casi mensual de la ETR_d durante el período 2002-2003. Para determinar la ETR_d , se ha utilizado el método semiempírico descrito por Seguí y Itier (1989), para el cual es necesario el cálculo de tres variables: la temperatura de la superficie terrestre, la temperatura del aire y la radiación neta, obtenidas mediante el uso combinado de la información de las imágenes de satélite y la modelización con los SIG. Los resultados obtenidos son de gran valor debido a la dificultad en la obtención de datos de ETR en las cubiertas forestales y a la alta resolución espacial y temporal de la cartografía resultante.

Palabras clave

Evapotranspiración real, radiación neta, interpolación espacial, teledetección, SIG, Landsat

Abstract

Monitoring real daily evapotranspiration by means of teledetection and geographical information systems: the case of the Foix basin

Monitoring evapotranspiration has major implications for the global and regional modelling of the climate and knowledge of the hydrological cycle, as well as for advising on the environmental stress which affects agricultural and forestry systems. Moreover, evapotranspiration is related to phenomena of great interest for the management of natural areas such as fire prevention and the net primary production of ecosystems. Teledetection and geographical information systems (GIS) are the only technologies today that can provide the necessary measurements for calculating real evapotranspiration globally and in economically feasible way. This work presents the first results of the modelisation of daily actual evapotranspiration (ET_d) on a regional scale of the Foix basin, by means of a temporal series of 17 images from the Landsat-7 ETM+ satellite and geographical information systems over the period 2002-2003. The result is a set of 17 digital maps with a spatial resolution of 60 m and an almost monthly temporal resolution of ET_d . For the determination of ET_d the semiempirical method proposed by Seguí and Itier (1989) has been used, for which three variables have to be calculated: the temperature of the land surface, the temperature of the air and net radiation, obtained by the combined use of the information from the satellite images and modelisation with the GIS. The results obtained have been of great value in obtaining ET_d data for forestry and agricultural occupation and for the high spatial and temporal resolution of the cartography produced.

Keywords

Actual evapotranspiration, net radiation, spatial interpolation, teledetection, GIS, Landsat

Introducció

La monitorització de l'evapotranspiració té importants implicacions en la modelització global i regional del clima i en el coneixement del cicle hidrològic, així com per assessorar sobre l'estrès mediambiental que afecta els ecosistemes agrícoles i naturals (KUSTAS I NORMAN, 1996). La concentració atmosfèrica de gasos causants de l'efecte hivernacle i altres elements climàtics com la precipitació, la nuvolositat, la humitat i la distribució dels vents també afectaran la temperatura. Un dels processos que poden veure's afectats amb aquests canvis és l'evapotranspiració, que alhora desenvolupa un paper clau en el balanç hidrològic. Un increment de l'evapotranspiració en una determinada regió mentre que la precipitació es manté constant o es veu reduïda pot comportar un decrement en l'aigua disponible per als sistemes naturals i agrícoles així com per a les necessitats humanes. És per això que els mètodes basats en la mesura del balanç hídric i, entre els quals el càlcul de l'evapotranspiració, han estat àmpliament usats per estimar els efectes del canvi climàtic (MCKENNEY I ROSENBERG, 1993). A més, l'evapotranspiració és un indicador del grau d'estrès vegetal que pateixen les cobertes naturals i agrícoles i, per tant, és útil de cara a la gestió dels incendis forestals (QUATROCCHI I LUVAL, 2000). El càlcul del dèficit d'aigua, en el qual també estan implicades l'evapotranspiració i la precipitació, permet fer estimacions de la producció primària neta dels ecosistemes (BEGON *et al.*, 1988).

Actualment, la teledetecció i els SIG són les úniques tecnologies capaces de proporcionar les mesures radiomètriques i les eines de modelització espacials necessàries per al càlcul de l'evapotranspiració d'una manera global i econòmicament factible (KUSTAS I NORMAN, 1996).

En aquest treball, es presenta una metodologia basada en el mètode proposat per Seguin i Itier (1989) per a la modelització de l'evapotranspiració real diària (ETR_d) a escala regional de la conca del Foix mitjançant l'ús d'una sèrie temporal de 17 imatges del satèl·lit Landsat-7 EMT+ i dels sistemes d'informació geogràfica. El resultat final consistirà en un conjunt de 17 mapes digitals amb una resolució espacial de 60 metres (una àrea de 3.600 m²) i amb una resolució temporal quasi mensual de l' ETR_d de la conca del Foix.

Material i àrea d'estudi

L'àrea d'estudi comprèn la conca del riu Foix localitzada entre les coordenades UTM-31 N: 373900 (X mínima), 4559100 (Y mínima), 391600 (X màxima), 4591000 (Y màxima) i amb una superfície total de 16.625,9 hectàrees.

