

Integrazione di dati telerilevati in modelli idrologici: pre-elaborazione di immagini riprese dai sensori aviotrasportati CASI e ATM

Antonino MALTESE (*), Gino DARDANELLI (**), Goffredo LA LOGGIA (*), Marcella CANNAROZZO (*)

(*) Università Degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Viale delle Scienze, Palermo (Italia), *tel.:091 6657747, fax:091 6657749, email: maltese@idra.unipa.it*

(**) Università Degli Studi di Palermo, Dipartimento di Rappresentazione, Viale delle Scienze, Palermo (Italia), *tel.:091 7028731, fax:091 7028740, email: gidar@dirap.unipa.it*

Sommario

A differenza delle immagini acquisite da piattaforma satellitare, le acquisizioni da sensore aviotrasportato sono spesso caratterizzate da elevata risoluzione sia geometrica che spettrale, inoltre possono essere programmate le direzioni di volo e la quota di acquisizione. A fronte di tali vantaggi, le immagini acquisite sono caratterizzate da elevate distorsioni geometriche difficilmente correggibili con le usuali tecniche di georeferenziazione. Appare invece idonea allo scopo la procedura di georeferenziazione adottata in questo lavoro chiamata "georeferenziazione diretta" in quanto utilizza solamente i dati di navigazione del vettore (posizione del sensore, beccheggio, rollio e deriva), un modello digitale delle elevazioni (DEM), i parametri del geoide, senza ricorrere all'uso di *Ground Control Points* (GCPs). Le immagini, relative al bacino idrografico del torrente Maganoce (Sicilia settentrionale), sono state acquisite tramite sensori immagini multispettrali Deadalus 126 ATM (*Airborne Temathic Mapper*) e CASI-2 (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), in occasione delle campagne NERC-Airborne Remote Sensing Facility effettuate in Sicilia nella primavera del 2005, nell'ambito del programma "Eastern Mediterranean campaign". In questo lavoro sono riportati i risultati delle elaborazioni geometriche, ed i primi risultati sulle calibrazioni radiometriche condotte per ottenere i valori di riflettanza a terra e le temperature superficiali del suolo.

Abstract

Airborne remotely sensed images usually have high either spectral and geometric resolution, although they have high geometric distortions. To this aim a useful procedure has been used, it is called direct georeferencing because it uses only navigation data (sensor position, pitch, roll and yaw), the Digital Elevation Model (DEM) of the area and the geoid parameters, without using any Ground Control Points (GCPs). Images of Maganoce catchments (North Sicily) have been acquire using Deadalus 126 ATM (*Airborne Temathic Mapper*) and CASI-2 (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), during the NERC-Airborne Remote Sensing Facility, "Eastern Mediterranean campaign" in October 2005. In this paper georeferencing procedure and radiometric calibrations, in order to obtain spectral reflectance and land surface temperatures are reported.

1. Introduzione

Durante la primavera del 2005, nell'ambito del NERC *Eastern Mediterranean campaign* è stata effettuata una campagna di acquisizione, sia diurna che notturna, su un bacino sperimentale, con sensori aviotrasportati ATM e CASI-2. Il sensore Daedalus 1268 ATM consta di uno scanner multispettrale con 11 bande spettrali fisse nel visibile (1-5), nell'infrarosso vicino (6-9) – medio (10) – termico (11). Il sensore CASI-2 consta di 17 bande spettrali di cui 8 nel visibile e 9 nell'infrarosso vicino. La risoluzione geometrica nominale delle immagini acquisite è stata di 2-2.5 m. Scopo generale della ricerca è l'utilizzazione, nella modellistica idrologica, di dati telerilevati ad integrazione dei dati tradizionalmente utilizzati, pertanto sono stati acquisiti, congiuntamente, dati di pieno campo quali il LAI, la temperatura del suolo, mediante termometri ad infrarosso non a

