

Stima della Temperatura Superficiale Terrestre del territorio di Taranto da dati LANDSAT 8

Francesco Pastore, Eufemia Tarantino, Umberto Fratino

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECH)
Politecnico di Bari, via Orabona 4, 70126 Bari (BA) – Italy,
Tel: +39 080 5963417, e-mail: eufemia.tarantino@poliba.it

Riassunto

La Temperatura Superficiale Terrestre (LST) è un parametro chiave nella comprensione dei fenomeni di scambio energetico che avvengono all'interfaccia tra la superficie terrestre e l'atmosfera sovrastante. La determinazione di questa grandezza è possibile solamente ricorrendo ad opportuni sensori che, sensibili alla radiazione termica infrarossa, sono in grado di eseguire misure di radianza direttamente correlabili alla LST tramite l'Equazione di Trasferimento Radiativo (RTE). In questo lavoro è stato eseguito un tentativo di stima della LST per una porzione di territorio estesa lungo il margine settentrionale della Città di Taranto, caratterizzata da una difficile coesistenza tra quartieri residenziali densamente popolati ed un impianto siderurgico altamente impattante costruito ad immediato ridosso dell'abitato. Lo studio è stato condotto ricorrendo a dati TIR raccolti dal satellite *Landsat 8* che, lanciato in orbita nel febbraio 2013, dopo un primo anno di rodaggio caratterizzato da problemi che ne hanno limitato le potenzialità inizialmente previste, sembra oggi aver raggiunto un adeguato livello di affidabilità (2%).

I risultati, ottenuti impiegando parametri di correzione atmosferica forniti dall'*Atmospheric Correction Parameter Calculator* nella sua versione aggiornata al nuovo *Landsat 8*, evidenziano un generale surriscaldamento delle aree antropizzate rispetto alle aree verdi, con anomalie termiche piuttosto rilevanti ricadenti nel perimetro dell'impianto industriale e compatibili con le attività di produzione interne allo stesso. I picchi termici rilevati hanno trovato una generale conferma in un'analoga procedura di *LST retrieval* condotta su dati TIR appartenenti agli anni passati, raccolti da precedenti versioni della serie satellitare *Landsat*.

Abstract

Land Surface Temperature (LST) is a key parameter in studying phenomena on energy exchange between land surface and atmosphere. LST retrieval is based on measurements from infrared sensors using numerical modeling related to the atmospheric Radiative Transfer Equation (RTE).

In this work LST estimation from *TIRS – Landsat 8* sensor data was calculated on the territory of the industrial area of Taranto (Northwest zone of Taranto) close to a densely populated area.

After the discrepancies noted during the first year of TIRS sensor acquisition, current TIRS data are provided placing the calibration uncertainty beyond an adequate specified performance of 2 percent. In the pre-processing phase the updating version of *Atmospheric Correction Parameter Calculator* was used. The final results show a general overheating of built-up areas consistent with industrial production activities compared with the agricultural ones. Similar resulted thermal anomalies were found on historical data from past Landsat sensors.

Introduzione

Negli ultimi anni si sta riconoscendo un'importanza sempre più crescente allo sviluppo di tecniche e strumentazioni nell'ambito del *remote sensing* orientate alla determinazione della Temperatura

Superficiale Terrestre (LST), dal momento che tale grandezza è sempre più coinvolta in studi di carattere ambientale inerenti temi quali i cambiamenti climatici, l'evapotraspirazione, il bilancio idrologico, le isole di calore in ambito urbano, i monitoraggi sullo stato di salute della vegetazione, la valutazione dei cambiamenti della temperatura superficiale delle acque, solo per citarne alcuni (Li et al., 2013; Tarantino, 2012).