En aquest treball s'han usat 17 imatges del satèl·lit Landsat-7 EMT+ de les òrbites 197 i 198 i les files 31 i 32 de les dates següents: 11/01/2002, 12/02/2002, 21/02/2002*, 01/04/2002, 26/04/2002*, 12/05/2002*, 19/05/2002, 15/07/2002*, 07/08/2002, 01/09/2002*, 24/09/2002, 19/10/2002*, 26/10/2002, 27/11/2002, 14/01/2002, 19/03/2002 i 04/04/2002; tot i que no totes les imatges cobrien completament l'àrea d'estudi (les dates marcades amb un * indiquen que la imatge només cobreix el 81% de l'àrea d'estudi).

Metodologia

El mètode usat per al càlcul de l'evapotranspiració real diària ha estat el proposat per Seguin i Itier (1989) ja que ofereix un càlcul de l'ETR a escala regional tenint en compte tant les superfícies conreades com les superfícies amb vegetació natural. Aquest mètode pot ser usat per calcular l'ETR amb un error aproximat de ± 1 mm dia⁻¹ en dies clars. En una àrea extensa és quasi impossible comptar amb imatges completament lliures de núvols. Tot i així, i atès que la majoria d'imatges presenten aquestes condicions, s'ha decidit adoptar l'assumpció d'una atmosfera lliure de núvols.

Segons els autors, el mètode proposa dues alternatives per calcular l'ETR en funció de:

1. Si $(T_{st} - T_a) < 0$, condicions estables, s'aplica l'equació següent:

$$ETR_d - Rn_d = -0,18 \cdot (T_{st} - T_a) \quad (1)$$

2. Si $(T_{st} - T_a) > 0$, condicions inestables, s'aplica l'equació següent:

$$ETR_d - Rn_d = 1,1 - 0,25 \cdot (T_{st} - T_a) \quad (2)$$

on Rn_d és la radiació neta diària (mm dia⁻¹), T_{st} és la temperatura de la superfície terrestre (K) i T_a és la temperatura de l'aire (K). El subíndex $_d$ fa referència a un període de temps diari.

Segons Vidal i Perrier (1992), la temperatura de l'aire i la temperatura de la superfície terrestre haurien d'obtenir-se, aproximadament, entre les 13.00 i les 14.00, hora solar local, perquè en aquest interval es donen els valors màxims de la temperatura de la superfície terrestre i, per tant, les diferències diàries més importants entre aquesta temperatura i la temperatura de l'aire que donen lloc al càlcul de l'ETR.

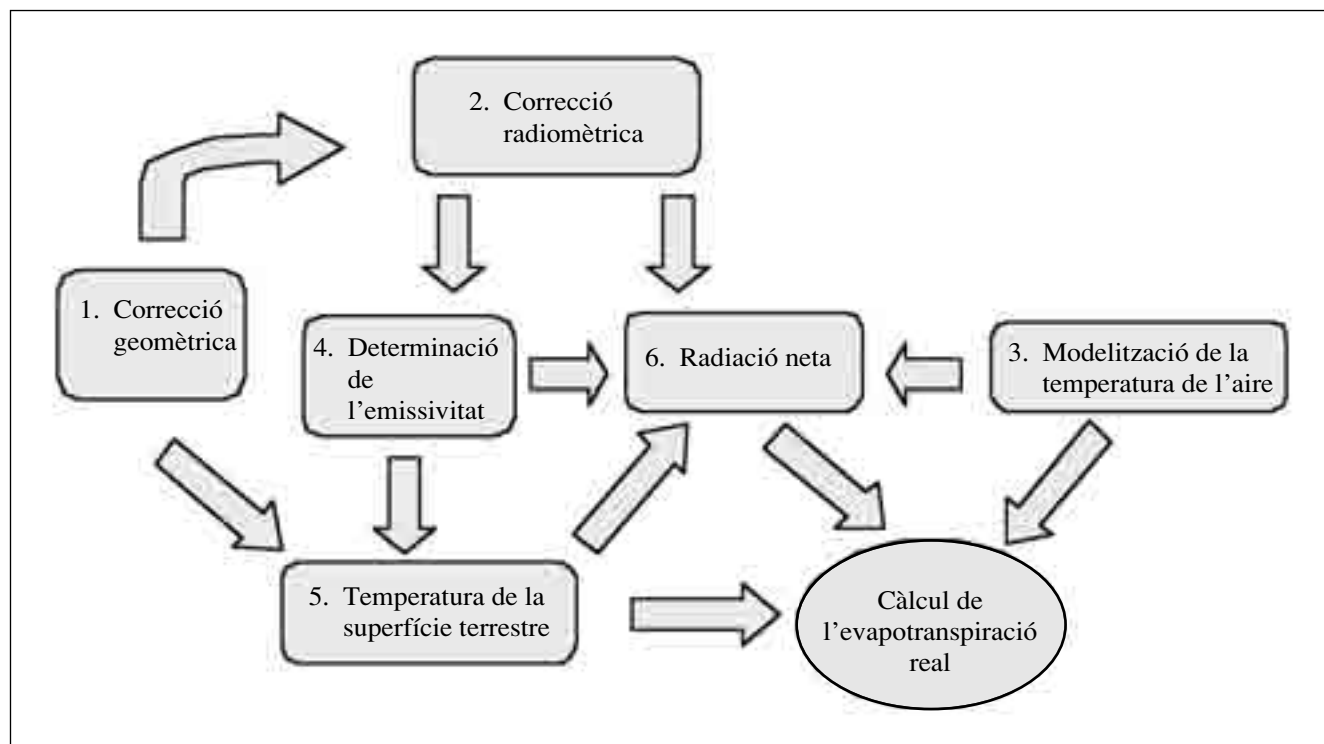
Landsat-7 EMT+ passa entre les 10.00 i les 11.00 hora solar local; ara bé, segons Lagouarde i Olioso (1995), la temperatura de la superfície terrestre captada per un sensor entre les 10.00 i les 11.00, o bé entre les 13.00 i les 14.00, és igualment útil per estimar l'ETR en dies clars.

