

## Utilizzo del dato satellitare termico in ambito urbano: un caso di studio

Gabriele Bitelli, Paolo Conte

DICAM - Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, Bologna  
(gabriele.bitelli;paolo.conte)@unibo.it

### Sommario

Il telerilevamento termico aereo e satellitare si rivela molto utile nell'analisi delle caratteristiche termiche delle superfici, in particolare con l'avvento di sensori ad alta risoluzione spaziale e con bande spettrali anche nel campo dell'IR termico; uno dei principali oggetti di ricerca è il fenomeno dell'*Urban Heat Island*, le cui cause sono legate, oltre che al calore sensibile rilasciato dalle attività antropiche, alle variazioni nell'uso del suolo e alla riduzione dell'evapotraspirazione.

E' stata effettuata una sperimentazione sull'area urbana di Bologna tramite una serie di immagini ASTER: sono stati confrontati 3 algoritmi diversi per il calcolo della *Land Surface Temperature*, di cui uno correla l'emissività della superficie al valore dell'indice NDVI.

Nonostante i risultati dei tre approcci siano piuttosto differenti, la distribuzione spaziale delle temperature ricavate appare simile per tutti i metodi considerati; è evidente la presenza dell'isola di calore urbano sulla città, ma risulta difficile stimarne l'intensità senza l'utilizzo di dati atmosferici di validazione.

### Abstract

Aerial and spaceborne remote sensing is very useful for analysis on thermal surface properties, especially when new sensors with high spatial resolution and spectral bands in thermal infrared region are used. A major research subject is the Urban Heat Island, which is related not only to sensible heat released by anthropic activities, but also to land use variations and evapotranspiration reduction.

This work reports some experiments on the urban area of Bologna, carried out by series of ASTER images: we compared three different algorithms for computing Land Surface Temperature, one of which correlates surface emissivity to the value of NDVI index.

Although results are rather variable, the spatial distribution of surface temperatures is similar for all the methods we used: the presence of an urban heat island on the city is evident, but it is difficult to estimate its intensity without employing atmospheric validation data.

### Introduzione

Il fenomeno dell'*Urban Heat Island* (UHI), noto alla comunità scientifica da alcuni decenni (Oke, 1973), consiste nell'innalzamento della temperatura atmosferica nelle aree urbane rispetto al loro intorno rurale: ciò è dovuto fondamentalmente alle variazioni nell'uso del suolo, con progressiva sostituzione delle coperture vegetali da parte delle superfici urbane, caratterizzate da diverse proprietà fisiche quali inerzia e conducibilità termica, emissività. Ad esso si aggiunge la riduzione dell'evapotraspirazione e l'aumento del ruscigliamento superficiale dovuto alla presenza di superfici impermeabili, il calore di origine antropica dovuto a edifici, veicoli e attività produttive, la presenza degli "*urban canyon*".

E' importante a riguardo distinguere tra i fenomeni rilevabili all'interno dell'*urban canopy layer* (UCL), esteso approssimativamente sino al livello delle coperture degli edifici e regolato da

processi su microscala, e l'*urban boundary layer* (UBL), caratterizzato da processi su mesoscala ed esteso sino ad un'altezza pari anche ad alcune volte l'altezza degli edifici (Arnfield, 2002). L'avvento dei satelliti con sensori multispettrali, con la possibilità di ottenere informazioni nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso termico e di dedurre con sufficiente precisione la temperatura superficiale delle coperture al suolo anche su aree piuttosto estese, fa del telerilevamento uno strumento con notevoli potenzialità nell'analisi dell'UHI: sebbene siano stati effettuati numerosi studi al riguardo (Arnfield, 2002) una delle principali difficoltà riscontrate consiste nel correlare la *Land Surface Temperature* (LST) all'effettivo innalzamento della temperatura atmosferica. A tal proposito alcuni studiosi (Lee, 1993, Van, 2009) preferiscono fare riferimento alla *Surface Heat Island* (SHI), correlata all'innalzamento delle temperature superficiali nelle aree urbane, considerato un indicatore del corrispondente fenomeno riferito alle temperature atmosferiche. Uno dei principali limiti odierni del telerilevamento satellitare applicato alle analisi sull'UHI consiste nella risoluzione spaziale delle immagini acquisite nell'infrarosso termico dai sensori attualmente disponibili, generalmente molto minore rispetto a quella delle immagini acquisite nelle bande del visibile e del vicino infrarosso. Un'ulteriore difficoltà consiste nella validazione dei risultati ottenuti, a causa della natura puntuale dei dati di temperatura ottenuti dalle stazioni meteorologiche rispetto ai valori areali ottenuti mediante analisi *remote-sensed*.

