Tethys, 5, 37–47, 2008
Revista del temps i el clima de la Mediterrània occidental
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2008.5.04

Revista editada per **ACAM**
(Associació Catalana de Meteorologia)

Fusió de les imatges Landsat i micrometeorològiques per a fer un seguiment de l'evapotranspiració diària a escala regional

J. M. Sánchez[1], **V. Caselles**[1] **i G. Scavone**[2]

[1]Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, C/ Dr. Moliner, 50, 46100 Burjassot, València
[2]Departament d'Enginyeria i Física Mediambiental, Università di Basilicata, Via N. Sauro 85, 85100 Potenza, Italia

Rebut: 9-I-2008 – Acceptat: 15-IX-2008 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: Juan.M.Sanchez@uv.es

Resum

L'objectiu d'aquest treball és mostrar l'aplicabilitat operativa d'un model proposat recentment (Sánchez et al., 2008) juntament amb imatges de satèl·lit per tal de fer un seguiment dels fluxos d'energia de la superfície a escala regional. En concret, ens centrarem en l'obtenció de l'evapotranspiració diària per la significació especial que té aquest flux en la generació de precipitació o en la gestió de les fonts d'aigua d'ús agrícola. Hi presentem una metodologia detallada per a aplicar el Mètode de Balanç Energètic de Dues Fonts Simplificat a les imatges Landsat. Els diferents trets de la superfície de les terres de conreu venen caracteritzats pels mapes del projecte CORINE Land Cover i les variables meteorològiques necessàries s'obtenen interpolant les dades d'una xarxa d'estacions agrometeorològiques distribuïdes per la regió d'interès. Finalment, mostrem l'aplicació de la metodologia a tres diferents imatges Landsat que cobreixen tota la regió de Basilicata (al sud d'Itàlia). Es realitzen mapes dels diferents fluxos incloent l'evapotranspiració diària. Es comparen els resultats amb algunes mesures en superfície i es fa una anàlisi agafant la classificació d'ús del sòl com a base. S'obté una precisió propera a 30 W m^{-2}.

Paraules clau: evapotranspiració, Landsat, Basilicata

1 Introducció

L'evapotranspiració, LE, es pot obtenir a escala local amb una precisió superior a 20% amb aproximacions ben conegudes com l'equació Penman-Monteith (PM) o el mètode Priestley-Taylor (PT) (Allen et al., 1998). Es necessiten mesures precises de la temperatura de l'aire i de la pressió de vapor com a entrades en l'equació Penman-Monteith i s'han de determinar els valors adequats de la constant Priestley-Taylor quan s'apliqui aquest mètode a cada àrea. Per tant, aquests models no es poden aplicar a una escala regional tret que tinguem una xarxa densa d'estacions de mesures del sòl. A més, la majoria són models de difícil aplicació ja que necessiten massa mesures o estimacions de paràmetres. Una manera atractiva de resoldre aquest problema seria utilitzant mesures de la superfície obtingudes per teledetecció. La teledetecció ens permet tenir informació de moltes variables de la superfície amb una cobertura global, després d'un tractament i una interpretació adequats de les dades registrades per un instrument a bord d'un satèl·lit. L'extensió coberta per una imatge de teledetecció i les seves resolucions espacials i temporals depenen del sensor triat. Hi ha sensors amb una resolució espacial alta però amb una resolució temporal baixa, com el Landsat (resolució espacial de 30 m en el visible i 60 - 120 en l'infraroig tèrmic, i una resolució temporal de 16 dies) o l'ASTER (resolució espacial de 15 m en el visible i de 90 m en les bandes tèrmiques i una freqüència d'uns 8 dies) i n'hi ha d'altres amb una freqüència de passada més alta però amb una resolució espacial baixa, com el MODIS (resolució espacial de 250 - 500 m en el visible i 1 km en les bandes tèrmiques, i una freqüència diària), l'AVHRR (resolució espacial d'1.1 km i una freqüència diària) o l'AATSR (resolució espacial d'1 km i una freqüència de 2 - 6 dies). Un dels objectius de la teledetecció és subministrar-nos dades de zones gairebé inaccessibles. Això inclou algunes re-

2008 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

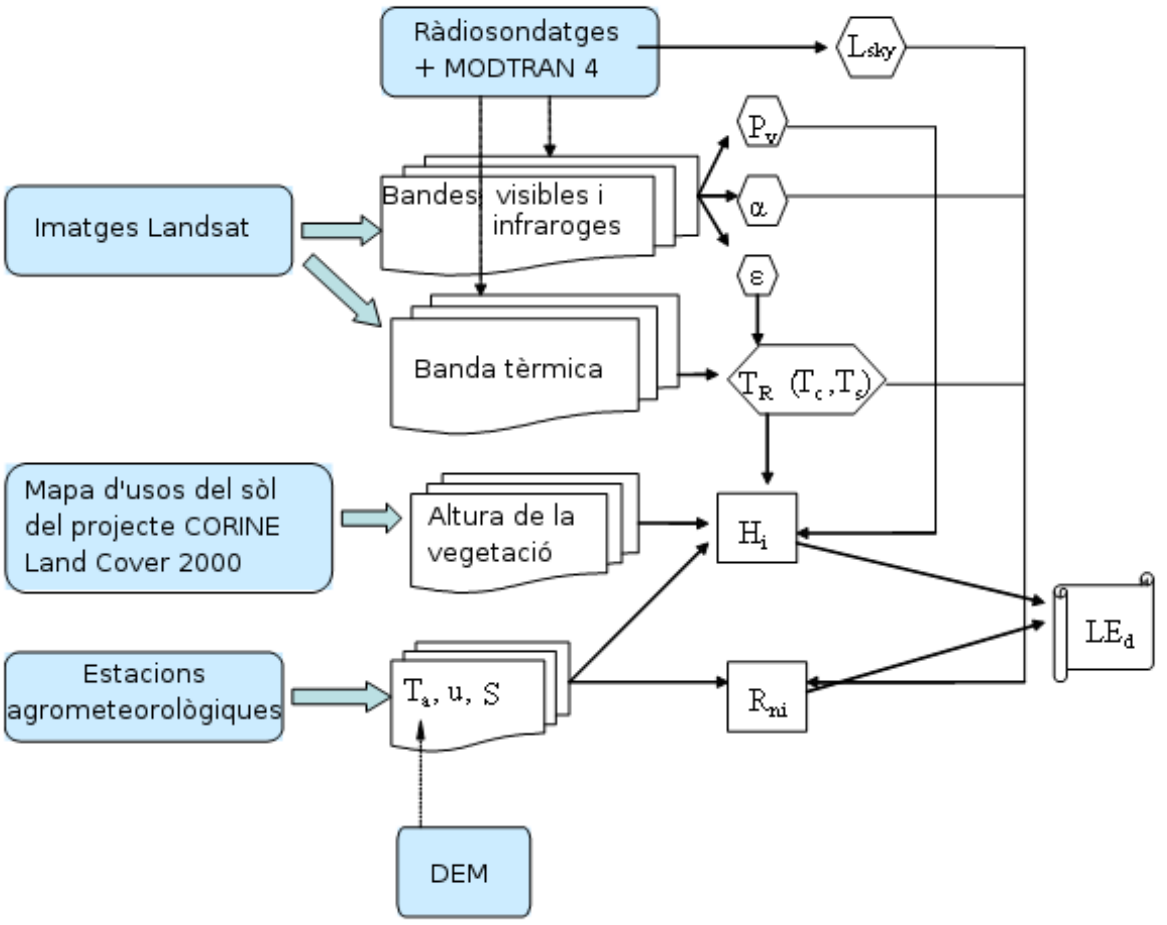

Figura 1. Esquema de la metodologia proposada per a extraure l'evapotranspiració diària real a escala regional.

gions com, per exemple, les zones boscoses on l'obtenció de l'evapotranspiració és més difícil a causa de les evidents limitacions dels experiments.