contatto e firme spettrali della vegetazione e del suolo nudo. Il modello idrologico adottato schematizza, attraverso sottomodelli, il sistema suolo-vegetazione-atmosfera permettendo di calcolare l'aliquota di risorsa idrica intercettata dalla vegetazione, l'evapotraspirazione, l'infiltrazione verticale nel suolo, il deflusso superficiale, il deflusso profondo ed infine il deflusso attraverso la rete idrografica. In particolare l'intercettazione della precipitazione da parte della vegetazione è stimata schematizzando il sistema mediante serbatoi ed utilizzando un coefficiente di non-intercettazione (*throughfall coefficient* determinato a partire dal *Leaf Area Index (LAI)*, a sua volta stimato tramite l'elaborazione di dati telerilevati (*NDVI, Normalized Difference Vegetation Index*). Il valore del LAI è utilizzato anche nel sottomodello per la stima dell'evapotraspirazione, determinando l'estensione della porzione di suolo vegetato e di quello non vegetato (*two-source model*); per la stima dell'evapotraspirazione sono inoltre utilizzati l'albedo, l'emissività e la temperatura superficiale del suolo, grandezze tutte ottenute a partire da dati telerilevati. Nell'ambito di questa ricerca una fase non secondaria, che costituisce proprio l'oggetto della presente memoria, è stata quella relativa alle pre-elaborazioni delle immagini, ossia alla georeferenziazione, le correzioni atmosferiche e le calibrazioni radiometriche delle immagini acquisite nel visibile – vicino infrarosso, e di quelle acquisite nell'infrarosso termico, sia diurne che notturne.

2. Banca dati

Si è già accennato che per lo studio sono stati utilizzati dati di diversa natura ed origine, per quanto attiene in particolare all'oggetto della memoria, si precisa che la temperatura del suolo è stata misurata con termometro ad infissione durante il transitorio termico crescente su 15 stazioni di misura mentre la temperatura superficiale (LST) del suolo e della vegetazione sono state misurate tramite termometro ad infrarossi non a contatto durante il transitorio termico crescente, sempre su 15 stazioni di misura. I rilievi spettrometrici riguardano irradianza solare, radianza spettrale sia nel visibile che nell'infrarosso medio.

2.1 Metodologia di rilievo dei punti di appoggio GPS

Per le operazioni di progettazione e di rilievo dei punti di appoggio a terra, si è fatto riferimento ad un tradizionale rilievo statico, considerato che nelle zone di volo non erano disponibili stazioni permanenti GNSS (*Global Navigational Satellite System*) che acquisissero i dati con decimazione richiesta (1''). Il rilievo è stato condotto il 16 maggio 2005, in un'unica sessione, con acquisizioni protratte per 14 ore. Per il rilievo sono stati presi in considerazione un punto della rete italiana IGM95, che materializza nel nostro paese il datum EUREF89 (IGM 266701, Menfi, Ponte sul Fiume Carboj) ed un punto posto su di un pilastro metallico, alla sommità del terrazzo del Dipartimento di Rappresentazione, all'interno del campus universitario ed in prossimità della Facoltà di Ingegneria. Questo punto era già stato inquadrato rispetto a tre punti della rete IGM95 sia nel datum internazionale UTM WGS 84 che in quello nazionale Roma 40. L'interdistanza tra i due punti è risultata di circa 67 km. Come detto, il rilievo di appoggio è stato realizzato con due ricevitori e procedura statica con tempi di acquisizione variabili nelle due sessioni (da 7 a 14 ore) e intervallo di campionamento dello strumento di 1'', utilizzando la strumentazione *Topcon Javad mod. Legacy-H*: a causa dei lunghi tempi di acquisizione i ricevitori sono stati equipaggiati anche con batterie tampone. Inoltre, per migliorare la ricezione dell'antenna del punto IGM di Menfi, sono state utilizzate delle prolunghie in acciaio, considerato che lo stesso punto era ubicato in corrispondenza della spalla del ponte in posizione alquanto sottomessa.

2.2 Dati radiometrici di campo

Al fine di calibrare i valori di radianza spettrale $L(\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1})$ delle immagini telerilevate in riflettanza spettrale R (adimensionale) sono necessarie misure spettrometriche di pieno campo.

In questa ricerca sono stati utilizzati due differenti spettroradiometri, un Analytical Spectral Device (ASD) *FieldSpec®FR* operante nel visibile ed infrarosso vicino (VNIR) tra 350 e 1050 nm, gli altri due operanti tra 1050 e 2500 nm (Short Wave Infrared, SWIR1 e SWIR2) ed un Ocean Optic USB2000 operante nel range 350 – 1050 nm.

