

Confronto radiometrico di dati MODIS e ETM+ basato su tecniche statistiche multivariate

T. BELLONE(*), E. BORGOGNO MONDINO (*), F. PEREZ (*), V. TODISCO(*)

(*) DITAG - Politecnico di Torino, TORINO, Italy
(tamara.bellone, enrico.borgogno, francesca.perez, vittoria.todisco)@polito.it

Riassunto

La complessità dei fenomeni osservati e la gran mole di dati che le discipline afferenti alla Geomatica sono in grado di fornire suggeriscono l'adozione di strumenti statistici avanzati. Nel presente lavoro vengono presentati alcuni risultati relativi all'applicazione di tali strumenti all'ambito del confronto radiometrico di immagini satellitari multispettrali acquisite dai sensori Terra-MODIS e Landsat 7-ETM+. In particolare sono state considerate le bande del Rosso (Red) e dell'Infrarosso Vicino (NIR) disponibili per entrambe le tipologie di dato. Il confronto, nelle sue premesse, è condizionato, oltre che dalle risposte dei sensori e dalle rispettive ampiezze e posizione di banda, soprattutto dalla differente risoluzione geometrica che caratterizza le due tipologie di dato. Al fine di garantire una coerenza spaziale tra celle nelle scene coeve è stato necessario provvedere alla loro co-registrazione. La disparità dimensionale, connessa alle diverse risoluzioni geometriche dei dati, ha imposto di sviluppare una opportuna procedura per l'estrazione dei campioni da confrontare. La metodologia di confronto proposta ha permesso non solo di quantificare le differenze radiometriche esistenti tra i dati, ma anche di indagarne l'eventuale dipendenza dalla diversa risoluzione geometrica.

Summary

The great amount of data that Geomatics techniques can supply suggest the adoption of advanced statistical tools to comparing them and investigate their properties. In this work some results concerning the radiometric/spectral comparison of Terra-MODIS e Landsat 7-ETM+ images are presented. In particular the Red and Near InfraRed bands are considered. Comparison is heavily conditioned by sensor calibration, spectral ranges and, above all, by the different spatial resolution of the compared datasets (250 m for MODIS and 30 m for ETM+). In order to guarantee a high degree of spatial coherence between images great attention was paid to the co-registration problem. Furthermore, a specific sampling procedure was developed to extract from images the homologous pixels to be compared each other. The proposed methodology permitted to quantify spectral differences between the data and to investigate their dependencies from spatial resolution of datasets.

Obiettivi

Le caratteristiche di risoluzione temporale (1 immagine al giorno), risoluzione spettrale (36 bande) e radiometrica (12 bit) e l'assoluta economicità (gratuito) hanno reso il dato Terra-MODIS un valido strumento di lavoro in molti ambiti. Restano molte limitazioni relativamente alla ridotta risoluzione geometrica (250 m, 500 m, 1000 m) soprattutto in ambiti territoriali (come quello italiano) ad elevata frammentarietà delle coperture delle superfici. Limitando l'indagine alle bande 1 (Red: 620-670 nm) e 2 (NIR: 841-876 nm) di Terra-MODIS, nel corso della ricerca descritta in questo lavoro è stata indagata la differenza spettrale che esiste tra il dato MODIS e quello corrispondente ETM+ (Red: 630-690 nm, NIR: 760-900 nm) al fine di quantificarla e possibilmente

descrivere le dipendenze dalla risoluzione geometrica del dato considerato in un ambito territoriale ad elevata variabilità. Le tecniche di confronto adottate, ed applicate alle bande preventivamente calibrate in valori di riflettanza e corrette dal disturbo atmosferico, sono di tipo statistico (anche di analisi multivariata). Considerando parametro sensibile l'effettiva omologia tra le bande messe a confronto, grande attenzione è stata posta al problema della loro co-registrazione ed una opportuna procedura per l'estrazione delle celle omologhe è stata sviluppata.