L'ús de les tècniques de teledetecció compensa la freqüent manca de variables mesurades al terra i els paràmetres necessaris per a aplicar els models micrometeorològics a escala regional. La simulació d'evapotranspiració és molt sensible a les característiques i condicions de la superfície. Per aquesta raó, un model regional ha d'explicar la variabilitat de la superfície. En aquest context, la teledetecció per satèl·lit s'ha convertit en una eina bàsica ja que, com hem dit abans, ens permet fer el seguiment regular de zones extenses. Es poden extreure diferents variables i paràmetres de la superfície amb la combinació de la informació multiespectral continguda en una imatge de satèl·lit, i amb un detall depenent de la resolució espacial del sensor utilitzat.

En aquest treball, mostrem l'aplicació del model proposat Simplificat de Balanç Energètic de Dues Fonts (STSEB, segons les sigles angleses) (Sánchez et al., 2008) a la regió de Basilicata, al sud d'Itàlia. Es tracta d'una zona difícil ja que cobreix una extensa àrea amb una gran varietat d'usos del sòl. Els diferents trets de la superfície estaven caracteritzats a través dels mapes d'ús del sòl del projecte CORINE Land Cover (Büttner et al., 2002), i les variables meteorològiques necessàries es van obtenir interpolant les dades d'unes quaranta estacions agrometeorològiques distribuïdes per la regió. A més, per tal de corregir les dades de satèl·lit, es van utilitzar perfils atmosfèrics dels ràdiosondatges en el model de transferència radiativa MODTRAN 4.0. Per a aquest treball, es van seleccionar tres imatges de satèl·lit, dues del sensor 7 ETM del Landsat (ETM+) (26 de setembre de 1999 i 14 de juny de 2002), i una del sensor 5 TM del Landsat (TM) (26 de maig de 2004).

L'objectiu principal d'aquest estudi és la unió d'un model micrometeorològic i les tècniques de teledetecció. El resultat d'aquesta combinació és una metodologia operativa per a extraure l'evapotranspiració diària a escala regional de la teledetecció i de les dades meteorològiques locals. En aquest treball ens centrem en l'aplicació d'aquesta metodologia a les imatges Landsat i a una regió d'Itàlia en especial, però es podria estendre a altres sensors d'alta resolució, i el que és més interessant, a altres regions del món.

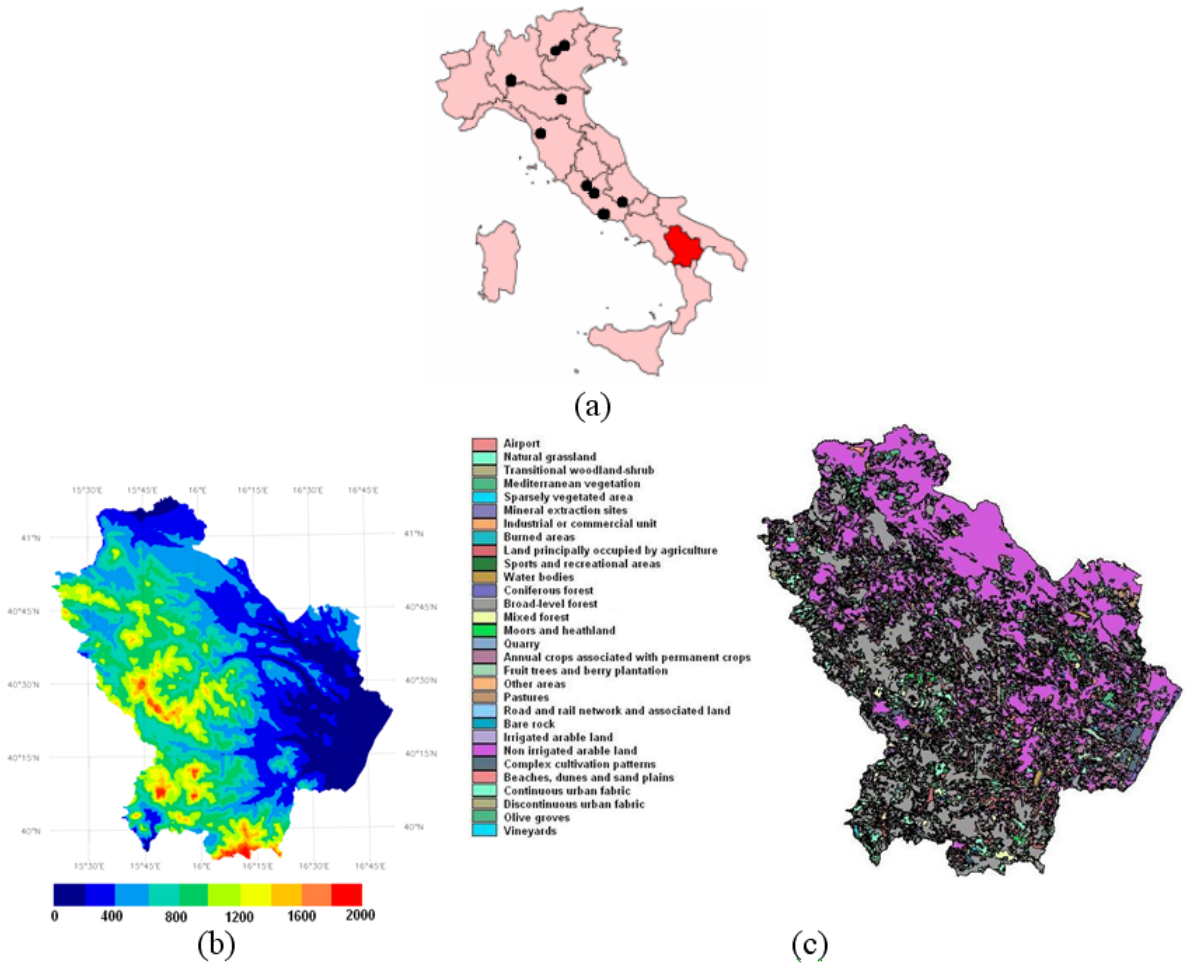

Figura 2. (a) Localització de la regió de Basilicata. Els punts negres indiquen la localització exacta dels diferents emplaçaments italians de CarboEurope. (b) Model d'elevació digital (m) de la regió de Basilicata. (c) Mapa d'ús del sòl de la regió de Basilicata (projecte CORINE Land Cover 2000).