En la figura 1, es pot observar el diagrama de flux de la metodologia emprada en el càlcul de les variables implicades en la modelització de l'ETR (eq. 1 i 2). El càlcul d'aquestes variables s'ha dut a terme mitjançant les metodologies següents:

1. *Correcció geomètrica*: Les imatges s'han corregit amb una resolució espacial de 15 metres pel canal pancromàtic, 30 metres pels canals multiespectrals i 60 metres pel canal tèrmic seguint la metodologia proposada per Palà i Pons (1995).

2. *Correcció radiomètrica (canals no tèrmics)*: La correcció radiomètrica s'ha dut a terme mitjançant el mètode proposat per Pons i Solé (1994). L'objectiu d'aquest mètode és reduir la presència d'artefactes no desitjats provocats pels efectes de l'atmosfera o de la il·luminació diferencial provocada per l'hora del dia, el dia de l'any, la posició de la Terra i el relleu (zones més o menys il·luminades, ombres projectades, etc). La conversió de DN a radiàncies s'ha realitzat mitjançant la lectura de les dades incloses en la capçalera de cada imatge, tot i que en el cas del

Figura 1. Diagrama de flux de la metodologia per al càlcul de l'ETR diària.



format original de les imatges (format CEOS) s'ha de tenir en compte la lectura d'aquests paràmetres (CRISTÓBAL *et al.*, 2003).

3. *Temperatura de l'aire*: S'ha calculat mitjançant tècniques de regressió múltiple i d'interpolació espacial de les dades provinents de les estacions meteorològiques a l'hora de pas del satèl·lit, segons la metodologia proposada per Ninyerola *et al.*, (2000) i Pla (2001). Aquesta metodologia ha estat aplicada en l'elaboració de mapes climàtics mensuals i també ha mostrat la seva utilitat en l'obtenció de la temperatura de l'aire en una franja horària d'un dia en concret. Aquest mètode està basat en la regressió múltiple, en el qual la temperatura de l'aire a l'hora exacta de pas del satèl·lit, estimada mitjançant una mitjana ponderada de les temperatures entre les 10.00 i 11.00 hora solar local, s'ha pres com a variable dependent i, l'altitud, la continentalitat, la latitud i la radiació solar potencial com a variables independents. Mitjançant la validació dels mapes (amb dades independents) s'han obtingut uns resultats operatius amb uns coeficients de determinació (r^2) entre 0,67 i 0,96, encara que els resultats en la majoria de les dates varien entre 0,70 i 0,82. Aquests resultats fan possible el càlcul de l'ETR en zones extenses.

4. *Emissivitat de la superfície*: Per a la determinació de l'emissivitat del sòl i la vegetació s'ha seguit el mètode proposat per Valor *et al.* (1996) i Sobrino *et al.* (2000). Aquest mètode proposa calcular els valors d'emissivitat d'una superfície a partir de la relació existent entre l'índex NDVI i l'emissivitat de les superfícies (RUBIO *et al.*, 1997), i els valors d'emissivitat obtinguts al laboratori i/o al camp.