L'11 febbraio 2013 la NASA ha lanciato in orbita il satellite LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) che, dopo 108 giorni di rodaggio, è passato in consegna allo *United States Geological Survey* (USGS) venendo ribattezzato con il nome *Landsat 8*. Ultimo nato della fortunata serie di satelliti statunitensi orbitanti intorno alla Terra sin dal lontano 1972, *Landsat 8* monta due distinti sensori operanti simultaneamente: *OLI* (*Operational Land Imager*), che raccoglie la radiazione elettromagnetica nelle regioni spettrali del visibile, infrarosso vicino ed infrarosso medio, e *TIRS* (*Thermal InfraRed Sensor*) sensibile alla regione dell'infrarosso termico.

Rispetto alle versioni del passato, numerose sono le novità introdotte da *Landsat 8*, tra le quali solo per citarne alcune: il passaggio alla tecnologia di tipo *pushbroom*, ritenuta più affidabile rispetto alla storica tecnologia *wiskbroom* delle serie precedenti; la risoluzione radiometrica a 16 bit, corrispondenti a 65536 potenziali gradazioni di grigio per l'immagine; un numero complessivo di 11 bande spettrali, 9 nella regione dello spettro coperta dal sensore OLI e 2 per il sensore TIRS.

Ai fini degli studi della LST, il passaggio da uno a due canali nella regione spettrale infrarossa termica – *Band 10* (10,60÷11,19 μm), e *Band 11* (11,50÷12,51 μm) – ha costituito la principale novità introdotta dal satellite *Landsat 8*: tuttavia una serie di problemi di calibrazione emersi sin dal mese di agosto del 2013 hanno costretto l'USGS ad invitare l'utenza ad astenersi da analisi qualitative basate su dati di *Band 11*, limitandosi a studi inerenti i dati della sola *Band 10* (USGS, *Calibration Notices* del 29 gennaio 2014). A dispetto delle intenzioni iniziali di progetto, ciò ha di fatto ridotto momentaneamente il satellite *Landsat 8* alla categoria dei sensori termici mono-canale già montati sulle precedenti piattaforme della serie.

Mentre per le precedenti versioni della serie *Landsat* sono ampiamente disponibili in letteratura algoritmi in grado di risalire ad una stima della LST partendo da dati TIR (Qin et al., 2001; Jiménez-Muñoz, Sobrino, 2003; Barsi et al., 2003; Sobrino et al., 2004; Jiménez-Muñoz et al., 2009; Cristóbal et al., 2009), la giovane età del satellite *Landsat 8* ed i relativi problemi di calibrazione hanno fino ad oggi rallentato ogni sviluppo in tal senso. A partire da febbraio 2014, tuttavia, l'*Atmospheric Correction Parameter Calculator* di J. Barsi ha introdotto importanti novità utili al trattamento dei dati termici infrarossi di *Band 10* per *Landsat 8*, candidandosi come il principale riferimento operativo per l'analisi condotta in questo studio.

Area di studio e dati impiegati

Scopo di questo lavoro è l'identificazione di anomalie e picchi termici circoscritti ad una limitata porzione di territorio estesa lungo il margine settentrionale della Città di Taranto, nel sud-est della penisola italiana. Caratterizzata da uno sviluppo planimetrico sostanzialmente pianeggiante, l'area oggetto di studio comprende numerose attività industriali qui concentrate, tra le quali spicca un impianto siderurgico costruito ad immediato ridosso di un quartiere della Città, il quartiere Tamburi, attualmente molto densamente popolato. Oltre al suolo intensamente antropizzato, perché edificato od occupato da edilizia industriale, sono presenti nel territorio in esame ampie estensioni di terreni naturali, incolti o destinati ad uso agricolo, aventi copertura vegetale da densa a piuttosto diradata a seconda delle occorrenze. Completa lo scenario analizzato l'area portuale della Città, affacciata sul Mar Ionio che occupa buona parte della scena esaminata.