Dati disponibili

Il confronto radiometrico/spettrale è stato condotto su due coppie di immagini coeve acquisite dai sensori Terra-MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) e Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) rispettivamente negli anni 2000 e 2002. L'area test è una porzione della costa settentrionale della Sicilia, come mostrato in Figura 1. In riferimento alle 2 immagini MODIS, è stato utilizzato il prodotto denominato MOD02QKM - "MODIS/Terra Calibrated Radiances 5-Min L1B Swath 250m" (Toller, 2003). Le immagini di tipo 1B risultano calibrate in valori di radianza e riflettanza e georiferite. Le immagini sono state ottenute gratuitamente dal sito internet EDG (EOS Data Gateway) della NASA. Le 2 immagini ETM+ utilizzate sono di tipo ESA CEOS. Sono stati predisposti due *dataset* (ciascuno contenente una immagine MODIS e una ETM+ coeve), relativi al periodo estivo di anni diversi (02/08/2000, 07/07/2002). Le principali caratteristiche delle due tipologie di dato utilizzate sono mostrate in Tabella 2.

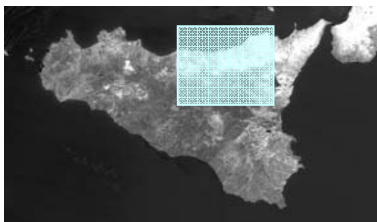


Figura 1. Area test.

	Terra-MODIS	Landsat7-ETM+
Bandwidth specifications	Band 1: 620-670nm Band 2: 841-876 nm	Band 3: 630-690 nm Band 4: 780-900 nm
Spatial resolution	250 m	30 m
Radiometric resolution	12 bits	8 bits
Data Frequency	2 days (global coverage)	16 days (seasonal global coverage capability)

Tabella 2. Caratteristiche delle immagini MODIS and ETM+.

Pre-processamento radiometrico

Al fine di eliminare la maggior parte delle differenze sistematiche tra la radiometria dei due tipi di dati, è stato necessario procedere ad alcune pre-elaborazioni.

Le immagini ETM+ sono state calibrate in valori di riflettanza (irradianza solare considerata al limitare esterno dell'atmosfera) impiegando una procedura sviluppata dal gruppo di ricerca. Entrambe le tipologie di dato sono poi state corrette:

- dal disturbo atmosferico attraverso una procedura semplificata di *Dark Subtraction* calibrata sulla base di celle d'ombra rinvenute sulle scene;
- dagli effetti della geometria dell'illuminazione (posizione del sole e topografia della scena).

Procedura di co-registrazione per l'estrazione dei campioni da confrontare

Da un punto di vista operativo, qualora si intendano confrontare due tipologie di dati differenti (MODIS e ETM+), occorre garantire la loro omologia co-registrandole. In questo modo, si assume in questa sede che le immagini risultino geometricamente coerenti, cioè che le celle che rappresentano la stessa porzione di territorio risultino sovrapponibili. Qualunque considerazione inerente il confronto radiometrico risulta fortemente condizionata dall'accuratezza di tale operazione. Occorre perciò definire una procedura idonea a rappresentare e formalizzare la relazione geometrica che lega tra loro le matrici campionate dai due sensori.

Benché i satelliti Landsat 7 e Terra orbitino lungo la stessa traiettoria, le immagini acquisite rispettivamente dai sensori ETM+ e MODIS presentano una geometria molto differente, non solamente dovuta alla diversa risoluzione geometrica. Tale sfavorevole condizione rende

difficoltoso procedere direttamente ad una co-registrazione *image-to-image* basata su modelli geometrici 2D. Tale condizione appare ulteriormente aggravata dall'impossibilità di collimare un elevato numero di punti di appoggio connessa con la difficoltà di interpretazione dei particolari sulla scena MODIS. Questo impone aggiuntive restrizioni alla scelta del modello di trasformazione, il cui numero di parametri deve necessariamente mantenersi limitato. Un modello di trasformazione diretto e globale (unico per l'intera area) che relazioni lo spazio MODIS a quello ETM+ risulta dunque inadeguato rispetto ai requisiti di omologia tra le scene. Sulla base di tali considerazioni sono state quindi valutate a priori le differenze di posizionamento planimetrico relativo (*RPE*) atteso dovute al rilievo topografico ed alla geometria della presa, considerando che l'area di studio presenta quote ortometriche variabili tra 0 e 1800 m). Lo schema operativo utilizzato in questa fase è quello di Figura 3.