5. *Temperatura de la superfície terrestre*: Donada l'absència de perfils atmosfèrics a l'hora de pas del satèl·lit per efectuar la correcció atmosfèrica, s'ha dut a terme la correcció per emissivitats de la banda tèrmica del Landsat-

7 ETM+ pel mètode proposat per Badenes i Caselles (1992), Hurtado *et al.* (1996) i Valor *et al.* (2000).

6. *Radiació neta*: Per al càlcul de la radiació neta instantània s'ha usat l'equació del balanç radiatiu a partir de les dades de l'albedo de la superfície (calculat sobre la base del mètode proposat per Dubayah (1992) mitjançant la suma ponderada dels canals del visible, infraroig proper i infraroig mitjà, canals 1, 2, 3, 4, 5, i 7 del Landsat-7 ETM+, la radiació solar global instantània calculada segons Pons (1996), la temperatura de l'aire, la temperatura de la superfície terrestre, l'emissivitat de l'aire i l'emissivitat de la superfície terrestre. Per a la conversió dels valors instantanis de radiació neta (Rn_i) a valors diaris (Rn_d), s'ha seguit la relació proposada per Seguin i Itier (1983) on:

$$Rn_d/Rn_i = 0,30 \pm 0,03$$

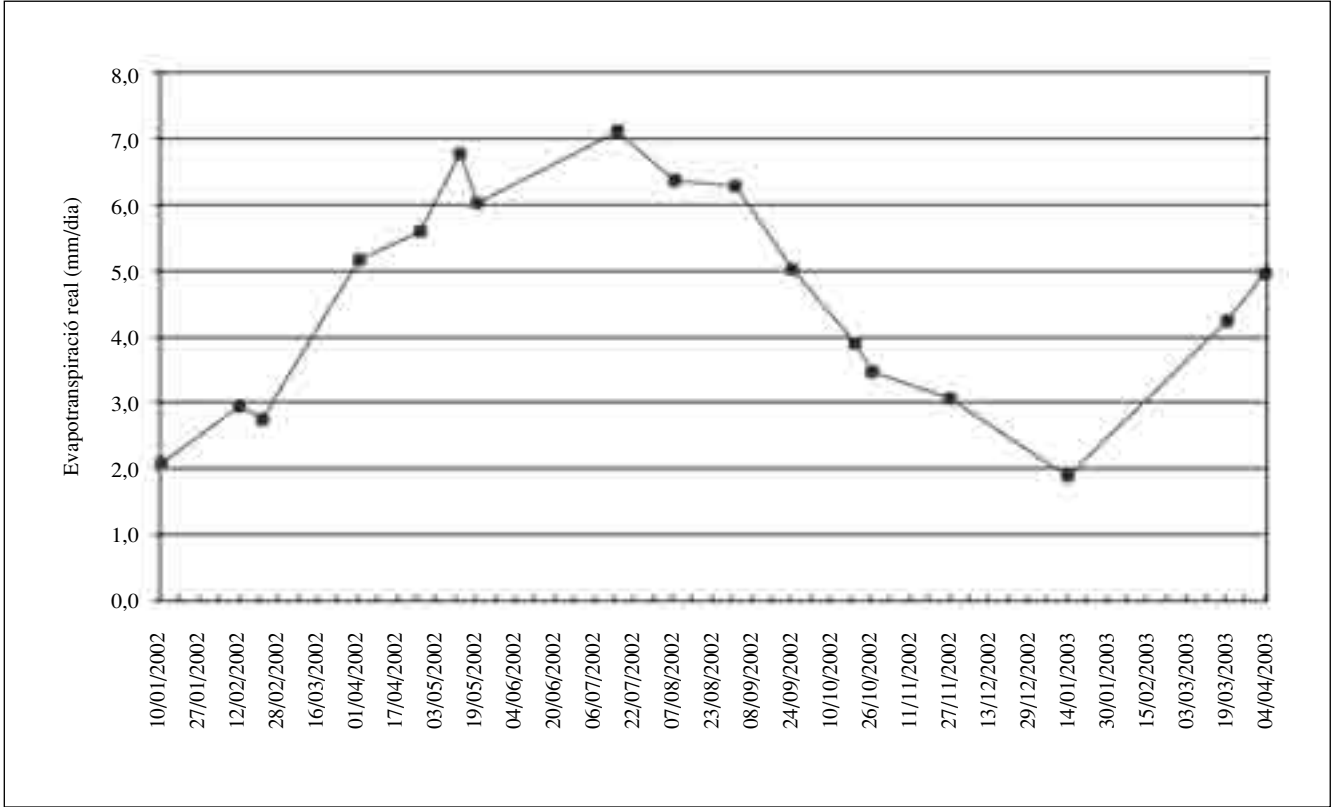
En la cartografia resultant s'han emmascarat les àrees urbanes i les masses d'aigua, atès que la metodologia exposada no calcula l'ETR_d en aquestes zones.

Resultats

Com s'observa en la taula 1 i en la figura 2, la mitjana de l'ETR augmenta des de les dates hivernals i es dona un màxim a principi d'estiu i decreix durant les dates de tardor. S'observa també que la mitjana dels valors d'ETR en dates de diferents anys (11/01/2002, 01/04/2002, 14/01/2003 i 04/04/2003) presenten valors similars.