### Materiali e metodologia

Il presente studio illustra una sperimentazione effettuata sull'area urbana di Bologna mediante immagini multispettrali del sensore ASTER al fine di valutare l'estensione e l'intensità dell'isola di calore urbano sulla città. Sono state utilizzate due immagini ASTER acquisite rispettivamente il 22/07/2009 alle ore 10.22.37 UTM e il 25/08/2009 alle ore 10.10.22 UTM; i prodotti utilizzati per l'analisi sono l'ASTER L1B (*Registered Radiance at Sensor*), calibrato radiometricamente e corretto geometricamente, avente 6 bande nella regione dell'Infrarosso Termico con risoluzione spaziale di 90 m, e l'ASTER\_07XT (*Surface Reflectance*), contenente i valori di riflettanza degli oggetti al suolo (con risoluzione spaziale di 15 m nelle bande VNIR); per il confronto dei risultati ottenuti è stato inoltre utilizzato il prodotto ASTER\_08 (*Surface Kinetic Temperature*), anch'esso con risoluzione spaziale di 90 m, con i valori di temperatura superficiale calcolati mediante l'algoritmo di separazione Temperatura-Emissività TES (Gillespie et al., 1998).

Nella regione dell'infrarosso termico (8-14  $\mu\text{m}$ ) il sensore rileva prevalentemente la radiazione emessa dalla superficie terrestre; il calcolo della temperatura di corpo nero  $T_B$  (*Brightness Temperature*) degli oggetti al suolo è basato sull'inversione della legge di Planck (Smith, 2003):

$$T_B = \left( \frac{hc}{k\lambda} \right) \left( \frac{1}{\ln \left( \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{B_\lambda} + 1 \right)} \right) \quad [1]$$

dove:  $h=6.626068 \cdot 10^{-34}$  [Js],  $k=1.38066 \cdot 10^{-23}$  [J/deg],  $c=2.997925 \cdot 10^8$  [m/s],  $\lambda$  è la lunghezza d'onda [m],  $B_\lambda$  è la radianza di corpo nero misurata [ $\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$ ],  $T_B$  è la Temperatura di Brillanza [K]. Dalla  $T_B$ , una volta definita l'emissività della superficie  $\varepsilon$ , è possibile calcolare la temperatura superficiale  $T_S$  mediante la relazione

$$T_S = \frac{T_B}{\varepsilon^{1/4}} \quad [2]$$

È da notare come non sia possibile dalle relazioni appena illustrate ricavare simultaneamente sia la temperatura che l'emissività dei pixel dell'immagine in quanto, anche con un numero  $n$  di bande spettrali, il sistema rimane indeterminato essendo incognite la temperatura superficiale e gli  $n$  valori di emissività nelle bande (Becker, 1980).

Nel presente studio si è sperimentato un approccio semplificato che prevede la stima dell'emissività dei pixel in base ai valori di riflettanza sulle bande del visibile e del vicino infrarosso, seguendo un algoritmo che correla la stessa ai valori del *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) sotto l'ipotesi che l'emissività effettiva di un pixel sia la somma dei contributi delle diverse superfici che

lo compongono (Van et al., 2009); ciò consente di ricavare un'immagine di LST alla stessa risoluzione delle bande VNIR.

Nella fattispecie è stato innanzitutto calcolato il valore dell'indice NDVI dai valori di riflettanza delle bande VNIR del prodotto ASTER\_07XT secondo l'equazione:

$$NDVI = (b1 - b2) / (b1 + b2) \quad [3]$$

dove b1 = banda 3 (NIR) e b2 = banda 2 (Red) del prodotto ASTER\_07XT.