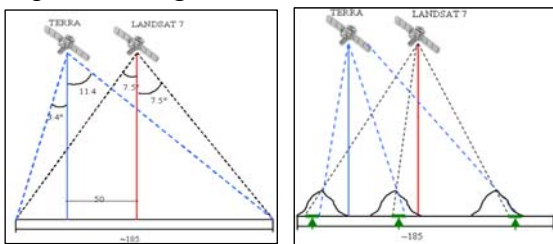


Figura 3. (Sinistra) Schema di acquisizione dei due satelliti; (Destra) Variabilità dell'errore di posizionamento planimetrico relativo dovuto alla topografia (riferita all'estensione della scena ETM+).

La distanza media tra le tracce orbitali al suolo al momento dell'acquisizione della stessa area, valutata considerando l'ingombro delle scene comunicato all'interno dei metadati forniti con le immagini, risulta di circa 50 km. Le distorsioni relative (*RPE*) (riferite all'estensione della scena ETM+) sono state calcolate per diversi valori di quota ($H = 2000, 1000, 500$ m). I risultati sono mostrati in Tabella 4 e mostrano valori che non possono certo essere corretti con una semplice trasformazione 2D. Tale valutazione ha suggerito di procedere all'ortoproiezione indipendente delle due scene.

Quota (m)	RPE min (m)	RPE min (n. celle Landsat)	RPE max (m)	RPE max (n. celle Landsat)
2000	141	4.7	162	5.4
1000	70	2.3	81	2.7
500	35	1.2	41	1.4

Tabella 4. Variabilità dell'RPE al variare delle quote all'interno della scena

Un Modello di Elevazione del Terreno con passo di 50 m ed una precisione altimetrica dichiarata di 2.5 m è stato usato per la generazione delle ortofoto. In questa fase sono stati utilizzati 10 punti di appoggio (GCPs), collimati sulle immagini e su una cartografia vettoriale di riferimento (scala 1:25.000, sistema di riferimento ED 50 UTM 32N) in corrispondenza di elementi riconoscibili appartenenti alla costa ed alle sponde dei corpi idrici interni. Le immagini ETM+ sono state corrette utilizzando il software commerciale *OrthoEngine PCI Geomatics 9.0* che dispone del modello rigoroso relativo a questo tipo di sensore. L'accuratezza risultante (RMSE, *Root Mean Square Error*), misurata su 3 punti di controllo, è risultata essere di 0.7 celle Landsat 7 (cioè circa 20 metri) per entrambe le immagini. Le bande 1 e 2 delle immagini MODIS sono state invece ortoproiettate utilizzando il metodo dei polinomi fratti del primo ordine (RFM, *Rational Function Model*). Gli RMSE risultanti (calcolati direttamente sui punti di appoggio, a causa della maggiore difficoltà di riconoscimento di punti di controllo ulteriori) si sono attestati, per entrambe le scene, intorno a 0.45 celle MODIS (circa 112 m). Per garantire una migliore co-registrazione tra le scene ortoproiettate si è successivamente proceduto all'applicazione di una opportuna trasformazione *image-to-image*.

$$c_L = \frac{A_1 \cdot c_M + A_2 \cdot r_M + A_3}{A_4 \cdot c_M + A_5 \cdot r_M + 1}$$

$$r_L = \frac{A_6 \cdot c_M + A_7 \cdot r_M + A_8}{A_9 \cdot c_M + A_{10} \cdot r_M + 1}$$

dove:

A_i : parametri del modello

c_L, r_L : coordinate immagine ETM+

c_M, r_M : coordinate immagine MODIS

[1]

Alcune verifiche preventivamente condotte hanno mostrato, anche a questo livello, una sostanziale inadeguatezza del modello di trasformazione polinomiale bidimensionale (disponibile nella

maggior parte dei *software* commerciali), la cui applicazione generava RMSE di circa 4 celle ETM+.