Els valors màxims d'ETR per a cadascuna de les dates corresponen sempre a zones de vegetació natural i els valors mínims corresponen a zones amb vegetació escassa o nul·la. Encara que els valors màxims d'ETR presenten valors molt elevats en la majoria de les dates, el 95% dels pí-

Figura 2. Evolució de l'evapotranspiració real a la conca del riu Foix des de gener del 2002 fins a març del 2003.



xels estan sempre per sota d'aquests valors. La presència d'aquests valors màxims es pot atribuir a l'error del model en si i a la propagació d'errors en el càlcul de cadascuna de la variables que integren el model.

A causa de la manca de correcció atmosfèrica del canal tèrmic del Landsat-7 ETM+, del possible error introduït en el càlcul d'altres variables implicades en el mètode i del fet de no disposar de dades de camp per verificar el model, s'assumeix que el model presenta un error de $\pm 1 \text{ mm-dia}^{-1}$, segons Seguí i Itier (1983).

En les figures 3 i 4, es pot veure l'evolució de l'ETR durant el període 2002 per a l'àrea d'estudi.

Conclusions

La complexitat de la metodologia exposada per al càlcul de l'evapotranspiració fa que els resultats s'hagin de prendre com a preliminars. Tot i que el mètode es pot millorar determinant amb major exactitud cadascun dels seus components, els resultats obtinguts es poden considerar correctes a una escala regional. Malgrat no poder verificar les dades quantitativament en termes absoluts, creiem que el mètode ha donat uns resultats aparentment operatius en termes relatius.

El fet de poder comptar amb una sèrie llarga d'imatges repartida al llarg de l'any ha permès observar les limitacions que presenta el mètode per estimar els diferents paràmetres implicats en el càlcul de l'evapotranspiració real.

Línies futures de recerca

El càlcul diari de l'ETR permetrà estimar l'ETR mensual i anual mitjançant l'anàlisi combinada de l'ETR_d i la mode-

Taula 1. Estadístics de l'evapotranspiració real (mm-dia^{-1}) per a cada una de les dates de l'àrea d'estudi. Des. Est.: Desviació estàndard; Mín: Mínim; Màx: Màxim.

Data	Mitjana	Des. Est.	Mín.	Màx.
11/01/2002	2,1	0,7	0,0	6,1
12/02/2002	3,0	0,9	0,0	7,5
21/02/2002	2,7	1,0	0,0	7,6
01/04/2002	5,2	1,3	0,0	9,7
26/04/2002	5,6	1,3	0,2	10,1
12/05/2002	6,8	1,1	0,3	11,1
19/05/2002	6,0	1,5	0,0	10,4
15/07/2002	7,1	1,2	1,3	12,2
07/08/2002	6,4	1,2	0,2	10,8
01/09/2002	6,3	1,0	0,3	10,6
24/09/2002	5,0	1,0	0,0	9,0
19/10/2002	3,9	0,8	0,0	7,8
26/10/2002	3,5	0,9	0,1	8,6
27/11/2002	3,1	0,8	0,1	7,5
14/01/2003	1,9	0,8	0,0	6,2
19/03/2003	4,2	1,4	0,0	9,1
04/04/2003	4,9	1,4	0,0	9,6

lització amb els SIG de l'evapotranspiració de referència. Aquesta anàlisi permetrà establir el dèficit hídric mensual i anual de la conca del Foix; el que serà molt útil, en èpoques de sequera, per a la gestió dels incendis forestals i de l'estrès vegetal en zones d'especial interès com són els parcs naturals.

Amb l'anàlisi temporal de les dades es podran desenvolupar models de previsió d'ETR per poder actuar i millorar la gestió de les zones potencialment susceptibles a patir fenòmens d'estrès vegetal.

Figura 3. Evolució de l'ETR durant el període 2002.