Sono stati quindi attribuiti ad ognuna delle 2 immagini, tramite la definizione di alcune regioni di interesse e l'analisi degli istogrammi di frequenza dell'indice di vegetazione all'interno delle stesse (fig.2), i valori caratteristici NDVI<sub>V</sub> e NDVI<sub>S</sub> per aree rispettivamente densamente vegetate e coperte da suolo nudo; tramite questi ultimi sono stati calcolati i corrispondenti valori di emissività ε<sub>V</sub> ed ε<sub>S</sub> secondo la seguente relazione, proposta da Van de Griend & Owe (1993) su aree ampie e omogenee:

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 * \ln(NDVI) \quad [4]$$

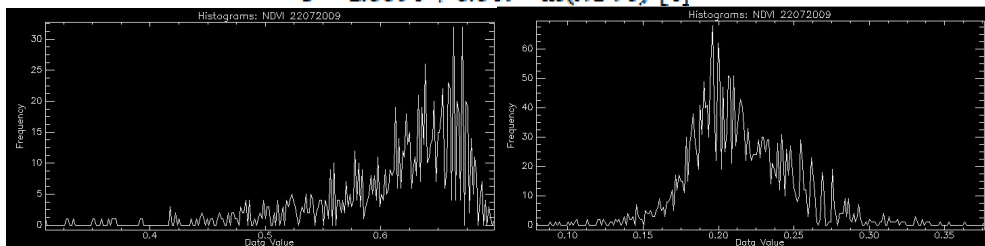


Fig. 1 – Istogrammi di frequenza NDVI 22/07/2009: (a) aree densamente vegetate (b) suolo nudo.

La fase successiva è stata il calcolo della *vegetation cover fraction* P<sub>V</sub>, ovvero della frazione di copertura vegetale di ogni pixel dell'immagine; essa può essere correlata ai valori caratteristici dell'NDVI precedentemente ottenuti dalla relazione (Carlson & Ripley, 1997)

$$P_V = \left( \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2 \quad [5]$$

Una volta noto il valore di P<sub>V</sub>, applicando il modello operativo proposto da Valor & Caselles (1996), è stato possibile attribuire un valore di emissività ad ogni pixel secondo la relazione:

$$\varepsilon = \varepsilon_V * P_V + \varepsilon_S * (1 - P_V) \quad [6]$$

consentendo infine di ricavare il valore della temperatura superficiale degli oggetti a terra dai valori di radianza *Top of Atmosphere* della banda 14 ASTER (λ=11.318 μm), ottenuti dall'applicazione del metodo di correzione atmosferica *In-Scene Atmospheric Compensation* (Young et al., 2002) ai valori di radianza al sensore del prodotto L1B. Si è deciso di usare la banda 14 per coerenza con la lunghezza spettrale acquisita nella banda nell'infrarosso termico del sensore ETM+ (10,4-12,5 μm). Si è quindi passati all'analisi dei risultati ottenuti, confrontando per entrambe le immagini i valori di temperatura superficiale precedentemente calcolati con le temperature cinetiche derivate da altre metodologie di calcolo: in particolare è stato utilizzato il prodotto ASTER\_08 (basato sull'algoritmo di separazione temperatura-emissività TES) ed un'altra immagine di T<sub>S</sub>, derivata dai valori di radianza TOA già calcolati mediante l'applicazione dell'algoritmo *Emissivity Normalization* (ITT, 2010), considerando un valore dell'emissività costante su tutta l'immagine e pari a 0,96.

Le tre immagini relative alla stessa data d'acquisizione sono state co-registrate geometricamente, e su ognuna di esse sono stati definiti un transetto Est-Ovest ed uno Nord-Sud (Fig. 2 e 3), analizzando quindi l'andamento della T<sub>s</sub> lungo di essi per tutti e tre gli algoritmi considerati e confrontando le distribuzioni statistiche sull'intera immagine ottenuta (circa 60km x 60km).