Lo studio è stato condotto su quattro dati *Landsat 8* raccolti nel periodo compreso tra luglio e settembre del 2013 aventi, nel sistema WRS-2, coordinate *Path* 188 e *Row* 32. I dati, di livello L1T, vengono distribuiti gratuitamente dall'USGS già sottoposti a correzioni radiometriche e geometriche, georeferenziati rispetto ad una rete di *Ground Control Points* di coordinate note. Inizialmente raccolti con risoluzione geometrica a 100 metri, i dati del sensore TIRS sono ricampionati a 30 metri prima della distribuzione, per consentire una perfetta rispondenza con la

risoluzione geometrica dei dati del sensore OLI. Un resoconto completo circa data ed ora di passaggio del satellite per le scene esaminate è riportato in *Tabella 1*. Per avere conferme circa le distribuzioni delle anomalie rilevate, l'analisi è stata estesa anche ad un dato *Landsat 5* del 16/09/2010 e ad un dato *Landsat 7* del 13/07/2001.

<i>N°</i>	<i>Date acquired</i>	<i>Scene center time</i>
<i>1</i>	22/07/2013	09:37:11 GMT
<i>2</i>	07/08/2013	09:37:14 GMT
<i>3</i>	23/08/2013	09:37:16 GMT
<i>4</i>	08/09/2013	09:37:15 GMT

Tabella 1 – Dati Landsat 8 esaminati (Path:188, Row: 32).

Procedura di LST retrieval

Per prevenire alla definizione della Temperatura Superficiale Terrestre occorre preliminarmente convertire i *Digital Numbers* di codifica di *Band 10* in radianza al sensore, tramite l'espressione

$$L_{\lambda}^{TOA} = \left(\frac{L_{\max,\lambda} - L_{\min,\lambda}}{Q_{cal,\max} - Q_{cal,\min}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal,\min}) + L_{\min} \quad [1]$$

per la quale le grandezze riportate sono reperibili nel *Metadata File* fornito a corredo dei dati scaricati in formato *GeoTIFF*.

La radianza misurata dal sensore per una data lunghezza d'onda λ nella regione TIR è direttamente correlata alla Temperatura Superficiale Terrestre dall'Equazione di Trasferimento Radiativo (RTE),

$$L_{\lambda}^{TOA} = \tau \varepsilon L_{LST} + L_U + \tau (1 - \varepsilon) L_D \quad [2]$$

dove τ è la trasmittività atmosferica, ε è la specifica emissività superficiale, L_{LST} è la radianza di corpo nero della superficie osservata alla specifica temperatura superficiale LST, L_U è la radianza di *upwelling* mentre L_D è la radianza di *downwelling* (Barsi et al., 2005). L'equazione tiene conto del fatto che la radianza captata dal sensore è somma di una complessa serie di processi assorbenti, attenuativi ed emissivi di cui si rendono protagonisti i due elementi fisici sottostanti il sensore: la superficie terrestre e l'atmosfera interposta tra questa e il sensore. Applicando la Legge di Planck è possibile esplicitare la LST per inversione della RTE (Jiménez-Muñoz et al., 2010)

$$LST = \frac{c_2}{\lambda} \ln \left[\frac{c_1}{\lambda^5 \left[\frac{L_{\lambda}^{TOA} - L_U}{\varepsilon \tau} - \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) L_D \right]} + 1 \right]^{-1} \quad [3]$$

dove $c_1 = 1,19104 \times 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, $c_2 = 14387,7 \text{ } \mu\text{m K}$ e $\lambda = 10,800 \text{ } \mu\text{m}$ (lunghezza d'onda media per *Band 10*, come indicata nella curva di risposta spettrale dell'*ACPC*). I parametri τ , L_U ed L_D sono stati determinati ricorrendo all'*Atmospheric Correction Parameter Calculator* (Barsi et al., 2003), un *software* di calcolo consultabile gratuitamente sul Web che restituisce tali grandezze inserendo pochi dati di *input* già in possesso dell'utente (data ed ora GMT di passaggio del satellite, coordinate di un punto della scena, tipologia di sensore *Landsat*). I parametri restituiti dall'*ACPC* hanno valenza puntuale, per cui l'analisi è stata circoscritta ad un ritaglio scenico quadrato di

dimensioni piuttosto contenute (circa 7,5 km di lato) centrato in un punto ricadente nel perimetro dell'impianto siderurgico.