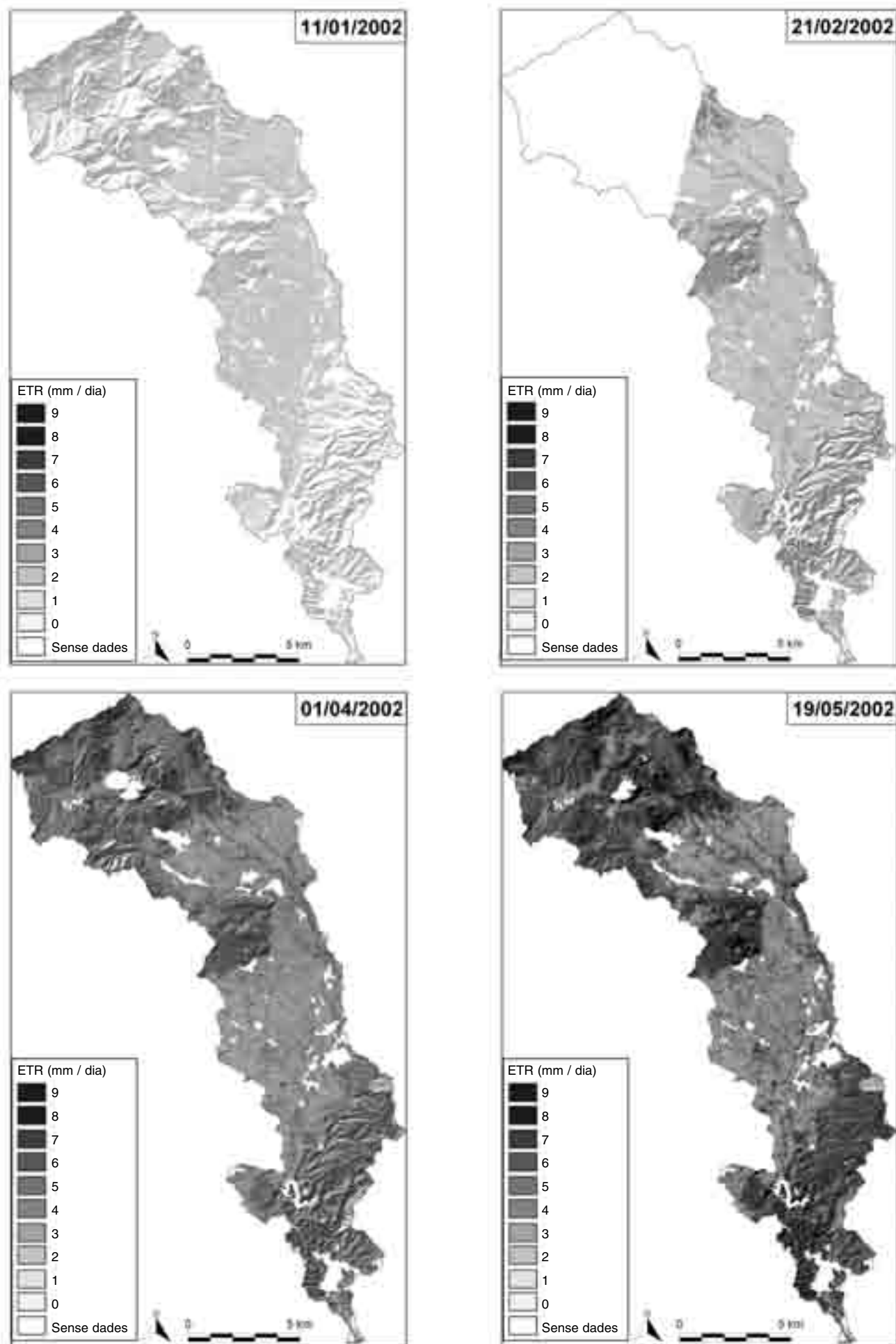
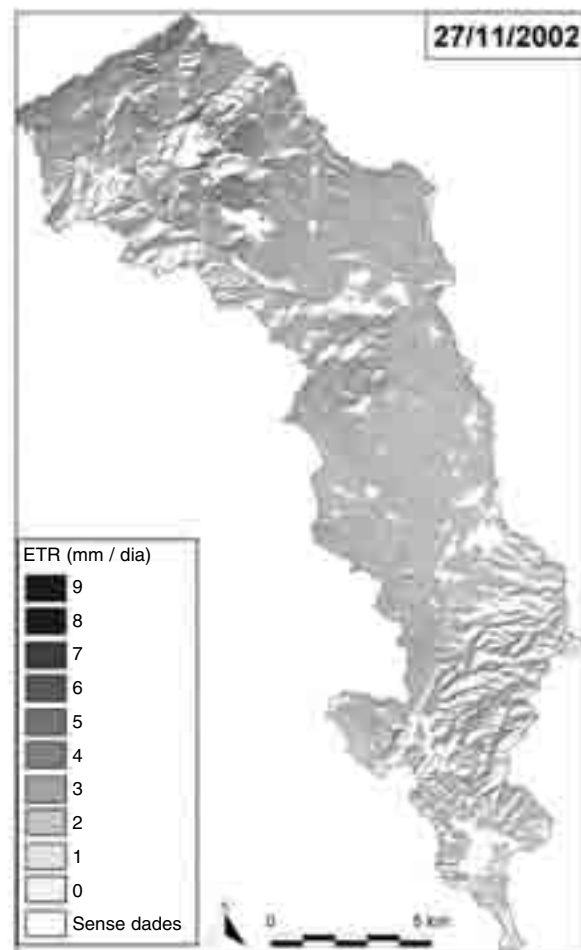
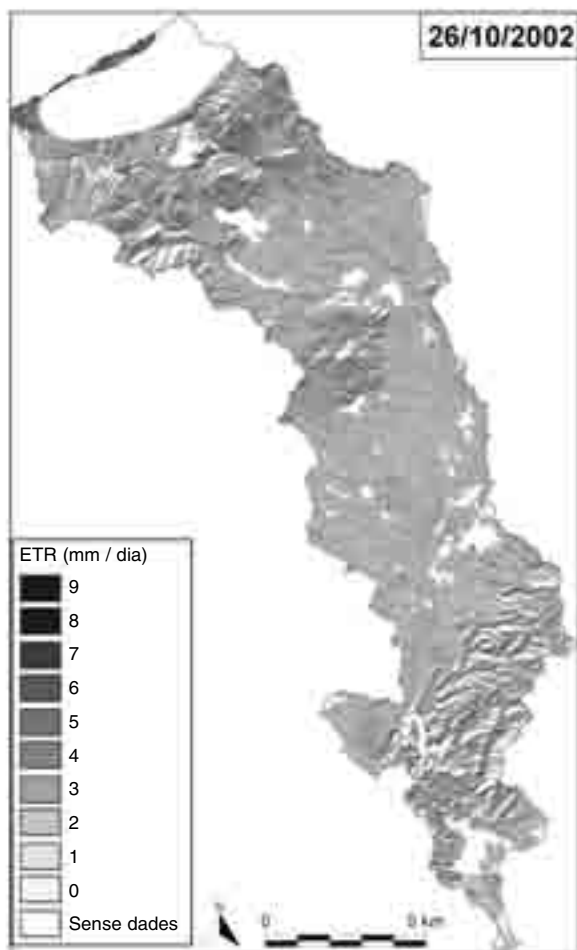
