

## **Miglioramento della risoluzione spaziale di immagini TIR MODIS su aree costiere**

Sergio Teggi, Francesca Despini, Matteo Serafini

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile, Università di Modena e Reggio Emilia

### **Riassunto**

Il telerilevamento satellitare ed aereo riveste un ruolo fondamentale nella mappatura termica dei corpi idrici poiché consente il monitoraggio di ampie aree quasi in tempo reale. Le bande utilizzate sono quelle dell'infrarosso termico (TIR) e il valore misurato è quello della temperatura pellicolare dell'acqua, ossia dei primi 100  $\mu\text{m}$  di spessore. In questo ambito il principale fattore limite dei dati telerilevati è la risoluzione spaziale. I sensori aviotrasportati acquisiscono immagini ad elevata risoluzione spaziale ma il loro impiego è limitato dai costi e dall'organizzazione richiesta dalle campagne aeree. Le immagini satellitari sono utilizzate frequentemente per la stima della temperatura superficiale dei corpi idrici, ma alcuni elementi territoriali quali canali, laghi di piccole dimensioni e aree costiere spesso non possono essere analizzati a causa della loro ridotta risoluzione spaziale. Il sensore satellitare MODIS dispone di 16 bande nell'infrarosso termico ad una risoluzione spaziale di 1 km. Le immagini MODIS sono distribuite gratuitamente e sono disponibili più volte al giorno in qualsiasi area. Queste caratteristiche rendono il MODIS uno strumento molto utile per il monitoraggio di ampie superfici idriche, ma la risoluzione spaziale non è adeguata per l'analisi delle aree costiere. In questo lavoro è presentato il miglioramento spaziale di immagini TIR MODIS in zone costiere ottenuto tramite l'applicazione dell'algoritmo SWTI (Sharpening Water Thermal Imagery). L'algoritmo è stato applicato a due immagini MODIS acquisite sulla laguna di Venezia e sul delta del fiume Po. La risoluzione spaziale delle immagini è stata migliorata da 1 km a 250 m utilizzando le informazioni delle bande del visibile e vicino infrarosso (VNIR) del sensore stesso. Le performance dell'algoritmo sono state valutate utilizzando come riferimento una coppia di immagini ASTER acquisite simultaneamente a quelle MODIS e sulla medesima area. L'analisi si è basata principalmente sul confronto tra i valori di temperatura ricavati dalle immagini ASTER e quelli calcolati dall'algoritmo SWTI. L'errore quadratico medio determinato escludendo i valori anomali (meno del 5% dei casi) è inferiore a 1.5 K e può essere considerato soddisfacente considerando le accuratezze in temperatura dei sensori ASTER e MODIS. Inoltre, per confermare la validità del miglioramento spaziale prodotto dall'algoritmo, le immagini ASTER di riferimento sono state confrontate anche con le mappature termiche delle aree costiere ottenute tramite una semplice interpolazione bilineare delle immagini MODIS originali.

### **Improvement of the spatial resolution of MODIS coastal waters thermal mapping – Abstract**

Thermal mapping of water bodies is an highly relevant tool for the study of thermal pollution, an issue to which increasing attention is paid. Remote sensing is an useful tool for monitoring large surface in near real time, but the main limiting factor is the spatial resolution. In this work it is shown the spatial improvement of MODIS thermal imagery on coastal water obtained with the SWTI (Sharpening Water Thermal Imagery) algorithm that allows to increase spatial resolution from 1 km to 250 m. SWTI is applied to two MODIS images, acquired on the lagoon of Venice and the delta of the Po river. As a reference we use a couple of ASTER images acquired simultaneously to the MODIS images and on the same areas. The root mean square errors computed excluding outliers are lower than 1.5 K that can be considered satisfactory when compared with the ASTER and MODIS temperature accuracies.

## 1 Introduzione

Aumenti localizzati di temperatura in corpi idrici superficiali, come laghi, fiumi e mari, possono avere importanti effetti negativi sull'ecosistema del corpo idrico stesso. L'inquinamento termico delle acque ha infatti un doppio effetto, essendo in grado di influenzare la vita in un corpo idrico sia direttamente, variandone la temperatura, sia indirettamente andando ad influire su una serie di parametri, tra cui densità dell'acqua, salinità, grado di ossigenazione, che a loro volta si ripercuotono sull'ecosistema esistente [Kay, 2005].