2 Metodologia per a fer una estimació de l'evapotranspiració diària utilitzant la teledetecció de satèl·lit

Normalment la informació de l'evapotranspiració a escala diària és més interessant i útil que els valors instantanis en un moment concret del dia. Tanmateix, quan es fan servir satèl·lits d'alta resolució espacial, només s'aconsegueix una imatge al dia o fins i tot menys. Itier i Riou (1982) van desenvolupar un procediment senzill per a calcular els valors diaris de l'evapotranspiració a partir dels valors del flux en un moment concret del dia. Segons Itier i Riou (1982):

$$\frac{H_d}{R_{nd}} = \frac{H_i}{R_{ni}} \tag{1}$$

on H és el flux de calor sensible, R_n és el flux de radiació neta i els subíndexs i i d fan referència als fluxos instantanis i diaris, respectivament. L'Equació 1 implica que el quocient Bowen $\beta = H/LE$ és més o menys constant durant el dia. Això no és del tot cert ja que se sap que β varia, especialment de nit. Tanmateix, al voltant del migdia els errors resultants són menors i la majoria de les passades dels satèl·lits tenen lloc en aquest moment del dia. Sánchez et al. (2007) van posar a prova l'Equació 1 i van observar un bon acord en un interval de 7 hores al voltant del migdia.

A escala diària el flux de calor del sòl, G, es pot negligir a l'equació de balanç energètic ($R_n = H + LE + G$), i LE es pot obtenir a partir de l'Equació 1 i de l'equació del balanç energètic com:

$$LE_d = \frac{R_{nd}}{R_{ni}}(R_{ni} - H_i) \tag{2}$$

Utilitzant l'Equació 2, LE_d es pot obtenir a partir dels valors instantanis de R_n i H en un moment concret del dia, i de la contribució de la radiació neta relativa en aquell moment en què s'integra l'intercanvi radiant global, R_{nd}/R_{ni}.

El flux de calor sensible s'obté utilitzant el model descrit a Sánchez et al. (2008). En aquest estudi, el mètode per a avaluar la radiació neta es pot simplificar quan el sòl i els components de la vegetació no són necessaris ja que es pot

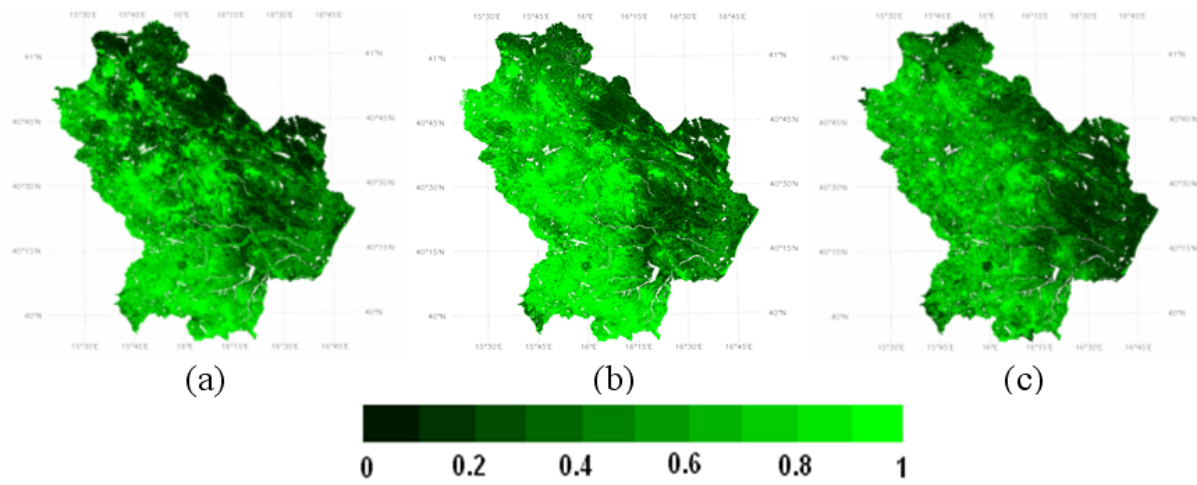

Figura 3. Mapes de coberta de la vegetació, P_v; (a) 09/26/1999, (b) 06/14/2002, (c) 05/26/2004.

obtenir utilitzant directament els valors efectius de la temperatura de superfície, T_R, l'albedo, α, i l'emissivitat, ε:

$$R_n = (1-\alpha)S + \varepsilon L_{sky} - \varepsilon\sigma T_R^4 \tag{3}$$

on S és la radiació solar global, i σ és la constant Stefan-Boltzmann.

A la Figura 1 es mostra un esquema de la metodologia proposada en aquest treball.

2.1 Temperatura de la superfície i emissivitat

Els sensors TM i ETM+ del Landsat tenen una sola banda tèrmica amb un interval espectral de 10.4 - 12.5 μm i una longitud d'ona efectiva de 11.457 μm. Aquesta limitació no permet aplicar ni els mètodes de *split window* ni els mètodes de Separació Temperatura/Emissivitat (TES, segons les sigles angleses). Per tant, es va utilitzar un mètode de canal únic, basat en l'equació de transferència radiativa. La radiància de canal mesurada per control remot, R_i, consisteix en dues contribucions principals: (1) la radiació a nivell de superfície, atenuada per l'absorció de l'atmosfera entre la superfície i l'instrument, caracteritzada per la transmitància atmosfèrica, τ_i, i (2) la radiació atmosfèrica emesa cap amunt per l'atmosfera en la direcció de visualització, $L^{\Uparrow}_{i\ atm}(\Theta)$, de manera que R_i, d'acord amb l'equació de transferència radiativa, s'escriu:

$$R_i = [\varepsilon_i B_i(T_R) + [1-\varepsilon_i]L^{\Downarrow}_{i\ atm\ hem}]\tau_i + L^{\Uparrow}_{i\ atm} \tag{4}$$

on $B_i(T_R)$ és la funció de Planck per a una temperatura T_R, ε_i és l'emissivitat de la superfície i $L^{\Downarrow}_{i\ atm\ hem}$ és la irradiància atmosfèrica hemisfèrica cap a baix dividida per π (assumint reflexió lambertiana). Es van introduir les dades del ràdiosondatge en el codi MODTRAN 4.0 per a aconseguir estimacions de τ_i, $L^{\Uparrow}_{i\ atm}(\Theta)$ i $L^{\Downarrow}_{i\ atm\ hem}$. Tot i que l'Equació 4 depèn de l'angle d'observació (Θ), la visió del nadir aporta bons resultats per als sensors TM i ETM+ del Landsat. Es va utilitzar una equació senzilla i operativa proposada per Valor i Caselles (1996) per a avaluar l'emissivitat de la superfície a partir del coneixement de la coberta de vegetació, P_v, i les emissivitats dels components del sòl i de la vegetació, ε_s i ε_c, respectivament. Els valors d'emissivitat típics es poden assumir per a ε_c (0.985) i ε_s (0.960) (Rubio et al., 2003). Evidentment, els errors en l'Equació 5 es reduirien si es disposés de mesures especials de ε_c i ε_s *in situ*.

$$\varepsilon = \varepsilon_c P_v + \varepsilon_s(1-P_v)(1-1.74P_v) + 1.7372P_v(1-P_v) \tag{5}$$

2.2 Coberta de vegetació

Les bandes 3 (0.63 - 0.69 μm) i 4 (0.76 - 0.90 μm) dels TM i ETM+ es van utilitzar per a avaluar l'índex de vegetació NDVI (segons les sigles angleses d'Índex Diferencial de Vegetació Normalitzat). Prèviament, s'havien corregit els efectes atmosfèrics de les bandes visibles i de l'infraroig proper utilitzant les dades de ràdiosondatge i el codi MODTRAN 4.0. A tal efecte, la reflectivitat de canal a nivell de superfície, ρ_i, es calcula amb l'equació següent:

$$\rho_i = \frac{\pi(r_i - L^{\Uparrow}_{i\ atm})d^2}{\tau_i(ESUN_i \cos\alpha\tau(\alpha) + L^{\Downarrow}_{i\ atm\ hem})} \tag{6}$$

on $\tau(\alpha)$ és la transmitància atmosfèrica entre el Sol i la superfície, α és l'angle solar zenital, $ESUN_i$ és la irradiància solar espectral a la part superior de l'atmosfera i d és la distància Terra-Sol.