E' stata pertanto sviluppata (in ambiente *IDL*, *Interactive Data Language*) dagli autori una specifica procedura in grado di calibrare e applicare alle scene una trasformazione polinomiale razionale 2D del primo ordine (*RF1*, [1]) che lega gli spazi immagine ETM+ (*base image*) e MODIS (*warp image*). La differenza di risoluzione tra i due tipi di dati produce inevitabilmente una non trascurabile incertezza nella collimazione di idonei punti di appoggio con cui procedere alla stima dei parametri del modello; sull'immagine MODIS, infatti, l'esatta ubicazione del particolare collimato sull'immagine ETM+ (risoluzione di 30 m) si muove all'interno di una finestra ampia quanto la cella MODIS stessa (risoluzione di 250 m). Per ridurre l'effetto di tale incertezza nella fase di stima dei parametri di *RF1*, è stata sviluppata dagli autori una specifica procedura di affinamento della collimazione dei punti di appoggio. Tale procedura stima i parametri della trasformazione inversa di *RF1* (*RF2*, [2]) relazionando lo spazio immagine MODIS (*base image*) a quello ETM+ (*warp image*). Sulla base degli scarti alle osservazioni ottenuti in fase di stima ai Minimi Quadrati dei parametri di *RF2*, le cifre decimali delle coordinate immagine MODIS dei punti di appoggio originali (c_M , r_M) vengono spostate a minimizzare l'errore RMSE, mentre le coordinate ETM+ restano invariate.

$$c_M = \frac{B_1 \cdot c_L + B_2 \cdot r_L + B_3}{B_4 \cdot c_L + B_5 \cdot r_L + 1}$$

$$r_M = \frac{B_6 \cdot c_M + B_7 \cdot r_M + B_8}{B_4 \cdot c_L + B_5 \cdot r_L + 1}$$

dove:

B_i : parametri del modello

c_L, r_L : coordinate immagine ETM+.

c_M, r_M : coordinate immagine MODIS

[2]

I punti di appoggio, corretti secondo tale procedura, vengono utilizzati per la stima dei parametri di *RF1*. Gli RMSE risultanti applicando questa metodologia ai due *dataset* utilizzati sono riportati in Tabella 5.

2000 dataset RMSE (n. celle ETM+)	2002 dataset RMSE (n. celle ETM+)
0.91	1.05

Tabella 5. RMSE ottenuti a seguito di co-registrazione tra le scene per i 2 set di dati.

L'intero processo di confronto radiometrico/spettrale condotto è basato sulla procedura appena descritta. E' questa che si occupa di rintracciare la corrispondenza geometrica tra celle omologhe nelle due scene considerate. Tale operazione viene realizzata trasportando i 4 angoli della cella MODIS nello spazio ETM+ (S_{rif}). Questo permette di individuare in S_{rif} un poligono (P_L) che contiene le celle ETM+ che risultano corrispondenti alla singola cella MODIS di partenza.

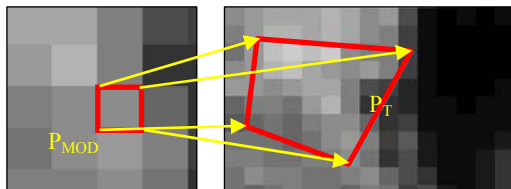


Figura 6. La procedura per l'estrazione delle celle omologhe tra l'immagine MODIS ed ETM+ agisce trasportando secondo *RF1* gli angoli di ciascuna cella MODIS nello spazio di ETM+.

Le celle appartenenti a P_L sono quelle che contribuiscono alla riflettanza totale registrata come singolo valore dal sensore CCD di MODIS. Ai fini del confronto radiometrico/spettrale i campioni confrontati sono costituiti dal valore di riflettanza di ciascuna cella MODIS e dalla media dei valori di riflettanza delle celle ETM+ ricadenti all'interno del P_L corrispondente. E' la procedura sviluppata che si occupa del prelievo dei valori e dei calcoli necessari, fornendo, per ciascuno dei due *dataset* considerati (2000 e 2002), come risultato un file di testo a 4 colonne [Red MODIS, Red ETM+, NIR MODIS, NIR ETM+].