Per l'analisi del fenomeno dell'UHI è stata invece definita una finestra quadrata che contenesse interamente la città di Bologna; è quindi stato effettuato il confronto statistico dei valori di temperatura superficiale derivati dalle 3 metodologie, considerando sia l'intera finestra che una regione d'interesse più ristretta, corrispondente al centro storico della città (Fig. 4).

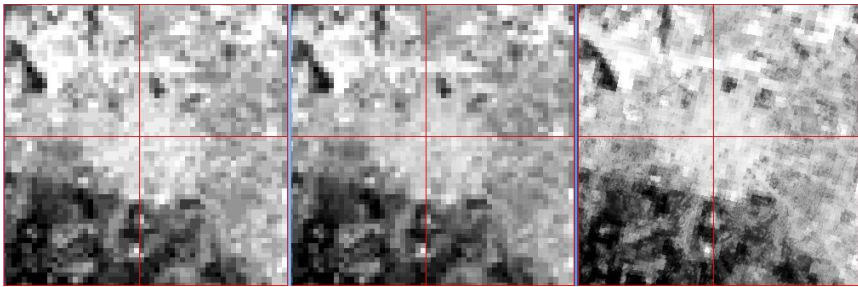


Fig. 2 – Temperatura superficiale, subset e transetti 22/07/2009: (a) TES (b) EN (c)  $\epsilon(P_V)$ .

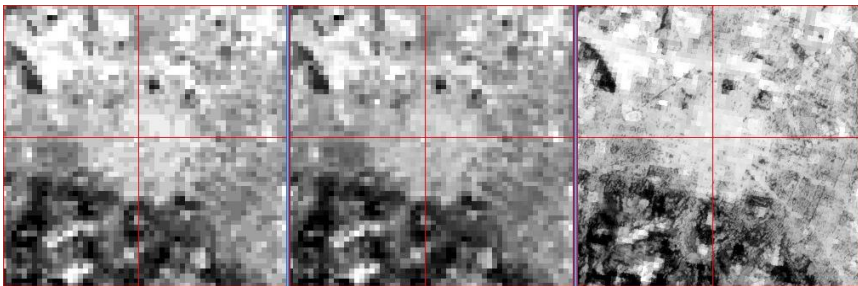


Fig. 3 – Temperatura superficiale, subset e transetti 25/08/2009: (a) TES (b) EN (c)  $\epsilon(P_V)$ .

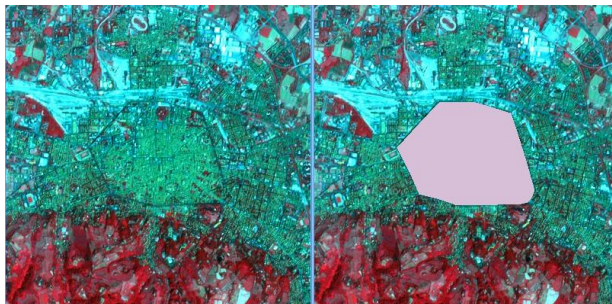


Fig. 4 – Subset dell'immagine e ROI del centro storico di Bologna.

### Risultati e discussione

I valori caratteristici di NDVI relativi ad aree totalmente vegetate e coperte da suolo nudo sono risultati rispettivamente di 0,730 e 0,165 per l'immagine del 22/07/2009 e di 0,765 e 0,078 per l'immagine del 25/08/2009; i corrispettivi valori di  $\epsilon_V$  ed  $\epsilon_S$  sono risultati di 0,994 e 0,924 per la prima immagine, e di 0,997 e 0,889 per la seconda. I suddetti valori sono apparsi plausibili se confrontati con quelli derivanti da altre analisi simili (Van et al., 2009) e con dati tabellari relativi alle diverse superfici.

Nelle tabelle 1 e 2 sono riportati i valori statistici delle temperature superficiali ottenute dai 3 diversi approcci, riferite all'intera immagine ASTER processata: si nota come la media della LST calcolata mediante l'algoritmo TES sia in entrambi i casi sensibilmente maggiore rispetto agli altri metodi (in particolare rispetto al metodo basato su un valore di emissività costante), ed anche il range dei valori ottenuti sia più ampio; la deviazione standard risulta massima per l'algoritmo che lega l'emissività all'NDVI, mentre è minima con il metodo dell'*Emissivity Normalization*.