El contrast espectral entre les bandes roges i infraroges, 3 i 4, respectivament, ens permet fer una discriminació entre píxels de diferent composició vegetal a través de l'esmentat NDVI:

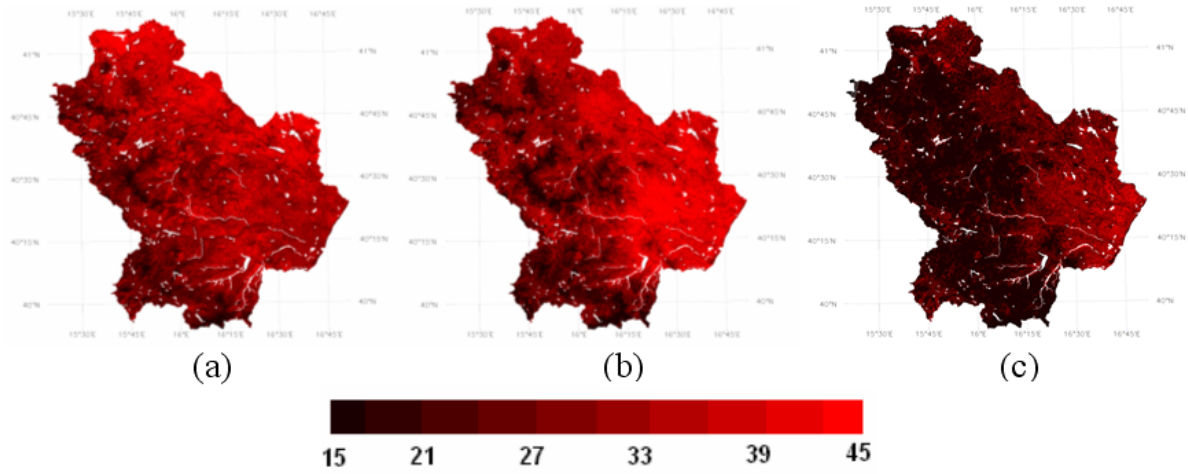

Figura 4. Mapes de temperatura de la superfície de la terra, T_R (°C); (a) 09/26/1999, (b) 06/14/2002, (c) 05/26/2004.

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \tag{7}$$

La coberta vegetal es va obtenir a través de l'expressió (Valor i Caselles, 1996):

$$P_v = \frac{1 - \dfrac{NDVI}{NDVI_s}}{1 - \dfrac{NDVI}{NDVI_s} - K\left(1 - \dfrac{NDVI}{NDVI_v}\right)} \tag{8}$$

on el coeficient K s'obté a través de:

$$K = \frac{R_{NIR_v} - R_{RED_v}}{R_{NIR_s} - R_{RED_s}} \tag{9}$$

on R_{NIR} és la reflectivitat de l'infraroig proper i R_{RED} és la reflectivitat en el roig. Els subíndexs v i s corresponen a àrees completament vegetades i desvegetades, respectivament, seleccionades mirant el contrast espectral entre les bandes 3 - 5. Aquestes àrees seleccionades també es van fer servir per a avaluar T_c i T_s, requerides al model STSEB (Sánchez et al., 2008), a partir dels mapes generats de temperatura de la superfície de la terra.

2.3 Albedo

Alguns autors com Dubayah (1992) van dividir la regió espectral de 0.3 a 3.0 μm en 10 bandes espectrals per tal d'avaluar l'albedo de la superfície. Cada banda té un pes integrant diferent segons el patró típic de reflectància espectral de la vegetació. En aquest estudi, s'integra l'albedo de superfície utilitzant l'equació (Dubayah, 1992):

$$\alpha = 0.221\rho_1 + 0.162\rho_2 + 0.102\rho_3 + 0.354\rho_4 + 0.059\rho_5 + 0.0195\rho_7 \tag{10}$$

on ρ_i és la reflectivitat corregida per a la banda i del TM o del ETM+. L'error mitjà de la radiació neta calculada de superfície, utilitzant l'Equació 10 per a avaluar l'albedo, és al voltant del 2% quan es compara amb les mesures de camp (Dubayah, 1992).

2.4 Variables meteorològiques

Les dades meteorològiques auxiliars es requereixen per a completar el conjunt de variables i paràmetres implicats en l'esquema d'equacions abans mostrat. La temperatura de l'aire, T_a, és necessària en l'esquema STSEB (Sánchez et al., 2008) per a avaluar l'intercanvi de flux de calor sensible entre la superfície i la capa límit atmosfèrica. La velocitat de l'aire, u (m s^{-1}), es requereix en les expressions per a calcular les resistències aerodinàmiques i del sòl que participen en el model STSEB. La radiació solar global, S, i la radiació d'ona llarga incident, L_{sky}, es necessiten en el balanç de radiació neta (Equació 3). Totes aquestes variables, tret de L_{sky}, estan contínuament registrades en estacions agrometeorològiques típiques i, per tant, es poden crear mapes regionals interpolant les dades registrades en una xarxa d'estacions distribuïdes per la regió d'estudi. Pel que fa a L_{sky}, a causa de la seva coneguda homogeneïtat espacial a través d'una àrea relativament extensa, un sol valor d'aquesta variable es pot utilitzar per a cada imatge i es pot obtenir a partir de ràdiosondatges llançats. Cal remarcar que la informació addicional com la pressió de vapor (necessària en el mètode PM) o les condicions d'humitat del sòl (necessàries en el mètode PT per a avaluar la constant PT) ja no es necessita. En aquest estudi, es va utilitzar una tècnica geoestadística (mètode de krigeatge) per a interpolar les dades de la xarxa regional de les estacions agrometeorològiques i elaborar mapes de velocitat del vent i de radiació solar global. La tècnica de krigeatge modelitza la distribució espacial com

Taula 1. Valors mitjos de LE_d (W m^{-2}) per als principals usos del sòl.