Il telerilevamento satellitare o da aereo rappresenta uno strumento molto valido per la mappatura termica delle acque costiere (mari, laghi) e fluviali. Numerosi sensori acquisiscono infatti informazioni nelle bande dell'infrarosso termico permettendo di ricavare la temperatura della superficie. I sensori satellitari ad oggi operanti sono il MODIS, con 16 bande nel TIR con risoluzione spaziale di 1 km, AVHRR, con 2 bande nel TIR a 1 km, ATSR, con 3 bande nel TIR a 1 km e ASTER, con 5 bande nel TIR a 90m.

Il fattore limitante principale di questi sensori è la risoluzione spaziale, che non permette l'analisi di zone costiere o di corpi fluviali di dimensioni ridotte [Ritchie, 2003].

Il sensore MODIS dispone di 16 bande nell'infrarosso termico alla risoluzione spaziale di 1 km. Le immagini sono disponibili gratuitamente sul sito della NASA, e quindi rappresentano un interessante possibilità di monitoraggio delle mappature termiche su larga scala.

Nel presente lavoro è stato testato un algoritmo per il miglioramento della risoluzione spaziale denominato SWTI [Teggi, in press], che consente il passaggio da una risoluzione di 1 km a 250 m. L'algoritmo utilizza come input informazioni sullo stato di copertura del terreno ricavate dalle bande MODIS nel visibile-vicino infrarosso. Le immagini elaborate sono state acquisite nella zona della laguna di Venezia e del delta del fiume Po.

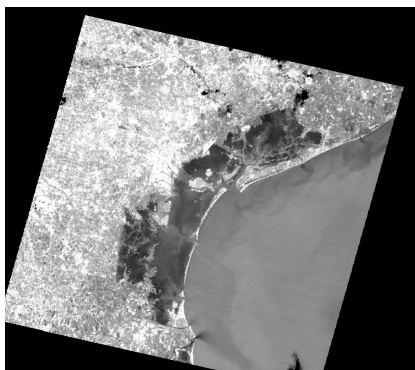
Come riferimento sono state elaborate le medesime immagini MODIS con una semplice interpolazione bilineare (BINT) per il passaggio da 1 km a 250 m.

Una coppia di immagini ASTER acquisite simultaneamente sulla medesima area delle immagini MODIS, sono state invece utilizzate come confronto.

## 2 Metodologia

### 2.1 Data set

In Figura 1 si riporta la prima area di studio: la laguna di Venezia. L'immagine è stata acquisita contemporaneamente dal sensore ASTER e MODIS il 5 settembre 2007. L'area di studio ha un'estensione di circa 3989.8 km<sup>2</sup> corrispondenti a 492563 pixel alla risoluzione spaziale di 90m. Questa area include la totalità della laguna di Venezia e racchiude zone umide, isole (compresa quella urbanizzata di Venezia) e il polo industriale di Porto Marghera, caratterizzato da larghi canali.



*Figura 1 – Area di studio della laguna di Venezia.*

In Figura 2 si riporta invece la seconda area di studio: il delta del fiume Po. L'immagine è stata acquisita contemporaneamente dal sensore ASTER e MODIS il 22 agosto 2008. L'area di studio presenta un'estensione di circa 4004.9 km<sup>2</sup> corrispondenti a 494432 pixel alla risoluzione spaziale di 90m. L'immagine comprende una larga estensione del Delta che si estende indicativamente nella parte orientale delle provincie di Ferrara e Rovigo; questa area è caratterizzata dalla presenza di lunghi tratti di costa, con molte lagune e insenature, spesso paludose, e diramazioni di vari corsi d'acqua con larghezza molto variabile.

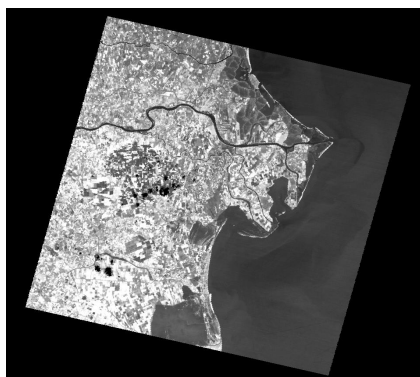


Figura 2 – Area di studio del delta del fiume Po.

### 2.3 L' algoritmo SWTI

L'immagine è stata inizialmente elaborata tramite un algoritmo per il miglioramento della risoluzione spaziale. Questo algoritmo è stato sviluppato partendo dall'algoritmo TsHARP proposto da Agam et al.[2007], ed applicabile ai suoli. L'algoritmo da noi sviluppato invece vuole migliorare la risoluzione spaziale nelle bande dell'infrarosso termico dei pixel costieri (mixed pixel).