Anche dall'analisi dell'andamento della  $T_S$  lungo i due transetti è possibile notare come la LST dell'ASTER\_08 sia generalmente maggiore, per entrambe le date considerate, sia di quella ottenuta

considerando  $\epsilon$  costante che di quella ottenuta calcolando  $\epsilon$  in funzione dell'NDVI (v. Fig.5); l'andamento della LST lungo i transetti è analogo per tutti e tre gli approcci utilizzati.

Temp. superficiale (°K) - Immagine ASTER 22/07/2009				
Metodo	Min	Media	Max	Dev. standard
TES	279.0	310.6	334.0	4.7
EN ( $\epsilon=0,96$ )	285.5	306.5	324.5	3.6
$\epsilon=\epsilon(P_V)$	282.3	306.6	326.4	4.9

Tab. 1 – Valori statistici della LST sull'immagine del 22/07/2009.

Temp. superficiale (°K) - Immagine ASTER 25/08/2009				
Metodo	Min	Media	Max	Dev. standard
TES	282.0	312.9	334.0	5.1
EN ( $\epsilon=0,96$ )	284.4	306.8	321.7	3.6
$\epsilon=\epsilon(P_V)$	285.4	309.2	326.7	6.1

Tab. 2 – Valori statistici della LST sull'immagine del 25/08/2009.

Gli istogrammi di frequenza della LST all'interno del centro storico, se confrontati con gli stessi riferiti all'intero subset considerato, evidenziano su entrambe le immagini una differenza rilevante nelle temperature medie; nella tab. 3 sono riportati i valori statistici ottenuti dai 3 criteri adottati, e si nota come la differenza tra il centro storico e l'intero subset oscilla tra 1,9° e 2,9° per l'immagine del 22/07/2009 e tra 1,1° e 2,4° per l'immagine del 25/08/2009; le differenze di temperatura più marcate derivano dal metodo basato sull'NDVI, seguite dall'algorithmo TES e dall'EN. I risultati ottenuti confermano l'esistenza dell'isola di calore urbano sulla città di Bologna, come già evidenziato da altri studi sulla stessa area (Ventura et al., 2009; Zauli Sajani e Scotto, 2007).

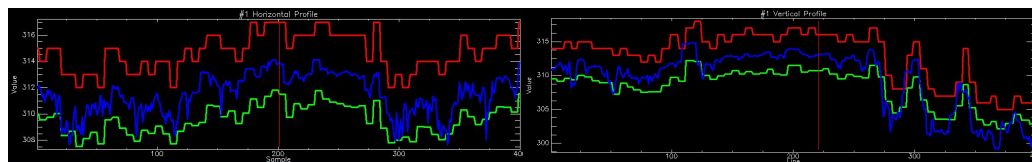


Fig. 5 – LST del 22/07/2009 R=TES G=EN B= $\epsilon(P_V)$  (sn)trans. E-W (dx)trans. N-S.

## Conclusioni

L'utilizzo di immagini satellitari multispettrali con bande nell'infrarosso termico consente il calcolo della Land Surface Temperature su superfici anche molto vaste, con coperture al suolo di tipo differente, con una risoluzione temporale funzione del tempo di rivisitazione dell'immagine e con una complessità operativa dipendente dall'algorithmo utilizzato.

Il metodo applicato, che consente la stima dei valori di *Land Surface Emissivity* (LSE) dai valori dell'NDVI, è abbastanza rapido e permette di ottenere una risoluzione spaziale dell'immagine finale di temperatura superficiale notevolmente maggiore rispetto a quella ottenibile utilizzando le sole bande spettrali nel termo-infrarosso; è inoltre da sottolineare come il metodo possa essere utilizzato con qualsiasi sensore multispettrale avente almeno una banda nel campo dell'infrarosso termico (oltre alle bande del rosso e del NIR), mentre l'algorithmo TES, sviluppato appositamente per l'utilizzo con immagini ASTER, necessita di almeno 4 bande TIR su lunghezze d'onda diverse.