Nonostante il notevole contributo semplificativo offerto dall'ACPC, la determinazione della LST resta un problema matematicamente indeterminato perché a fronte di una sola equazione risolutiva permangono due grandezze incognite: l'emissività ϵ , ovviamente, la LST. In questo studio i valori superficiali di emissività sono stati dedotti dall'NDVI, applicando la procedura dell'*NDVI Thresholds Method* descritta da Sobrino et al., 2004. L'NDVI è stato computato con riferimento alla riflettanza spettrale calcolata, con le formule suggerite dall'USGS, da *Band 4* e *Band 5* per *Landsat 8*:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} = \frac{\rho_{Band5} - \rho_{Band4}}{\rho_{Band5} + \rho_{Band4}} \quad [4]$$

I pixel con $NDVI < 0,2$ sono quelli occupati da suolo nudo o da elementi tipici del tessuto urbano (tetti, strade e superfici antropizzate in generale): ad essi si è scelto di assegnare un valore di emissività pari a $\epsilon_s = 0,95$. Per i suoli questo valore rappresenta un limite inferiore sperimentalmente rilevabile nella regione spettrale 10,50÷12,50 μm (Valor, Caselles, 1996), mentre per strade e tetti di vario materiale è un valore che mediamente potrebbe ritenersi accettabile se si fa riferimento ai risultati di campagne di studio radiometrico effettuate da altri Autori negli intervalli 10,50÷10,95 μm e 10,95÷11,65 μm (Sobrino et al., 2012). I pixel aventi $NDVI > 0,5$ sono considerati come coperti da vegetazione densa e per essi si è assunto un valore di emissività costante pari a $\epsilon_v = 0,99$. Per i pixel, infine, aventi un valore di $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$, ovvero caratterizzati dalla combinazione di suolo nudo (o superfici antropizzate) e suolo densamente vegetato, l'emissività è stata calcolata con l'equazione

$$\epsilon = \epsilon_v P_v + \epsilon_s (1 - P_v) + (1 - \epsilon_s)(1 - P_v) F \epsilon_v \quad [5]$$

con F , fattore di forma, preso pari a 0,55 e P_v , percentuale di vegetazione, calcolata come

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2$$

avendo assunto $NDVI_{\min} = 0,2$ ed $NDVI_{\max} = 0,5$. Non si è ritenuta necessaria l'applicazione di una procedura di correzione atmosferica sull'NDVI, calcolato quindi su dati di riflettanza al sensore, perché la percentuale di vegetazione così ottenuta dovrebbe essere approssimativamente uguale a quella ottenibile da un NDVI corretto dall'attenuazione atmosferica (Carlson, Ripley, 1997).

Un discorso a parte, infine, meritano i pixel occupati da mare, per i quali è stato applicato un valore costante di emissività pari a 0,991 (Snyder et al., 1998).

Analisi dei risultati e limiti della procedura

In Figura 1 si riportano a titolo di esempio i risultati della procedura di determinazione delle emissività per il dato del 23/08/2013, rappresentativi di quelli rilevati anche per gli altri dati esaminati.

Le aree agricole, di colore verde, si concentrano prevalentemente lungo il margine superiore sinistro e laterale destro del ritaglio esaminato, corrispondenti alle zone più lontane dalle periferie della città. Si riscontrano anche distribuzioni di pixel di suolo parzialmente vegetato lungo le direttrici stradali che attraversano la scena, o in corrispondenza delle superfici incolte a ridosso delle banchine portuali. La parte di colore verde intenso in basso a destra del ritaglio corrisponde ai Giardini Peripato, il cuore verde della Città di Taranto.