Per questo miglioramento vengono sfruttate informazioni sul tipo di copertura della superficie e sullo stato della vegetazione estratte dalle prime due bande nel visibile – vicino infrarosso del sensore MODIS con risoluzione spaziale di 250 m. Un pixel TIR viene definito *costiero* se i sottopixel con dimensione di 250 m che lo compongono sono in parte su acqua e in parte su terra ferma. L'algoritmo è basato principalmente su due ipotesi:

- Hp1: vi è di un buon grado di correlazione fra la radianza emessa nel TIR dai pixel dell'immagine con un set di variabili ricavabili dalle immagini MODIS acquisite alla risoluzione spaziale di 250 m.
- Hp2: la correlazione ipotizzata in Hp1 è invariante rispetto a piccoli cambiamenti di scala, come ad esempio per il rapporto 4:1 (1000 m : 250 m).

Questo algoritmo è ancora in fase sperimentale e la fase più critica, sulla quale si sta maggiormente concentrando l'attività di sviluppo è quella della verifica dei risultati. La spiegazione dettagliata dell'algoritmo, che include anche la validazione dei risultati, esula dagli scopi di questo lavoro e può essere reperita nel lavoro di Teggi [In Press].

### 2.3 Risultati e considerazioni

In Figura 3 ed in figura 4 si riportano le mappature termiche ottenute con l'applicazione dell'algoritmo SWTI o della semplice interpolazione bilineare alle immagini originali. Il miglioramento è evidente già ad occhio nudo, ma sono stati valutati alcuni parametri statistici per quantificare l'efficacia dell'algoritmo. Per quest'ultima operazione ci si è serviti delle immagini ASTER di riferimento.

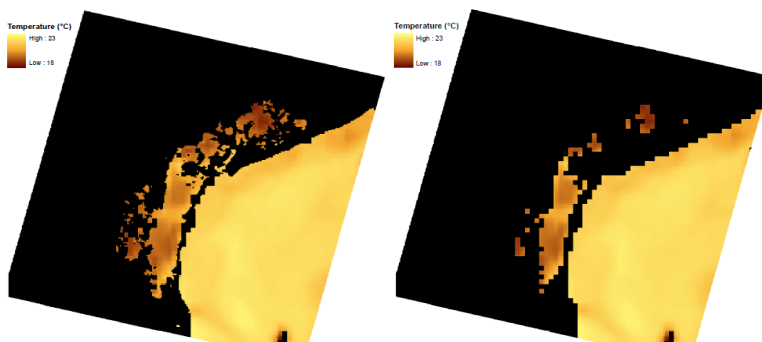


Figura 3 – A sinistra la mappatura termica sulla laguna di Venezia nell'immagine SWTI a destra nella BINT.

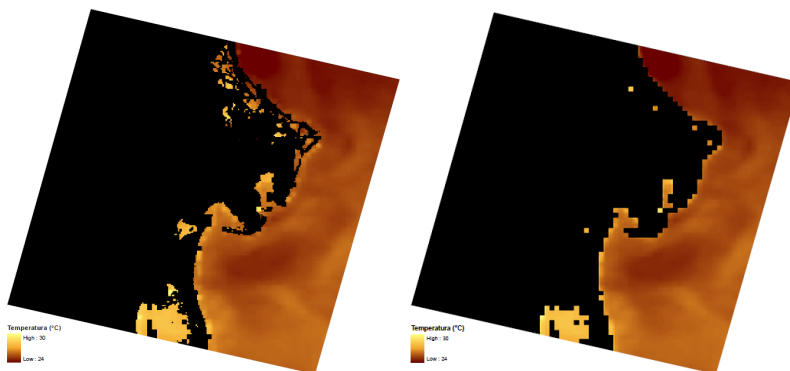


Figura 4 – A sinistra la mappatura termica sul delta del fiume Po nell'immagine SWTI a destra nella BINT.

Innanzitutto è stato necessario ricercare l'errore sistematico di temperatura che persiste tra le immagini MODIS e le immagini ASTER dovuto per esempio alla calibrazione degli strumenti e alle pre-elaborazioni effettuate sulle immagini. Questo errore è stato valutato su pixel puri di acqua ed i risultati sono riportati in tabella 1.

	<i>BIAS</i> (°C)	<i>ST DEV</i> (°C)	<i>S.E.</i> (°C)	<i>AD</i> <sub>0,95</sub> (°C)	<i>r</i> (/)
<b>Area 1: Laguna di Venezia</b>	0,30	0,25	0,39	0,67	0,95
<b>Area 2: Delta del Po</b>	-0,24	0,22	0,32	0,57	0,96

Tabella 1 – Errore sistematico calcolato come la differenza in temperatura tra le immagini MODIS e le immagini ASTER.