Ús del sòl	L7-ETM+ (09/26/1999)	L7-ETM+ (06/14/2002)	L5-TM (05/26/2004)
Pastures	80	92	117
Herbassar	97	112	132
Arbres fruiters	106	140	123
Oliveres	94	117	117
Vinyes	92	129	120
Torbera i bruguerar	92	106	117
Zones poc vegetades	74	66	103
Terres llaurables	69	100	129
Terres ocupades principalment per agricultura	103	126	134
Conreus anuals	92	117	126
Patrons de cultiu complex	94	114	123
Boscos de coníferes	120	192	137
Boscos d'arbres de fulla ampla	114	149	120
Boscos mixtos	77	109	109
TOTA LA REGIÓ	92	120	123

una funció de dades observacionals a través d'una regió sense coneixements previs de la distribució de les seves causes físiques subjacents. Per tant, la principal limitació d'aquest mètode d'interpolació és la manca de robustesa en les variacions locals provocada per l'orografia del terreny. Un altre punt crític del procés de krigeatge és l'estimació de la funció de covariància espacial o variograma (Cressies, 1991). Es va tenir en consideració un Model d'Elevació Digital (DEM, segons les sigles angleses) i es va establir la relació entre la temperatura de l'aire i l'altitud per sobre del nivell del mar per tal d'obtenir mapes més fiables d'aquesta variable meteorològica. També es podrien utilitzar anàlisis de models meteorològics per a crear mapes regionals de les entrades que es necessiten. Tanmateix, les imprecisions en les estimacions a l'hora d'utilitzar un model seran més grans que les de mesures directes del sòl i podrien provocar errors inacceptables en les estimacions del flux.

3 Aplicació a Basilicata, regió del sud d'Itàlia

3.1 Descripció del lloc, mesures i imatges de satèl·lit

Situada al sud d'Itàlia, Basilicata és una regió de 9992 km^2 dividida en dues províncies: Potenza i Matera (Figura 2a). És una regió eminentment muntanyosa. De fet, les muntanyes ocupen el 47% del territori (zones per sobre de 700 m sobre el nivell del mar), els turons n'ocupen el 45% (zones d'entre 201 i 700 m sobre el nivell del mar) i les planes només el 8% (zones per sota de 200 m s.n.m.). La part muntanyosa de l'oest de la regió es distingeix de la zona costanera i de la zona central accidentada, que s'estén fins a l'àrida *Murgia* de Matera. La Figura 2b mostra el DEM, obtingut gràcies al MODIS, utilitzat en aquest estudi.

La gran varietat d'usos del sòl d'aquesta regió la fa adequada per a una anàlisi del rendiment del mètode en l'obtenció de l'evapotranspiració sota diferents condicions de superfície. Es va fer servir un mapa d'ús del sòl del projecte CORINE Land Cover (Figura 2c) per a caracteritzar la superfície amb valors nominals de l'altura de la vegetació per a cada ús del sòl.

Una xarxa de 38 estacions agrometeorològiques distribuïdes per la regió i dirigides per ALSIA (*Agenzia Lucana di Sviluppo ed Innovazione in Agricoltura* - Agència de Lucània per al Desenvolupament i la Innovació en Agricultura) estan equipades amb instrumentació per a mesures automàtiques i contínues de diversos paràmetres meteorològics, com la temperatura de l'aire, la humitat relativa, la radiació solar global, la temperatura del sòl, la velocitat i direcció del vent, les precipitacions i l'evapotranspiració potencial. La temperatura de l'aire es mesura amb les termoresistències PT100 amb una precisió de 0.1°C. La radiació solar es mesura amb piranòmetres que funcionen en l'interval de 0.3 - 2.5 μm amb una precisió del 2%. Els instruments utilitzats per a la prospecció del component horitzontal de la velocitat del vent són uns clàssics braços rotatoris, amb una precisió de 0.5 m s^{-1}.

Finalment, dos lisímetres de pesada situats en dos diferents emplaçaments de terra de conreu, Lavello (41°6'6"N, 15°50'55"E) i Policoro (40°10'15"N, 16°38'53"E), van registrar valors reals de LE_d. Aquests lisímetres de pesada consisteixen en un tanc de cultiu ple, amb una àrea de 2 m x 2 m i una profunditat de 1.30 m, aïllat amb una estructura externa. El consum d'aigua i l'evapotranspiració diària s'obtenen directament de la diferència de pes entre les dues lectures posteriors. La resolució d'aquest sistema és d'uns 0.06 mm. La Granja Experimental de Demostració de Gaudiano - Lavello ens va proporcionar dades del lisímetre *in situ*, recollides per la *Universitàdi Basilicata*, corresponents al 26 de setembre de 1999 i al 14 de juny de 2002, en un cultiu d'albergínies i tomàquets, respectivament. Les dades

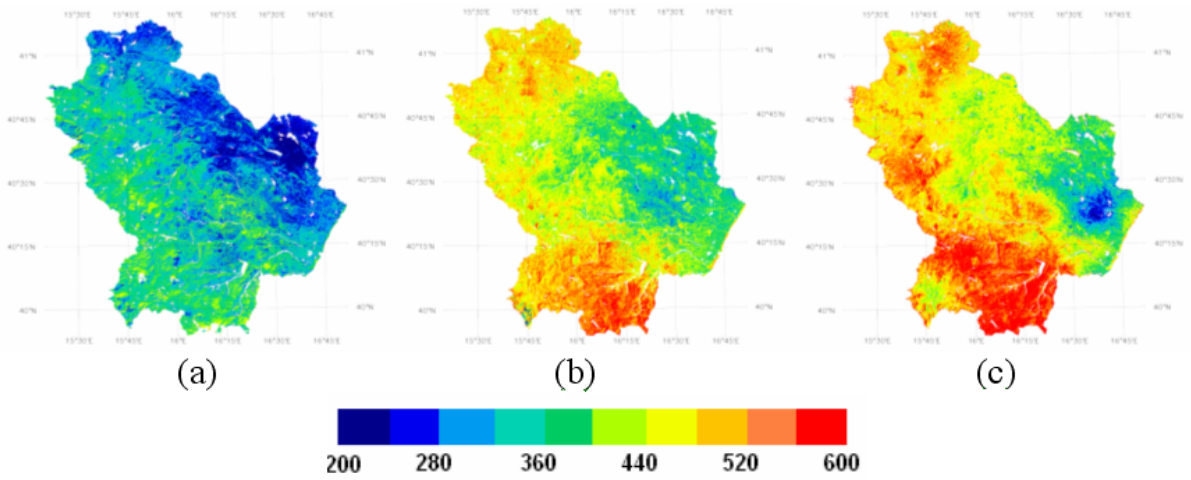

Figura 5. Mapes del flux de radiació neta instantània, R_{ni} (W m^{-2}); (a) 09/26/1999, (b) 06/14/2002, (c) 05/26/2004.

Taula 2. Comparació entre les mesures del lisímetre de LE_d (W m^{-2}) i resultats obtinguts per als emplaçaments concrets de la instrumentació.

Data	Lisímetre	Mesurat	Estimat	Diferència	Diferència relativa
26 de setembre de 1999	Lavello	-	86	-	-
	Policoro	54	60	6	11
14 de juny de 2002	Lavello	63	92	29	50
	Policoro	83	86	3	3

de l'evapotranspiració corresponents al 26 de setembre de 1999, en un cultiu de raves, i les del 14 de juny de 2002 en un cultiu d'albergínies, van ser proporcionades per l'Institut Científic de Producció Alimentària de Bari, responsable de la recol·lecció de dades de la Granja Experimental "E. Pantanelli" de Policoro.