In blu, invece, sono indicati i pixel di mare: l'ampia zona sulla destra è il Mar Piccolo. Purtroppo la procedura di separazione dei pixel di mare dai pixel di terre emerse ha trovato dei limiti di applicabilità per alcune superfici ricadenti nel perimetro dell'impianto siderurgico, occupate da materiale depositato a cielo aperto avente caratteristiche emissive simili a quelle dei pixel di mare: questo spiega la presenza di pixel azzurri nella parte centrale del ritaglio, in realtà fisicamente non

interessata da alcun corpo idrico superficiale. Completano la scena i pixel di colore marrone, occupati dal costruito (strade, pavimentazioni, edifici urbani o industriali) oppure da terreno totalmente privo di vegetazione superficiale. Il principale limite della procedura di determinazione delle emissività qui condotta si evidenzia proprio nell'incapacità di riuscire a raccogliere in due distinte classi emissive le aree antropizzate e le aree di suolo nudo. A dispetto della sua facilità di applicazione, infatti, l'*NDVI Thresholds Method* non si presta perfettamente a studi termici condotti su aree urbane, essendo stato concepito originariamente per l'analisi di aree agricole.

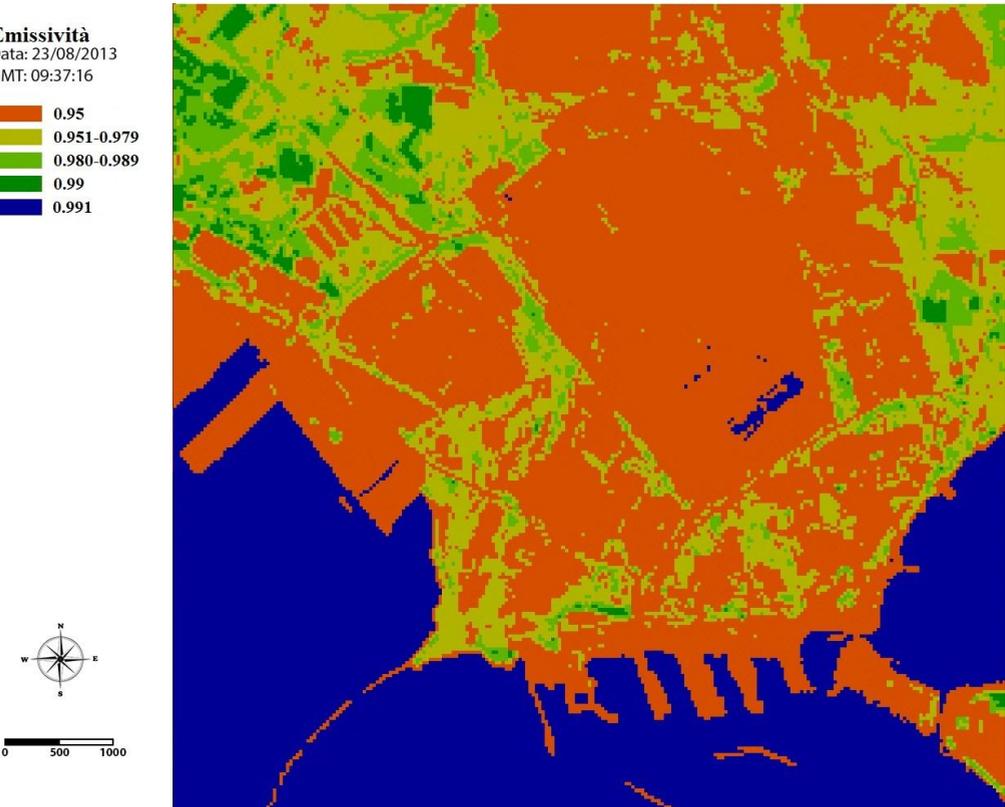
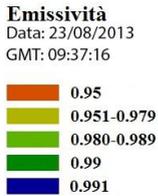


Figura 1 – Andamento dell'emissività superficiale per il dato del 23/08/2014.

In Figura 2 si riporta, sempre a titolo di esempio, l'andamento della LST per il dato del 23/08/2013. Appare sin da subito evidente il netto contrasto termico tra i pixel di mare e quelli occupati da terre emerse, con i secondi decisamente più caldi dei primi. Netto è anche il contrasto tra l'omogeneità termica del mare e la spiccata eterogeneità dei valori di temperatura rilevati per le terre in emersione.