Le valutazioni statistiche sono state poi effettuate su due particolari gruppi di pixel denominati k1 e k2. Alla categoria k1 appartengono tutti quei sub-pixel d'acqua pura ottenuti grazie all'applicazione dell'algoritmo sui pixel costieri che alla risoluzione di 1 km erano misti. Alla categoria k2 appartengono invece quei pixel influenzati dalla possibile presenza nel loro intorno di punti il cui valore è stato calcolato dall'algoritmo (k1).

Sono stati calcolati vari parametri statistici, tra i quali il bias tra l'immagine elaborata e l'immagine di riferimento, la deviazione standard, lo standard error, la differenza assoluta al 95-esimo percentile e il coefficiente di correlazione di Pearson.

I risultati sono riportati nelle tabelle 2 e 3.

<b>Area 1 : Laguna di Venezia</b>					
	<i>BIAS</i> (°C)	<i>ST DEV</i> (°C)	<i>S.E.</i> (°C)	<i>AD<sub>0,95</sub></i> (°C)	<i>r</i> (/)
<b>Pixel k1</b>					
MODIS SWTI-ASTER	0,49	0.71	1,05	1,91	0,76
<b>Pixel k2</b>					
MODIS SWTI-ASTER	0,33	0.48	0,76	1,45	0,91
MODIS BINT-ASTER	0,46	0.52	0,87	1,62	0,89

*Tabella2 – Parametri statistici calcolati per la laguna di Venezia.*

<b>Area 2: delta del Po</b>					
	<i>BIAS</i> (°C)	<i>ST DEV</i> (°C)	<i>S.E.</i> (°C)	<i>AD<sub>0,95</sub></i> (°C)	<i>r</i> (/)
<b>Pixel k1</b>					
MODIS SWTI-ASTER	-0,08	0.67	1,98	3,41	0,76
<b>Pixel k2</b>					
MODIS SWTI-ASTER	- 0.16	0.35	0,37	0,72	0,92
MODIS BINT-ASTER	0,19	0.39	0,67	1,35	0,92

*Tabella 3 – Parametri statistici calcolati per il delta del fiume Po.*

Come si può vedere dalle tabelle l'algoritmo risulta efficace, l'errore commesso resta al di sotto di 1 K in ogni caso, e se si considera l'errore sistematico si abbassa ulteriormente. L'errore è quindi inferiore alla precisione dello strumento, sia per quanto riguarda i pixel appartenenti alla categoria k1, sia per quelli di categoria k2.

Per questi ultimi si noti anche il miglioramento portato dall'applicazione dell'algoritmo SWTI rispetto ad una semplice interpolazione bilineare.

### **3 Conclusioni e sviluppi futuri**

L'efficacia dell'algoritmo SWTI è stata testata su due immagini MODIS avendo a disposizione immagini ASTER di riferimento. È stata in questo caso provata con parametri statistici l'efficacia dell'algoritmo.

Sicuramente questo procedimento è da migliorare e sono necessari ulteriori scenari di applicazione dell'algoritmo per verificarne l'efficacia anche in ulteriori casi di studio.

Anche la metodologia di validazione è necessariamente da migliorare:

- Servirebbero dati di validazione a terra;
- Il contributo dell'errore pre-esistente deve essere diviso dall'errore indotto dall'algoritmo.

In un futuro si potrebbe inoltre pensare all'estensione dell'algoritmo ai punti di terraferma

#### 4 Bibliografia

- N. Agam, W. P. Kustas, M.C. Anderson, F. Li and C.M.U. Neale. *A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery*. Remote Sensing of Environment, 107(4):545-558, 2007.
- K. A. Cherkauer, S. J. Burges, R. N. Handcock, J. E. Kay, S. K. Kampf, and A. R. Gillespie. *Assessing satellite-based and aircraft-based thermal infrared remote sensing for monitoring pacific northwest river temperature*. Journal of the American Water Resources Association, 41(5):1149-1159, 2005.
- J. E. Kay, S. K. Kampf, R. N. Handcock, K. A. Cherkauer, A. R. Gillespie, and S. J. Burges. *Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images*. Journal of the American Water Resources Association, 41(5):1161-1175, 2005.
- J. C. Ritchie, P. V. Zimba, and J. H. Everitt. *Remote sensing techniques to assess water quality*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(6):695-704, 2003.
- S. Teggi. *Temperature of coastal waters and of watercourses from ASTER images*. Italian Journal of Remote Sensing, In Press.
- C. Wu, Q. Wang, Z. Yang, and W. Wang. *Monitoring heated water pollution of the dayawan nuclear power plant using tm images*. International Journal of Remote Sensing, 28(5): 885-890, 2007.