Il file contiene una riga per ciascuna cella MODIS (per l'anno considerato). Risulta cioè rappresentativo dell'intera scena relativa all'area di studio. In termini statistici i dati generati costituiscono delle popolazioni che devono essere opportunamente campionate.

Confronto statistico tra campioni mutivariati

Per confrontare le medie di due campioni, nel caso univariato si ricorre al test t di Student, se la popolazione da cui viene estratto è normale, o al test z (normale standardizzata) se il campione è numeroso, pur non essendo normale, o ove necessario a test non parametrici. Nel caso multivariato, si ricorre generalmente al test di *Hotelling* (test T^2) per la differenza delle medie: la statistica

$$T^2 = n(D - \delta)^T S_d^{-1} (D - \delta) [3] \text{ è posta a confronto, nel caso di campioni normali, con } \frac{(n-1)p}{(n-p)} F_{p, n-p}(\alpha) [4]$$

e con $\chi_p^2(\alpha)$ [5] per campioni numerosi (anche se non normali).

Si ricorda che n è la numerosità del campione, p il numero di tipi di osservazioni (la distribuzione è p -variata), α il livello di significatività del test. D è il vettore delle medie tra le differenze nei due campioni e δ è il vettore del valore ipotizzato per le differenze medie (spesso pari a zero). Si prenda in considerazione il *dataset* del 2000, costituito dai due campioni corrispondenti rispettivamente alle riflettanze delle celle MODIS e alla media della riflettanza ETM+ delle celle appartenenti al poligono omologo. La distribuzione risulta bivariata ($p=2$: i valori argomentali sono i valori di riflettanza delle bande Red e NIR). Per determinare l'ordine di grandezza di numerosità del campione da prendere in considerazione, si ricorre alla formula utilizzata per il caso univariato:

$$n = 2(z_\alpha + z_\beta)^2 \sigma^2 / \delta^2 [6] \text{ in cui } \alpha \text{ e } \beta \text{ sono l'errore di tipo I (livello di significatività) e l'errore di tipo}$$

II ($1-\beta$ è la potenza del test), σ^2 è una stima della varianza delle due popolazioni, e δ è la differenza tra le medie che può venire percepita e può essere ipotizzata come differenza tra i valori medi delle due popolazioni messe a confronto.

Si consideri il dataset relativo all'anno 2000.

Si scelga $\alpha = \beta = 5\%$ (il cosiddetto rischio del compratore è uguale a quello del venditore), per cui $z_\alpha = 1.96$ (test a due code) e $z_\beta = 2.57$ (test ad una coda) e una differenza nelle medie δ pari a 0.046 (differenza delle medie per l'intera immagine) per quanto riguarda il valore Red nei due campioni: si ottiene un valore di numerosità significativa pari a $n = 75$. Naturalmente la numerosità varia a seconda della scelta dei valori dei due rischi (di rifiutare H_0 se è vera, e di accettarla se è falsa) che possono essere anche differenti tra loro; in ogni caso un'ottantina di valori sembra una numerosità appropriata. Se si prende in considerazione, separatamente, il valore argomentale *NIR*, con i medesimi livelli di rischio, per $\delta = 0.066$ (differenza di medie per l'intera immagine), si ottiene una numerosità pari a una cinquantina di elementi. Il test bivariato T^2 di Hotelling viene impostato tenendo conto di questa indicazione, sia pur approssimativa, in quanto relativa alla statistica univariata.

$$D - \delta = \begin{bmatrix} -0,01456 - 0 \\ 0,03708 - 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \frac{1}{79} S_1 + \frac{1}{46} S_2 = \begin{bmatrix} 0,0390 & 0,0021 \\ 0,0021 & 0,0045 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0022 & 0,00019 \\ 0,00019 & 0,000154 \end{bmatrix}$$

$$T^2 = [D - \delta]^T S^{-1} [D - \delta] > \chi^2(p=2, \alpha=5\%) = 5,99$$

Si sono pertanto confrontati i vettori media di due campioni estratti dalle scene MODIS ed ETM+ (popolazione) con differente numerosità a seconda del tipo di valore argomentale in studio: $n_{RED} = 79$ e $n_{NIR} = 46$. Si osservi che in tali condizioni l'ipotesi H_0 viene rifiutata.