2.3 Temperatura del suolo

La conoscenza della temperatura del suolo e della vegetazione è importante sia per la stima dell'umidità del suolo che per il calcolo dell'evapotraspirazione. Sebbene le immagini acquisite nell'infrarosso termico possano essere convertite in temperatura di brillantezza, è necessaria una loro calibrazione in temperatura superficiale del suolo (LST). A tal fine sono state acquisite misure di campo utilizzando sia termometri a contatto che non a contatto. Per l'uso dei termometri non a contatto è necessario valutare l'emissività, fattore che, se trascurato, può causare errori maggiori di 2°C (Fuchs e Tanner, 1966). I dati di campo sono stati acquisiti contemporaneamente alle immagini telerilevate (21 Maggio 2005), su 20 stazioni di suolo nudo e vegetato, sia durante il passaggio notturno che durante quello diurno. I valori notturni sono stati acquisiti tra le 4 e le 6 a.m. (orario locale) e variano nell'intervallo 14 - 19 °C, mentre i valori diurni sono stati acquisiti tra le 10 e le 12 a.m. e variano tra 15 e 21 °C.

3. Il caso di studio

L'area di studio è il bacino Maganoce: si tratta di un piccolo bacino situato nel nord-est della Sicilia (2.36 Km²), il cui uso del suolo è caratterizzato da pascolo ed agricoltura cerealicola (grano, frumento, orzo) a sud, ed area boschiva a nord (pini, abeti e cipressi). Da un punto di vista morfologico il bacino ha quote variabili tra 609 e 1017 m s.l.m. con una media di 739 m s.l.m., pendenze variabili tra 0 e 80 percento con una media del 24 percento; infine l'esposizione prevalente è a nord. Da un punto di vista pedologico si ha una prevalenza di inceptisuoli (1.05 Km²) seguiti da entisuoli (0.64 Km²), litosuoli (0.49 Km²), la restante parte sono vertisuoli (0.18 Km²); dal punto di vista geologico i terreni sono prevalentemente derivanti dalla deformazione della piattaforma carbonatica e carbonatica pelagica Trapanese e dalla deformazione del Bacino Imerese. In figura 1 si riportano due immagini panoramiche dell'area di studio.

4. Metodologia di elaborazione e primi risultati

4.1 Metodologia di elaborazione dei punti di appoggio GPS.

Sono state fornite al NERC delle schede riepilogative con le caratteristiche del rilievo effettuato e con i files delle acquisizioni svolte: i dati, però prima di essere consegnati sono stati sottoposti ad un controllo di qualità attraverso il software scientifico TEQC, in modo da verificare che non vi fossero particolari problemi di ricezione, interferenza elettromagnetica o di multipath. Inoltre, sempre a scopo di verifica sono state rideterminate le coordinate dei due punti, considerando la baseline risultante, mediante il software commerciale *Pinnacle* 1.0. nel sistema UTM-WGS84; sono state fissate alternativamente le coordinate dei due punti e si sono ottenuti scarti nelle componenti inferiori al centimetro.

4.2 Georeferenziazione diretta di immagini acquisite da sensori aviotrasportati.

Le immagini acquisite da sensori aviotrasportati sono caratterizzate da deformazioni geometriche molto maggiori rispetto a quelle acquisite da piattaforma satellitare per via dell'influenza della morfologia sulla bassa quota di volo, del campo di vista molto esteso ed infine per la instabilità di navigazione del vettore. La procedura è chiamata georeferenziazione diretta in quanto utilizza soltanto dati di navigazione (posizione del sensore, beccheggio, rollio e deriva), il Modello Digitale delle Elevazioni (DEM) dell'area e i parametri del geode, senza l'utilizzo di punti di controllo a terra (*Ground Control Points*, GCPs). I parametri di navigazione vengono applicati per ciascuna