Da un'analisi più approfondita circa la variegata distribuzione spaziale dei valori di temperatura superficiale terrestre emerge che le aree occupate da fabbricati (civili o industriali) o interessate da suolo completamente privo di vegetazione sono tendenzialmente contraddistinte dai valori più alti di temperatura. Al contrario l'impatto della vegetazione è chiaramente leggibile in quelle aree che esibiscono valori più bassi di temperatura, dove solitamente si ritrovano terreni coltivati o comunque occupati da vegetazione spontanea, da densa a meno densa. Significativo è in tal senso il caso dei Giardini Peripato che, seppur inseriti nel contesto urbano, manifestano valori di temperatura superficiale sensibilmente inferiori a quelli del tessuto antropizzato limitrofo.

I valori più elevati di LST per i quattro dati *Landsat 8* esaminati si distribuiscono in corrispondenza dei pixel interni all'area siderurgica, entro la quale tra l'altro si rinvencono anche i picchi termici assoluti del ritaglio scenico esaminato. Ciò è compatibile con la natura delle superfici qui presenti ma anche con le attività lavorative quotidianamente condotte nell'acciaieria, dal momento che i picchi in questione si riscontrano nelle stesse aree sia per il dato *Landsat 5* del 16/09/2010 sia per il dato *Landsat 7* del 13/07/2001. Un quadro statistico riassuntivo dei dati termici rilevati per i ritagli di *Landsat 8* esaminati è riportato in *Tabella 2*.

LST (valori in K)

Data: 23/08/2013
GMT: 09:37:16

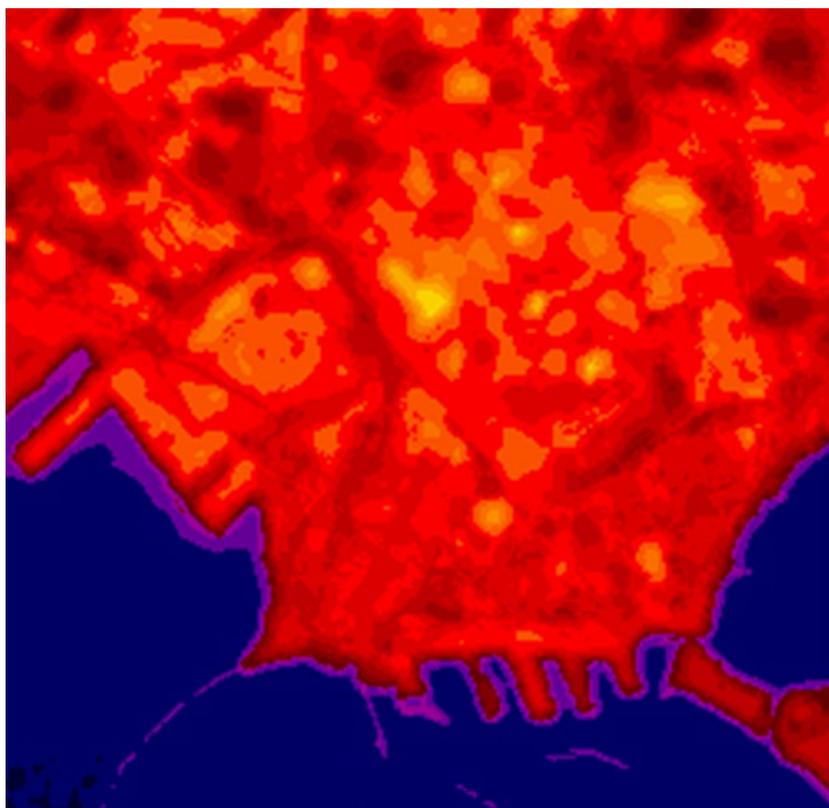
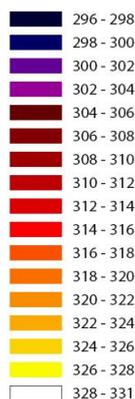


Figura 1 – Distribuzione della LST per il dato del 23/08/2014.