Tuttavia, se l'ipotesi H_0 è meno restrittiva, cioè si ipotizza un δ diverso da zero, sia pur di poco, il test di Hotelling viene superato:

vettore e δ	$\delta = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\delta = \begin{bmatrix} -0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix}$	$\delta = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.001 \end{bmatrix}$	$\delta = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.02 \end{bmatrix}$
T^2	11.9	5.53	7	3.41
χ^2	5.99 (5%)	5.99 (5%)	5.99 (5%), 9.21 (1%)	5.99 (5%)

Si osservino inoltre i valori dei coefficienti di forma delle distribuzioni dei valori di riflettanza delle immagini del 2000:

2000	RED		NIR	
	MODIS	MEDIA ETM+	MODIS	MEDIA ETM+

			S	
Asimmetria	-0.037	-0.023	-2.29	-2.15
Curtosi	-0.98	-0.93	5.91	5.3

Si prenda ora in considerazione il dato del 2002. In questo caso è sufficiente un campione bivariato di numerosità: $n_{RED} = 25$ e $n_{NIR} = 45$, che percepisca $\partial = 0.1$ e $\partial = 0.055$ rispettivamente.

Anche in questo caso il test T^2 di Hotelling rifiuta l'ipotesi che il vettore differenza tra le medie dei due campioni sia a componenti nulle, ma accetta l'ipotesi H_0 :

$$\delta = \begin{bmatrix} 0,01 \\ 0,01 \end{bmatrix}$$

Il valore della statistica T^2 risulta infatti:

$$T^2 = 9.53 \text{ nel caso in cui } H_0 \text{ sia: } \delta = \begin{bmatrix} 0,01 \\ 0,01 \end{bmatrix} > 5,99 = \chi^2_2$$

$$T^2 = 5.8 \text{ nel caso in cui } H_0 \text{ sia: } \delta = \begin{bmatrix} 0,01 \\ 0,01 \end{bmatrix} > 5,99 = \chi^2_2$$

Anche in questo caso (2002) i valori di asimmetria e curtosi risultano simili:

2002	RED		NIR	
	MODIS	MEDIA ETM+	MODIS	MEDIA ETM+
Asimmetria	-0.09	-0.10	-1.41	-1.55
Curtosi	-1.11	-0.13	8.07	8.33

Conclusioni

L'operazione di confronto tra le distribuzioni multivariate relative alle riflettanze registrate dai sensori MODIS ed ETM+ ha richiesto una preventiva fase di co-registrazione atta all'estrazione di celle effettivamente omologhe da poter confrontare. I test statistici condotti intesi a misurare la similarità e la distanza tra le distribuzioni hanno evidenziato per entrambi i dataset (2000 e 2002) che il test di Hotelling viene superato accettando una distanza tra le medie delle distribuzioni di almeno 0.01. e che i parametri di forma delle distribuzioni appaiono confrontabili, indicando una sostanziale somiglianza tra loro per entrambe le bande (Red, NIR). Gli strumenti statistici multivariati consentono di affrontare l'analisi e suggeriscono possibili ulteriori approfondimenti data la loro varietà (MANOVA, componenti principali, ...).

L'analisi statistica effettuata costituisce inoltre una validazione della procedura di estrazione delle celle omologhe implementata in fase di co-registrazione.

Bibliografia

Boccardo P., Borgogno Mondino E., Perez F., Claps P., *Co-registration and inter-sensor comparison of MODIS and LANDSAT 7 ETM+ data aimed at NDVI calculation*, Proceedings from ISPRS Commission I Symposium, Paris, France, Vol.XXXVI Part.A, 2006.

Johnson R., Wichern D. , (2002) *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall

Toller G.N., Isaacman A., *MODIS Level 1B Product User's Guide*, MCST (MODIS Characterization Support Team) for NASA/Goddard Space Flight Centre Greenbelt, 2003.