linea di scansione. Poiché tutte le distorsioni possono essere contemporaneamente presenti, non è semplice distinguere le une dalle altre. Le immagini, acquisite sia in direzione da Nord a Sud che da Est verso Ovest, sono state georiferite rispetto al Sistema di Coordinate Geografico (GCS) UTM WGS84 Zona 33N. Sebbene l'IFOV (*Instantaneous Field of View*) del CASI e dell'ATM siano differenti (1.84 ed 2.5 mrad rispettivamente) è stata scelta una unica risoluzione di output in quanto la quota dell'area di studio è altamente variabile (tra 909.5 e 1028 m. s.l.m.). Il controllo degli errori residuali delle immagini ATM e CASI georiferite, rispetto alla Carta Tecnica Regionale (CTR), ha evidenziato non trascurabili differenze, le ATM presentavano errori residuali inferiori rispetto alle CASI sebbene le immagini siano state acquisite contemporaneamente. Ciò dipende dalle diverse modalità operative dei sensori. L'ATM è un sensore del tipo *push-broom* (Rees 2005) quindi acquisisce una linea di scansione alla volta, mentre il CASI opera in modalità *whisk-broom*: uno specchio oscilla da lato a lato acquisendo la radianza incidente pixel per pixel. La disponibilità dei parametri di navigazione dipende dalla frequenza di acquisizione del GPS e le immagini *whisk-broom* necessitano di una maggiore frequenza di acquisizione GPS.

4.2 Elaborazione dati radiometrici di campo

La riflettanza spettrale della generica superficie $R_{T(\lambda)}$ è stata calcolata per mezzo dell'equazione 1.

$$R_{T(\lambda)} = \frac{L_{T(\lambda)}}{L_{wp(\lambda)} / R_w(\lambda)} \quad [1]$$

dove $L_{T(\lambda)}$ è la radianza misurata sulla superficie, $L_{wp(\lambda)}$ è la radianza misurata su un pannello di riferimento in solfato di bario o politetrafluoroetilene, $R_w(\lambda)$ è la curva di calibrazione (RSR, *Relative Spectral Response*) specifica del pannello bianco che si sta utilizzando. La RSR è la riflettanza del pannello di riferimento, prossima al valore unitario (bianco), e serve a valutare correttamente la radianza incidente. Al fine di calcolare i valori di riflettanza corrispondenti alle bande dei sensori si deve tenere conto delle risposte spettrali di ciascun sensore. In figura 1 vengono riportate le firme spettrali $R_{T(\lambda)}$ acquisite su asfalto, suolo nudo arato e strada non asfaltata in materiale calcareo incoerente.

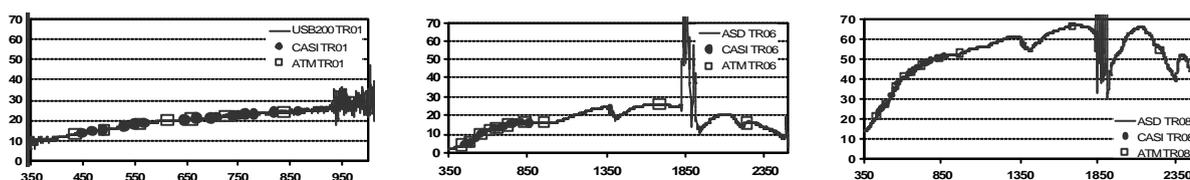
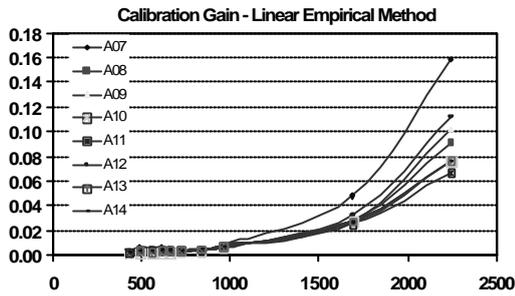


Figura 1 – Firme spettrali su asfalto (a sinistra, USB2000), suolo nudo arato (a centro, ASD Field Spec Pro FR) e strada non asfaltata in materiale calcareo incoerente (a destra, ASD Field Spec Pro FR).