Per a aquest treball, es van seleccionar tres imatges Landsat sense núvols, una corresponent al sensor TM, a bord del Landsat 5 (al qual ens referirem a partir d'ara com a L5-TM) (26 de maig de 2004) i dues corresponents al sensor ETM+, a bord del Landsat 7 (al qual ens referirem a partir d'ara com a L7-ETM+) (26 de setembre de 1999 i 14 de juny de 2002). L'alta resolució espacial d'aquests sensors (30 m en les bandes visibles i de l'infraroig proper i 60 m per al L7-ETM+ o 120 m per al L5-TM en la banda tèrmica) permet un seguiment detallat de les característiques de la superfície, requerides en la metodologia descrita, per a tota la regió de Basilicata.

3.2 Resultats i discussió

Els perfils atmosfèrics, a partir de ràdiosondatges operatius llançats en una zona propera, van ser processats per a cada data utilitzant el codi MODTRAN 4.0. Tal com hem explicat a la Secció 2.2, es van corregir les bandes visibles i de l'infraroig proper i es va elaborar un mapa NDVI per a cada imatge Landsat. Es va portar a terme un curós procés de recerca, basat en el contrast mostrat a les bandes 3 i 4, i en el NDVI obtingut, per tal d'identificar els píxels totalment vegetats i els de sòl totalment nu. Es van seleccionar diverses mostres de cada tipus i es van distribuir per tota la regió a fi d'explicar la variabilitat espacial dins l'àrea. Els valors mitjos d'aquestes mostres es van utilitzar per als paràmetres del sòl i de la vegetació en les Equacions 8 i 9. A la Figura 3 es mostren els mapes de coberta de la vegetació obtinguts a partir de tres imatges. Cal remarcar que la imatge que correspon a juny de 2002 mostra els valors més alts de P_v. A la Figura 2c els valors més alts de P_v s'identifiquen fàcilment amb àrees boscoses. Tal com hem explicat a la Secció 2.1, els mapes d'emissivitat es van obtenir aplicant l'Equació 5 assumint els valors nominals de ε_c = 0.985 i ε_s = 0.960. Els mapes de temperatura de superfície de la terra (Figura 4) es van obtenir finalment aplicant l'Equació 4. Alguns autors com Sobrino et al. (2004) i Li et al. (2005) han mostrat la validesa de la Temperatura de Superfície de la Terra (LST, segons les sigles angleses) obtinguda gràcies al Landsat 5-TM i el Landsat 7-ETM+, respectivament, utilitzant l'equació de transferència radiant, amb errors inferiors a 1°C.

Es va obtenir una regressió lineal entre els valors disponibles de temperatura de l'aire i l'altitud per sobre del

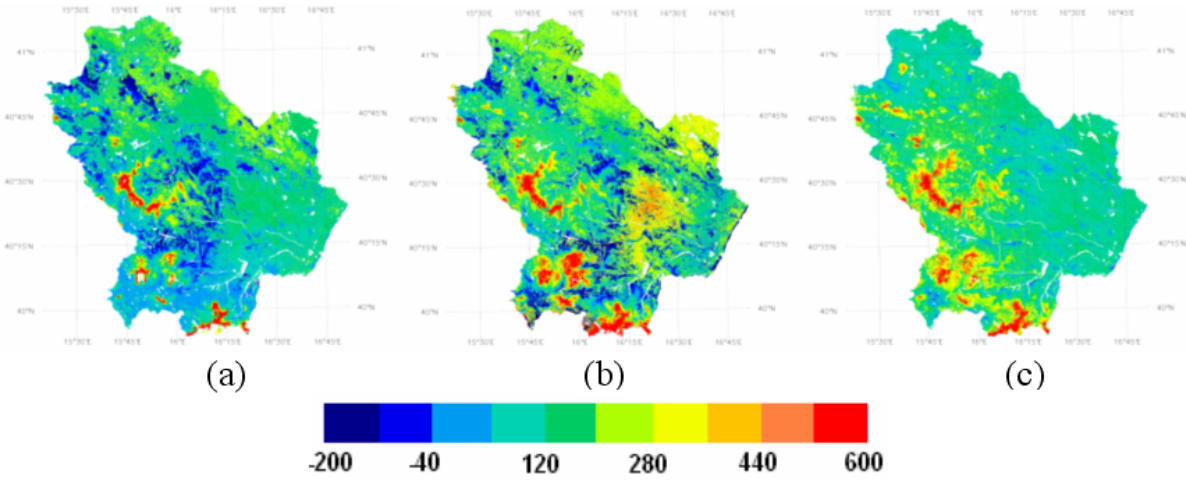

Figura 6. Mapes de flux instantani de calor sensible, H_i (W m^{-2}); (a) 09/26/1999, (b) 06/14/2002, (c) 05/26/2004.

nivell del mar de les estacions corresponents. Els mapes de temperatura de l'aire es van obtenir aplicant aquesta relació deduïda a tota la regió a partir de la informació de l'altitud del terreny del DEM. Els valors de l'Error Quadràtic Mitjà (RMSD, segons les sigles angleses) prop d'1°C es van obtenir comparant els valors predits de T_a amb les observacions del sòl. Es va fer servir una interpolació de krigeatge per a elaborar mapes de la velocitat del vent i de la radiació solar global, com s'explica a la Secció 2.4.

La Figura 5 mostra els mapes de radiació neta obtinguts a partir de l'Equació 3. L'albedo de superfície integrada es va avaluar utilitzant l'Equació 10. També es van fer servir resultats anteriors de l'emissivitat utilitzant l'Equació 5. En comparar les Figures 5 i 3, podem veure que els valors més alts de R_{ni} s'obtenen per a la majoria de les zones vegetades, i els més baixos per a les zones despullades. Després d'avaluar els valors de T_c i T_s segons el procediment esmentat abans, es va obtenir el flux de calor sensible (Figure 6) a través de l'aproximació del STSEB (Sánchez et al., 2008). En els moments de passada del Landsat, T_R és típicament més alta que T_a per a la majoria dels paisatges (H positiu). Tanmateix, hi ha alguns casos en què $T_a > T_R$. A més a més, els mapes de temperatura de l'aire produïts poden contenir incerteses espacials donant valors alts poc realistes de T_a. En aquests casos, es poden observar valors negatius de H_i. A més, es mostra una heterogeneïtat espacial més ampla si la comparem amb els mapes de R_{ni}. Com a conseqüència directa, la variabilitat espacial de l'evapotranspiració estarà principalment lligada a la distribució espacial del flux de calor sensible. Finalment, la Figura 7 mostra els mapes de LE_d (mm dia^{-1}) que s'obtenen aplicant l'Equació 2 als resultats anteriors. Els valors de R_{nd}/R_{ni} es van calcular per a cada data a partir de les dades reunides del sòl. Com que s'ha mostrat que el quocient R_{nd}/R_{ni} varia amb el temps, les dates o la latitud de l'emplaçament, però no amb el tipus de vegetació (Sobrino et al., 2005; Sánchez et al., 2007), s'ha fet servir un valor constant per a cada imatge: 0.365, 0.378 i 0.351 per a les imatges L7_99, L7_02, i L5_04, respectivament. En conjunt, es pot veure que els valors més alts de LE_d es van obtenir per a les zones més vegetades i els més baixos per a les zones despullades. Tanmateix, també hi ha una petita porció de píxels amb valors alts de P_v i valors baixos de LE_d. Aquests valors corresponen a àrees per sobre d'uns 1500 m d'altitud, segons el DEM. Per a una anàlisi dels resultats de LE_d regional, s'han calculat els valors mitjos de tots els píxels a dins de cada ús del sòl. La Taula 1 mostra una llista d'aquests resultats per als principals usos del sòl.