I valori di TS derivati dai tre diversi algoritmi sono differenti in termini assoluti, ma l'andamento spaziale delle stesse lungo i transetti considerati appare piuttosto simile; la surface kinetic temperature del prodotto ASTER\_08 è sensibilmente maggiore rispetto a quella derivante dall'algorithmo proposto nello studio, e le differenze sono ancor più marcate se confrontata con quella ottenuta dal metodo dell'*Emissivity Normalization*; è altresì importante sottolineare come per



la stima del fenomeno dell'UHI sia di maggiore importanza la differenza nelle temperature tra l'area urbana e il suo intorno rurale rispetto ai valori assoluti delle stesse.

Immagine del 22/07/2009			
LST media (°K)	TES	EN ( $\sigma=0,96$ )	$\sigma=\sigma$ (P <sub>v</sub> )
Centro storico	315.1	309.9	311.9
Subset 400x400	312.5	308.0	309.0
Immagine del 25/08/2009			
LST media	TES	EN ( $\sigma=0,96$ )	$\sigma=\sigma$ (P <sub>v</sub> )
Centro storico	314.8	308.1	312.8
Subset 400x400	313.1	307.0	310.4

Tab.3 – LST media sull'intero subset e sul centro storico.

Le sensibili differenze tra l'area del centro storico e il suo intorno rurale evidenziano la presenza dell'isola di calore urbano sulla città di Bologna: la variabilità dei risultati, che sarà oggetto di ulteriore indagine, non consente però una stima affidabile della sua intensità che dipende, oltre che dal periodo e dall'ora di acquisizione, dalle condizioni atmosferiche, dall'elevazione del terreno e dalla sua esposizione, dalla pendenza topografica, dall'inerzia termica e da diversi altri fattori di difficile modellazione.

### Riferimenti bibliografici

- Arnfield, A.J. (2002), "Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchange of energy and water, and the urban heat island", *Int. J. of Climatology*, 23, 1–26
- Becker, F. (1980), "Thermal infrared remote sensing. Principles and applications", In: Remote sensing application in agricultural and hydrology (G. Fraysse, Ed.), Balkema
- Carlson, T.N. and Ripley, D.A. (1997), "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index", *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252
- Gillespie, A.R., Rokugawa, S., Hook, S., Matsunaga, T., Kahle, A.B. (1998), "A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113–1126
- ITT Visual Information Solutions (2010), *ENVI user's guide*
- Lee, H.Y. (1993), "An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands". *Atmospheric Environment*, B 27, 1–13.
- Oke, T.R. (1973), "City size and the urban heat island", *Atmospheric Environment*, 7, 769-779.
- 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
- Van, T.T., Trung, L.V., Lan, H.T. (2009), "Application of Thermal Remote Sensing in Study on Surface Temperature Distribution of Ho Chi Minh City". 7th FIG Regional Conference, Hanoi
- Van De Griend, A.A. and Owe, M. (1993), "On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces", *Int. J. of Rem. Sens.*, 14(6), 1119-1131
- Smith, R.B., (2005) "Computing the Planck Function", CEO, Yale University, 4 pp.
- Ventura, F., Gaspari, N., Piana, S., Rossi Pisa, P. (2009), "Variazione dell'isola di calore urbana sulla città di Bologna negli ultimi 30 anni", 12° Conv. Naz. di Agrometeorologia AIAM, Sassari.
- Young, S.J., Johnson, B.R., Hackwell, J.A. (2002), "An in-scene method for atmospheric compensation of thermal hyperspectral data", *J. of Geophysical Research*
- Zauli Sajani S., Scotto F. (2007), "Il sistema di previsione del disagio bioclimatico in Emilia-Romagna. Studio del fenomeno dell'isola di calore - Area urbana di Bologna". ARPA Regione Emilia-Romagna (*on-line*).

### Ringraziamenti

Il presente lavoro rientra nell'ambito del progetto europeo EnerCity (Central Europe).