Pur tenendo conto delle difficoltà connesse alla conduzione di una procedura di validazione delle LST (Li et al., 2013), si è comunque cercata una rispondenza tra i valori di LST ottenuti a conclusione dell'analisi e i valori di temperatura per un pixel di mare misurati da una stazione mareografica dell'ISPRA collocata in prossimità del Molo Sant'Eligio. Si è rilevato uno scarto di circa +/-1 K dei valori desunti dalla procedura di *LST retrieval* rispetto a quelli misurati dalla stazione.

<i>Data</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>St. Dev.</i>
22/07/2013	296,30	329,46	308,36	7,17
07/08/2013	298,53	330,81	312,60	8,33
23/08/2013	297,89	325,60	309,63	7,01
08/09/2013	297,79	326,49	308,30	6,56

Tabella 2 – Resoconto statistico dei risultati della procedura di LST retrieval.

Considerato che, per definizione, la temperatura di massa difficilmente corrisponde alla temperatura radiometrica emessa da una superficie (Becker, Li, 1995), il confronto effettuato ha mostrato valori accettabili, dal momento che, come avvenuto in studi inerenti il mare su dati delle precedenti versioni *Landsat*, la temperatura di massa è quasi sempre superiore a quella radiometrica a causa degli scambi di energia e di materia che si verificano all'interfaccia aria/acqua (Palluconi et al., 2005).

Conclusioni

Questo lavoro rappresenta un primo approccio all'esecuzione di una procedura di *LST retrieval* su dati nella regione spettrale dell'infrarosso termico raccolti dal sensore TIRS montato sul satellite *Landsat 8*. Ferme restando le limitazioni connesse alla procedura di determinazione dell'emissività superficiale, lo studio individua valori di LST attendibili rispetto alle caratteristiche superficiali dell'area in esame e rivela anomalie termiche particolarmente intense ricadenti nel perimetro di un impianto siderurgico, costruito ad immediato ridosso della città, evidentemente connesse alle attività del suo ciclo di produzione perché confermate anche da dati TIR appartenenti al passato. Nonostante le difficoltà finora emerse per le bande termiche del sensore *Landsat 8*, questo studio ne illustra le innegabili qualità negli studi di carattere ambientale.

Bibliografia

- Barsi, J. A., Barker, J. L., Schott, J. R. (2003). *An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument*. IGARSS03, 21-25 July 2003, Centre de Congres Pierre Baudis, Toulouse, France.
- Barsi J. A., Schott, J. R., Palluconi, J. D., Hook, S. J. (2005). *Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments*. Proc. SPIE, Bellingham, WA, 2005, vol. 5882
- Becker, F., & Li, Z. L. (1995). Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems. *Remote Sensing Reviews*, 12(3-4), 225-253.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252.
- Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Ninyerola, M., Pons, X. (2009). Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *Journal Geophysical Research*, 114, D08103, doi:10.1029/2008JD010616.
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 108(D22).
- Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 339-349.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J. A., Mattar, C., Franch, B. (2010). Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis atmospheric products. *Remote sensing of Environment*, 114(10), 2195-2210.
- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14-37.
- Palluconi, F., Hook, S., Abtahi, A., Ron, A. (2005). Validation of Landsat 7 ETM+ band 6 radiometric performance. Proc. SPIE 5882, Earth Observing Systems X, 58820C (August 23, 2005); doi:10.1117/12.620013.
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 3719-3746.

- Snyder, W. C., Wan, Z., Zhang, Y., Feng, Y. Z. (1998). Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (14), 2753–2774.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90 (4), 434-440.
- Sobrino, J. A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Bianchi, R., & Paganini, M. (2012). Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. *Remote Sensing of Environment*, 117, 50-56.
- Tarantino, E. (2012). Monitoring spatial and temporal distribution of Sea Surface Temperature with TIR sensor data. *Italian Journal of Remote Sensing*, 44(1), 97-107.
- Valor, E., & Caselles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57(3), 167-184.