En general, els boscos de coníferes i d'arbres de fulla ampla, així com els arbres fruiters i les zones agrícoles, mostren els valors més alts. Al mateix temps, les zones poc vegetades, les zones llaurables, els boscos mixtos o les pastures mostren els valors de LE_d més baixos. Cal remarcar la baixa variabilitat dels resultats de LE_d dels diferents usos del sòl per a la imatge de L5-TM comparats amb els altres dos casos de L7-ETM+. La resolució espacial de 120 m en la banda tèrmica de TM, comparada amb els 60 m de ETM+, pot ser important. A més, podem observar que els resultats de LE_d són clarament més baixos per a la imatge de setembre que per a les altres dues de maig i juny. D'altra banda, el valor mig de LE_d per a tota la regió de Basilicata va ser de 92, 120, i 123 W m^{-2} per a les imatges de L7_99, L7_02 i L5_04, respectivament. Això sembla lògic si es té en compte la fase fenològica de la vegetació per a cada data. Tanmateix, no es pot treure cap conclusió segura ja que les tres imatges corresponen a anys diferents, i les condicions podrien haver canviat de l'una a l'altra.

Per tal d'avaluar el rendiment de la metodologia que hem descrit, es van comparar els resultats de LE_d amb algunes mesures puntuals del lisímetre. La Taula 2 mostra la comparació entre aquestes mesures i els resultats obtinguts a

Taula 3. Comparació entre els valors de LE_d mesurats del sòl (W m^{-2}) en els emplaçaments italians de CarboEurope i els resultats obtinguts per a usos del sòl semblants a la regió de Basilicata.

Lloc/Data	Coberta de terra	Lat./Long.	LE_d mesurada	LE_d estimada	Dif.	Dif. Relativa (%)
Collelongo 09/26/1999	Bosc mixt	41°0'58"N 13°5'17"E	57	77	20	30
San Rossore 06/14/2002	Bosc de coníferes	43°43'47"N 10°7'13"E	134	192	57	40
Roccaresp. 1 06/14/2002	Bosc d'arbres de fulla ampla	42°4'29"N 11°5'48"E	126	149	23	18
Roccaresp. 2 06/14/2002	Bosc d'arbres de fulla ampla	42°23'25"N 11°55'15"E	120	149	29	24
Castelpolziano 06/14/2002	Herbassar	42°35'8"N 10°4'44"E	80	112	31	40
Nonantola 06/14/2002	Terra de cultiu	44°41'23"N 11°5'19"E	154	126	-29	19
Lavarone 05/26/2004	Bosc de coníferes	45°57'19"N 11°16'52"E	97	137	40	40
Parco Ticino 05/26/2004	Bosc d'arbres de fulla ampla	45°12'3"N 9°3'40"E	143	120	-23	16
Monte Bond. 05/26/2004	Bosc mixt	46°1'47"N 11°4'59"E	112	109	-3	3
				Biaix	+17	
				σ	30	
				RMSD	30	

la Figura 7 per a la localització dels dos lisímetres. Malauradament, les dades de Lavello per al 26 de setembre de 1999 no eren fiables i no es va disposar de cap dada del lisímetre per al 26 de maig de 2004. Es va obtenir un valor de RMSD de 20 W m^{-2}. Per tal de reforçar aquest càlcul a una escala més ampla, es van fer servir dades de la xarxa CarboEurope. Es tracta d'un projecte internacional l'objectiu del qual és l'estudi dels intercanvis de diòxid de carboni entre la superfície i l'atmosfera. Amb aquest objectiu, s'ha distribuït per Europa una xarxa de torres equipades amb la instrumentació requerida per a mesurar directament els fluxos de la superfície. La Taula 3 mostra la localització d'algunes torres, situades en territori italià, així com informació sobre el tipus de vegetació sobre la qual es troben. Els valors de LE_d mesurats del terra des d'aquestes torres, utilitzant la correlació de remolins o els sistemes del quocient Bowen, es van utilitzar per provar els valors mitjos obtinguts utilitzant la classificació d'ús del sòl a la regió de Basilicata. Es va obtenir un valor de RMSD de 30 W m^{-2} amb una sobreestimació de 17 W m^{-2}. Cal remarcar que les diferències més importants s'obtenen en els emplaçaments dels boscos de coníferes. Tot i que convindria tenir una xarxa més completa dels valors de LE_d mesurats del terra distribuïts espacialment per la regió estudiada i representatius dels diferents usos el sòl, per tal de tenir una validació consistent, els resultats obtinguts ens fan confiar en la metodologia proposada per a avaluar l'evapotranspiració diària a escala regional.

Cal remarcar que el principal objectiu d'aquest treball és mostrar una metodologia viable i, al mateix temps, senzilla i operativa que ens permeti extraure LE_d a escala regional reunint dades de teledetecció i mesurades del sòl. Es podien haver introduït tècniques més complicades, comportant un nombre més gran de variables i paràmetres, i/o processos de càlcul més pesats. Tanmateix, l'operativitat del mètode s'hauria vist significativament reduïda. En treballs futurs es tractarà l'estudi de l'efecte de possibles millores de la metodologia descrita en els resultats finals de LE_d. Per exemple:

- Mètodes més sofisticats que incorporin informació geogràfica, com el co-krigeatge i l'elevació - les tècniques de krigeatge sense tendència es poden aplicar per a elaborar mapes de les variables meteorològiques que es necessiten. També es pot introduir un model digital d'elevació amb una resolució espacial més alta per tal de reduir errors en la interpolació de la temperatura de l'aire.
- Els treballs recents han tractat els efectes de l'heterogeneïtat a nivell de subpíxel en l'estimació dels fluxos, i s'ha proposat un procediment de disgregació per a avaluar les variacions del subpíxel en la temperatura radiomètrica de superfície (Kustas et al., 2003). Aquesta tècnica es pot aplicar a les imatges Landsat i derivar T_{rad} a la resolució píxel de NDVI (30 m). L'aplicació d'aquest procediment a les imatges L5-TM és especialment interessant a causa del baix contrast que es mostra en els resultats de LE_d.
- Els valors específics de les emissivitats del sòl i de la vegetació es podrien assignar als diferents tipus d'usos del sòl. D'aquesta manera, els valors d'emissivitat més re-