4.3 Calibrazione in riflettanza spettrale – metodo empirico lineare.

Le immagini devono essere calibrate in riflettanza spettrale e corrette dall'effetto della colonna atmosferica. Un metodo per conseguire nel contempo entrambi gli obiettivi è l'empirico lineare (Karpouzli e Malthus, 2003). Il metodo empirico lineare richiede la presenza di target a terra a riflettanza rilevata al momento del passaggio del sensore, poiché la riflettanza misurata a terra è esente dagli effetti atmosferici. Al fine di avere, all'interno dell'immagine, almeno un pixel omogeneo, il target deve essere di dimensioni almeno pari a 3 volte il pixel dell'immagine. Individuare targets con queste caratteristiche non è solitamente problematico per le immagini acquisite da sensore aviotrasportato, mentre spesso lo diventa per immagini satellitari con bassa risoluzione geometrica. Nella presente ricerca si sono utilizzati 3 target: un suolo nudo arato (pixel scuro), una strada non asfaltata in materiale calcareo incoerente (pixel chiaro), una strada asfaltata (pixel intermedio). I pixel erano visibili su più di una strisciata con angoli zenitali diversi: si è scelto

di utilizzare quelli (in tutto 14) i cui angoli zenitali erano inferiori a 15°, in modo da approssimare quanto più possibile la visione nadirale.



Centro banda	m*	-q*/m*
436	0.0017	3396
494	0.0037	862
562	0.0037	826
615	0.0038	491
661	0.0037	357
726	0.0033	229
839	0.0046	87
962	0.0069	58
1693	0.0301	2
2244	0.0949	0

Figura 2 – pendenza della retta di calibrazione del metodo empirico lineare (sulla sinistra) per le varie strisciate, e parametri del metodo empirico lineare per la strisciata media (sulla destra).

In figura 2 si riportano le pendenze della retta di calibrazione per le varie strisciate al variare della banda spettrale (a sinistra), per facilitare la lettura i valori della dispersione sono uniti da linee smussate, ed i valori medi di pendenza e correzione atmosferica al variare della banda spettrale (a destra).

4.4 Calibrazione dell'infrarosso termico

La radianza totale acquisita dal sensore L è data da diversi contributi (2), fra i quali sono uno è legato alla temperatura superficiale del suolo (Liang, 2004):

$$L = L_s t + (1-t)L_a^p = \left[e L_s^e (T_s) + (1-e)L_a^d \right] t + (1-t)L_a^p \quad [2]$$

dove, L_s è la radianza proveniente dalla superficie, L_a^p la radianza associata con il percorso atmosferico, t è la trasmittività atmosferica, L_s^e (comunemente chiamata LST, *Land Surface Temperature*) è la radianza emessa dalla superficie, e è l'emissività del suolo, L_a^d è la radianza atmosferica discendente. Nell'ipotesi di trasmittività ed emissività unitarie, la radianza spettrale acquisita dal sensore nel campo emissivo dello spettro coincide con la radianza emessa dalla superficie ed è convertita in temperatura di brillantezza T_s^B [K] al top dell'atmosfera utilizzando una relazione analoga all'equazione di Planck (3) con due parametri K_2 e K_1 (4, 5) (Wukelic et al., 1989).

$$T_s^B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad \text{con} \quad K_2 = 1.43876869 \nu = 1338.409[\text{K}] \quad \text{e} \quad K_1 = 1.190956110^{-16} \nu^5 = 829.57[\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{mm}^{-1}] \quad [3]$$

dove $\nu = 10000/I[\text{mm}] = 93023$ è il numero d'onda medio, funzione della lunghezza d'onda centrale. Le temperature di brillantezza sono state convertite in *Land Surface Temperature* assumendo una relazione lineare tra la temperatura di brillantezza e la LST misurata in pieno campo durante le acquisizioni sia durante il volo diurno che durante quello notturno. I risultati della calibrazione, riportati in figura 3, mostrano che, nonostante l'ipotesi di linearità sia strettamente verificata per emissività unitaria o in assenza del contributo di radianza atmosferica, essa risulta confermata, anche in questo caso, dalla stessa distribuzione dei punti.

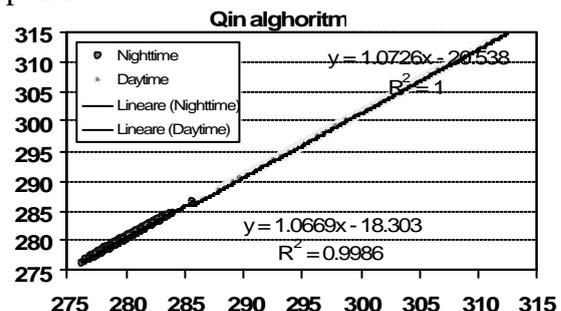
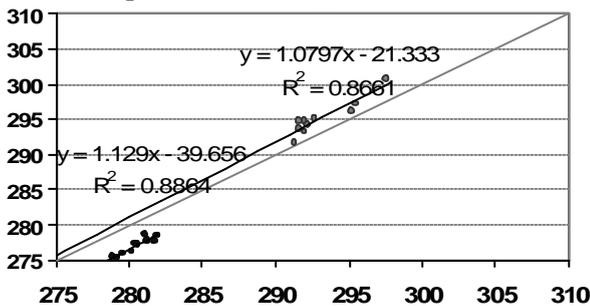