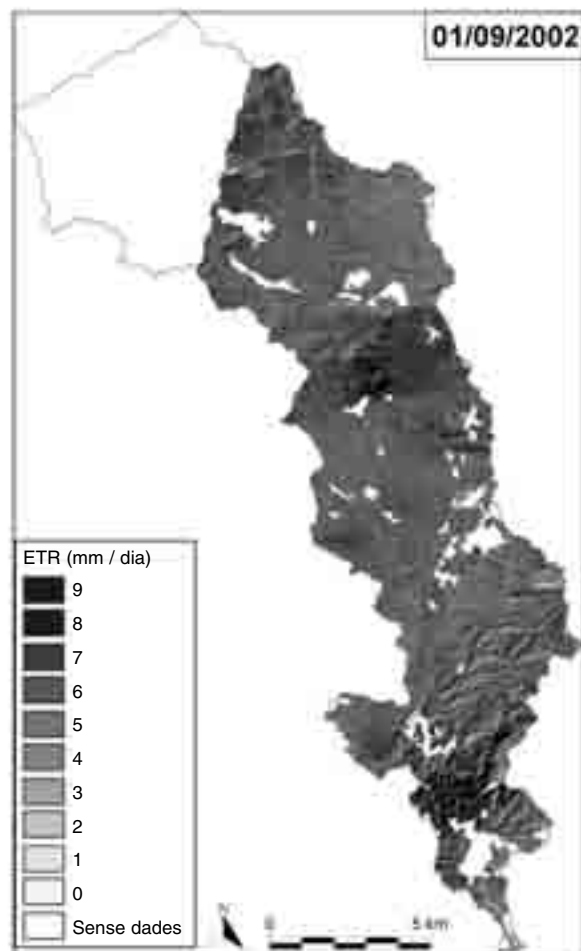
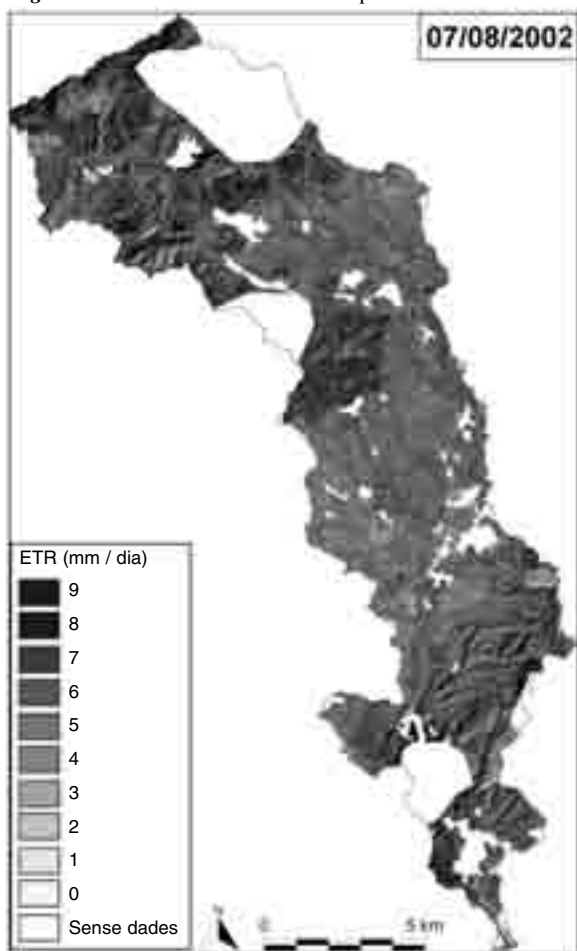