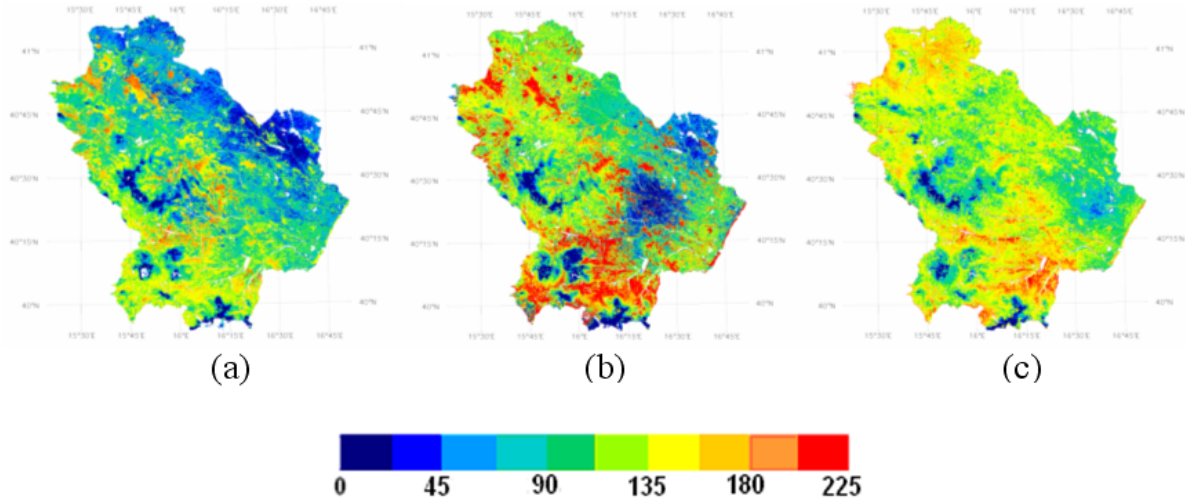

Figura 7. Mapes de l'evapotranspiració diària real, LE_d (W m^{-2}); (a) 09/26/1999, (b) 06/14/2002, (c) 05/26/2004.

presentatius de la vegetació i les condicions locals reals es podrien utilitzar en la correcció de l'emissivitat de la temperatura radiomètrica. També s'han utilitzat valors únics de T_c i T_s per a tota la regió en l'obtenció dels fluxos de calor sensible. Una estimació d'aquests valors per als diferents usos del sòl podria explicar les possibles diferències.

4 Conclusions

En aquest treball, es presenta una metodologia operativa per tal d'avaluar l'evapotranspiració diària a escala regional, reunint les tècniques de teledetecció i la micrometeorologia. La relació tradicional Itier i Riou (1982) es combina amb el model micrometeorològic STSEB proposat (Sánchez et al., 2008), amb la finalitat d'extraure els valors de LE_d d'una única informació en un moment en concret del dia. El model STSEB s'ha introduït per a avaluar els fluxos d'energia de la superfície sobre vegetacions escasses i heterogènies a partir de temperatures radiomètriques de superfície i dades micrometeorològiques.

Com a exemple concret, en aquest treball el mètode s'aplica a la regió de Basilicata, al sud d'Itàlia, utilitzant les imatges Landsat. Es fan servir tres imatges aconseguides en tres dates diferents, dues Landsat 7-ETM+ i una Landsat 5-TM. El mapa CORINE Land Cover i tota una xarxa d'estacions agrometeorològiques proporcionen el conjunt de variables del terra i els paràmetres necessaris per a aplicar la metodologia. Es creen mapes dels diferents fluxos de superfície. Es fa una anàlisi dels resultats de LE_d agafant la classificació de l'ús del sòl com a base, i s'estableixen les diferències entre els diferents tipus de vegetació i les dates. En conjunt, els valors més alts de LE_d corresponen a les zones més vegetades. És important senyalar que la variabilitat espacial de l'evapotranspiració està principalment lligada a la distribució espacial del flux de calor sensible a causa de la seva major heterogeneïtat mostrada en comparació amb els resultats de la radiació neta. El rendiment del mètode a escala local i regional s'avalua comparant els resultats amb algunes mesures del terra. Finalment s'obté un error estimat proper a 30 W m^{-2}.

La metodologia presentada en aquest treball es pot ampliar i aplicar a qualsevol altra regió del món i a altres sensors satel·litaris. Els únics requisits són uns registres apropiats de la temperatura instantània de l'aire, la velocitat del vent i la radiació solar simultània amb les passades dels satèl·lits i, és clar, almenys una imatge de satèl·lit del dia que ens interessa. La possibilitat d'utilitzar models numèrics per a substituir les mesures del terra i explicar d'aquesta manera la manca d'estacions meteorològiques requereix més recerca. L'efecte de les incerteses simulades com a entrada en els resultats del flux s'ha d'analitzar. Malgrat això, creiem que el treball té el potencial de presentar una contribució valuosa al seguiment de l'evapotranspiració de la superfície i les necessitats de l'aigua, així com a les tasques de gestió de l'aigua.

Agraïments. Aquest treball ha estat finançat pel *Ministerio de Educación y Ciencia* (Projectes CGL2004-06099-C03-01 i CGL2007-64666/CLI, cofinançats amb els fons FEDER de la Unió Europea, *Acciones Complementarias* CGL2005-24207-E/CLI i CGL2006- 27067-E/CLI), i la Universitat de València (Beca de Recerca *V Segles* del Sr. J.M. Sánchez). Els autors també volen donar les gràcies a ALSIA (*Agenzia Lucana per lo Sviluppo ed Innovazione in Agricoltura*) per proporcionar-los dades de camp, i a IMAA (*Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale*) del CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*), i a Tito Scalo per proporcionar-los les elaboracions base de les imatges de satèl·lit. Apreciem molt els valuosos comentaris i suggeriments dels Drs. Enric Valor i César Coll (Universitat de València) a les versions anteriors d'aquest treball.

Referències

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., i Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, 300 pp.

Büttner, G., Feranec, J., i Jaffrain, G., 2002: Corine Land Cover update 2000: Technical guidelines, European Environment Agency, Copenhagen.

Cressies, N., 1991: Statistics for spatial data, John Wiley and Sons, New York.

Dubayah, R., 1992: *Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data*, Water Resour Res, **28**, 2469–2484.

Itier, B. i Riou, C., 1982: *Une nouvelles méthode de determination de l'évapotranspiration réelle par thermographie infrarouge*, J Rech Atmos, **2**, 113–125.

Kustas, W. P., Norman, J. M., Anderson, M., i French, A., 2003: *Estimating subpixel temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship*, Remote Sens Environ, **82**, 429–440.

Li, F., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Neale, C. M. U., i Jackson, J. J., 2005: *Utility of Remote Sensing Based Two- Source Energy Balance Model Under Low and High Vegetation Cover Conditions*, J Hydrometeorol, **6**, 878–891.

Rubio, E., Caselles, V., Coll, C., Valor, E., i Sospedra, F., 2003: *Thermal-infrared emissivities of natural surfaces: improvements on the experimental set-up and new measurements*, Int J Remote Sens, **24**, 5379–5390.

Sánchez, J. M., Caselles, V., Niclòs, R., Valor, E., Coll, C., i Laurila, T., 2007: *Evaluation of the B-method for determining actual evapotranspiration in a boreal forest from MODIS data*, Int J Remote Sens, **28**, 1231–1250.

Sánchez, J. M., Caselles, V., i Kustas, W. P., 2008: *Estimating surface energy fluxes using a micro-meteorological model and satellite images*, Tethys, **5**, DOI: 10.3369/tethys.2008.5.03.

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., i Paolini, L., 2004: *Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5*, Remote Sens Environ, **90**, 434–440.

Sobrino, J. A., Gómez, M., Jiménez-Muñoz, J. C., Olioso, A., i Chehbouni, G., 2005: *A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX campaigns*, J Hydrol, **315**, 117–125.

Valor, E. i Caselles, V., 1996: *Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European, African and South-American areas*, Remote Sens Environ, **57**, 167–184.