Figura 3 – Rette di calibrazione banda termica ATM

Correlazione lineare tra LST [K] (ordinate, Qin et al.) e temperatura di brillantezza [K] (ascisse).

I risultati sono stati confrontati con l'equazione di calibrazione a canale singolo di Qin et al. (2001) messo a punto specificatamente per le immagini acquisite dal sensore *Thematic Mapper* su piattaforma satellitare Landsat. Sebbene quest'ultimo abbia caratteristiche spettrali molto simili all'*Airborne Thematic Mapper* è da evidenziare che in tale metodo vi sono molte relazioni di natura empirica appositamente calibrate per il sensore satellitare. Dal confronto tra il pannello a destra ed a sinistra della figura 4 si nota che entrambi i metodi (calibrazione empirica e Qin et al.) restituiscono la stessa relazione per l'immagine diurna sia in termini di coefficiente angolare (1.080 vs 1.073 rispettivamente) che di intercetta (-21.33 vs -20.54 rispettivamente). L'immagine notturna viceversa mostra parametri di calibrazione contrastanti con quelli determinati utilizzando l'algoritmo di Qin et al. (2001): la pendenza di calibrazione è infatti superiore (1.129 vs 1.067), mentre l'intercetta è più bassa (-39.66 vs -18.30).

5. Conclusioni.

La metodologia di georeferenziazione adottata consente di georeferire immagini per le quali sarebbe difficoltoso localizzare GCPs con accuratezza, quali immagini notturne o laddove le distorsioni indotte dall'instabilità del vettore e dalla morfologia del suolo non siano correggibili con altre metodologie. Il modello empirico lineare è una valida alternativa ai ben più complessi modelli di trasferimento radiativo. L'alta risoluzione geometrica delle immagini acquisite da sensore aviotrasportato consente di identificare un buon numero di superfici omogenee con caratteristiche tali da consentire la calibrazione radiometrica e la correzione dalla diffusione atmosferica con ottima accuratezza. Infine il metodo di calibrazione della banda termica restituisce risultati in accordo con Qin et al (2001). per le immagini diurne, mentre i risultati della calibrazione notturna risultano in parziale disaccordo; peraltro il metodo proposto dai suddetti autori è ottimizzato per le immagini Landsat, le quali sono acquisite di giorno. I coefficienti di determinazione trovati indicano che tale metodo di calibrazione risponde bene alle esigenze pratiche di calibrazione per immagini termiche a singolo canale per le quali non sono adottabili procedure rigorose in vero senso a punto per i sensori meno diffusi.

Ringraziamenti

Si ringraziano G. Ciralo, C. Fontanazza, V. Karpuzli, A. La Motta, C. Lo Re, T. Malthus, G. Manca, S. Nizza, H. Nollet, V. Notaro, G. Scordo e D. Tuttolomondo per i dati di campo.

Riferimenti bibliografici

- Fuchs M., Tanner C.B. (1966). "Infra-red thermometry of vegetation" *Agron. J.* 58: 597-601.
- Hatchell David C., (1999). – "Analytical Spectral Devices" *Inc. (ASD) - Technical Guide*, 4 Ed.
- Karpouzli E., Malthus T. (2003). "The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery" *International Journal of Remote Sensing*, Volume 24, Issue 5 March 2003, pages 1143-1150.
- Liang S. (2004). *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*, Wiley-Interscience. USA 2004.
- Qin et al. (2001): "A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region". *IJRS 2001* vol 22 n° 18, 3719-3746.
- Wukelic, G. E., D. E. Gibbons, L. M. Martucci, and H. P. Foote. (1989). "Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band" *Remote Sens. Environ.* 28: 339-347.