Figura 4. Evolució de l'ETR durant el període 2002.



Agraïments

Els autors volen agrair a l'Agència Catalana de l'Aigua i al Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya els recursos materials proporcionats per a l'adquisició i processament de les imatges.

Bibliografia

- BADENAS, C.; CASELLES, V. (1992). «A simple technique for estimating surface temperature by means of a thermal infrared thermometer». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13. Pàg. 2.951-2.956.
- BEGON, M.; HARPER, J. L.; TOWNSEND, C. R. (1988). *Ecología. Individuos, poblaciones y comunidades*. Barcelona: Ediciones Omega.
- CASELLES, V.; SOBRINO, J.A. (1989). «Determination of frosts in oranges groves from NOAA-9 AVHRR data». *Remote Sensing of Environment*. Vol. 29, pàg. 135-46.
- CRISTÓBAL, J.; PONS, X.; SERRA, P. (2003). «Sobre el uso operativo de Landsat-7 ETM+ en Europa. X Congreso de Teledetección». X Congreso Nacional de Teledetección. Càceres 17, 18 i 19 de setembre del 2003.
- DUBAYAH, R. (1992). «Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data». *Water resources research*. Vol. 28, pàg. 2.469-2.484.
- HURTADO, E.; VIDAL, A.; CASELLES, V. (1996). «Comparison of two atmospheric correction methods for Landsat TM thermal band». *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 17, pàg. 237-247.
- KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. (1996). «Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces». *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*. Vol. 41, pàg. 495-516.
- LAGOUARDE, J.P.; OLIOSO, A. (1995). «Interest of mid-morning acquisition of surface temperature for deriving surface fluxes». *Remote Sensing Reviews*. Vol. 12, pàg. 287-309.
- MCKENNEY, M.; ROSENBERG, N.J. (1993). «Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change». *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 64, pàg. 81-110.
- NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J.M. (2000). «A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques». *International Journal of Climatology*. Vol. 20, pàg. 1.823-1.841.
- PALÀ, V.; PONS, X. (1995). «Incorporation of relief into geometric corrections based on polynomials». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 61, pàg. 935-944.
- PLA, M. (2001). «Modelització climatològica de la temperatura i la precipitació a les Illes Balears (mar Mediterràni)». IEEC (ed.), Màster en Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica 2000/2001. Barcelona.
- PONS, X. (1996). «Estimación de la radiación solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica». J. Juaristi; I. Moro. *Modelos y Sistemas de Información en Geografía*. Pàg. 87-97.
- PONS, X.; SOLÉ-SUGRAÑES, L. (1994). «A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data». *Remote Sensing of Environment*. Vol. 47, pàg. 1-14.
- QUATTROCCHI, D.A.; LUVAL, J.C. (2000). *Thermal remote sensing in land surface processes*. CRC Press.
- RUBIO, E.; CASELLES, V.; BADENAS, C. (1997). «Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 µm wave band: analysis of two field methods». *Remote Sensing of Environment*. Vol. 59, pàg. 490-521.
- SEGUÍN, B.; ITIER, B. (1983). «Using midday surface temperature to estimate daily evapotranspiration from satellite IR data». *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 4, pàg. 371-383.
- SOBRINO, J.A.; RAISSOUNI, N.; KERR, Y.; OLIOSO, A.; LÓPEZ-GARCÍA, M.J.; BELAID, A.; EL KHARRAZ, M.H.; CUENCA, J.; DEMPÈRE, L. (2000). *Teledetección*. J.A. Sobrino (ed.). València: Servei de Publicacions, Universitat de València. ISBN: 84-370-4220-8.
- VALOR, E.; CASELLES, V. (1996). «Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas». *Remote Sensing of Environment*. Vol. 57, pàg. 167-184.
- VALOR, E.; CASELLES, V.; COLL, C.; SÁNCHEZ, F.; RUBIO, E.; SOSPEDRA, F. (2000). «Simulation of a medium-scale-surface-temperature instrument from Thematic Mapper data». *International Journal of Remote Sensing*, 21(16): 3.153-3.159.
- VIDAL, A.; PERRIER, A. (1989). «Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite thermal IR data». *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 10, pàg. 1.327-1.337.