

CONFRONTO TRA DUE METODI DI CORREZIONE GEOMETRICA DELLE IMMAGINI IKONOS-GEO

Patrizia MIDULLA

*Dipartimento Città e Territorio, Università di Palermo, via dei Cartari, 19 - 90133 Palermo; pmidulla@unipa.it

Riassunto

In questo articolo vengono analizzati e confrontati due metodi per la correzione geometrica delle immagini IKONOS: un metodo non convenzionale, messo a punto dall'autore, che integra una correzione dell'errore di altezza con una trasformazione piana, ed un metodo basato sull'applicazione del modello matematico delle funzioni razionali, generalmente utilizzato dai software commerciali.

I risultati ottenuti hanno dimostrato la possibilità di effettuare, con entrambi i metodi, ortoproiezioni senza l'ausilio di dati rigorosi di orientamento, ottenendo accuratèzze pressoché equivalenti. Alcune differenze sono invece riscontrabili nelle modalità di applicazione. Prendendo in considerazione il metodo non convenzionale rispetto al modello delle funzioni razionali, tali differenze consistono nella possibilità di operare ricorrendo ad un minor numero di punti di appoggio e nell'assenza di particolari deformazioni sull'ortofoto, nelle zone esterne al perimetro dei punti di appoggio. Il metodo non convenzionale, tuttavia, ha il limite di essere più proficuamente utilizzabile nel caso di terreni modestamente accidentati.

Abstract

Two different methods of ortho rectifying IKONOS images are analysed and compared: a) an alternative method, devised by myself, which combines relief displacement error correction with 2D transformation, b) a method based on rational function models, which is generally employed for commercial software.

The above comparison demonstrated that it is possible to ortho rectify satellite images without accurate exterior orientation data and both methods offered the same level of accuracy. Differences occurred in the number of the ground control points, and, when employing the alternative method, in the absence of deformations in the areas external to the ground control points. However, the "alternative method" differs from the "rational function model" in the fact that it is more effective when applied to more evenly levelled types of terrain.

1. Descrizione e analisi dell'immagine

Caratteristiche - Nella sperimentazione di seguito descritta è stata utilizzata un'immagine satellitare ad alta risoluzione IKONOS *Geo* pancromatica, acquisita in modalità *reverse*¹ (azimut di scansione 180.04°), con forte inclinazione del sensore (60.78805°) e traccia dell'orbita quasi sull'asse nord-sud passante per il centro della scena (azimut 0,1336°). Il territorio ripreso è modestamente accidentato, con rilievi distribuiti ai margini ed un'escursione altimetrica compresa tra 0 e 300 m.

Nell'ambito delle immagini IKONOS, la tipologia *Geo* indica un prodotto che ha subito una correzione geometrica prima della distribuzione all'utente finale. Mediante tale correzione, l'immagine viene riproiettata su una superficie parallela all'ellissoide (nel caso specifico posta alla quota di circa 200 m), ricampionata alla dimensione del pixel-terreno di 1 m, ed infine inquadrata in un determinato *datum* e riferita ad un sistema cartografico (per l'immagine in oggetto UTM, nel *datum* WGS84).

¹ La scansione, cioè, avviene con angolo di elevazione pressoché costante per una stessa scena, mentre nella modalità *forward*, ovvero nella direzione opposta a quella della traiettoria del satellite, l'angolo di elevazione del sensore cambia di 1°/sec (Fraser C.S., Yamakawa T., 2004).

L'operazione viene effettuata ricorrendo ai dati di orientamento del satellite, la cui posizione è fornita da strumentazione GPS, corredata da giroscopi e *digital star trackers* per la determinazione dell'assetto. Gli errori consequenziali a questo trattamento comprendono, quindi, sia i residui di orientamento, sia gli errori determinati dalla differenza locale di quota con il piano di rettifica, sia l'influsso delle ondulazioni del geoide e delle relazioni tra il sistema nazionale di coordinate e il WGS84 (*datum*) (Jacobsen K., 2002).

Analisi - Prima di effettuare le prove di ortoproiezione, si è ritenuto necessario verificare l'immagine. Ciò al fine di individuare le deformazioni in essa presenti, nonché comprenderne la distribuzione e le eventuali cause. Quindi, è stata determinata l'accuratezza mediante calcolo degli RMS in X e Y relativi agli scarti misurati su 30 punti di controllo² (CP) estratti da cartografia a scala 1:2000³ e distribuiti quanto più uniformemente su tutta la scena (tabella 1).

RMS CP X	RMS CP Y	Scarto max CP X (val ass)	Scarto max CP Y (val ass)
12,32	64,00	16,79	89,60

Tabella 1. Accuratezza (in m) dell'immagine IKONOS Geo.

Gli scarti, com'è possibile osservare in figura 1, sono maggiori nella direzione Y e massimi lungo la linea di costa (estremità sinistra del grafico). Sempre nella componente Y, essi sono relazionabili alla differenza di quota tra i punti di controllo e la superficie di rettifica impiegata in fase di realizzazione dell'immagine *Geo*, facendo ipotizzare, come causa principale di questo comportamento, l'influenza dell'errore di altezza. Tale errore è riconducibile sia alla geometria di presa ad asse inclinato ed azimut assai ristretto, sia al successivo trattamento geometrico da parte dell'azienda produttrice.

In base a ciò, è stata quindi messa a punto una procedura che costituisce un metodo alternativo per l'ortoproiezione di immagini IKONOS Geo. I risultati sono stati verificati mediante confronto con quelli ottenuti applicando, per la correzione geometrica, il modello delle funzioni razionali.

2. Il metodo proposto

Il metodo proposto non è disponibile su software commerciali⁴. Nel presente lavoro viene descritta una simulazione di correzione. L'algoritmo da sviluppare ripercorre le deformazioni introdotte dalla geometria di presa e dalla successiva operazione di rettifica, integrando una correzione dell'errore di altezza con una trasformazione piana.

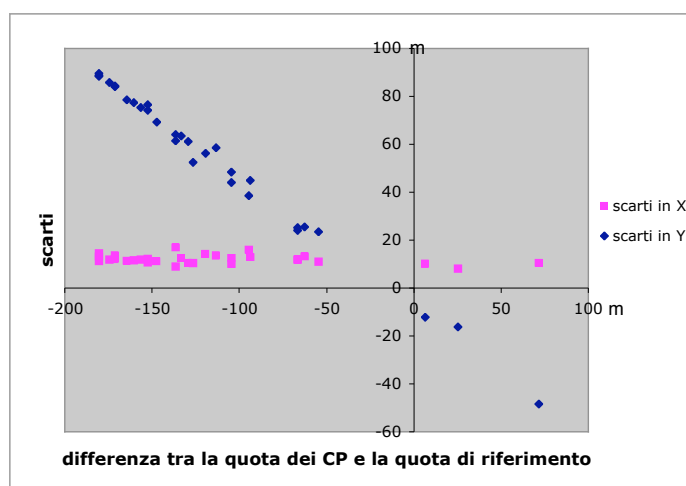


Figura 1. Distribuzione degli scarti sull'immagine Geo e differenza di quota con il piano di riferimento.

² Nel caso delle immagini Geo, le quote dei punti di controllo sono determinanti per il valore degli scarti. Nella verifica descritta, sono stati scelti punti distribuiti in quota in maniera quanto possibile regolare nell'escursione altimetrica complessiva di 300 metri circa.

³ Poiché la cartografia era nel sistema cartografico Gauss-Boaga, è stato necessario effettuare una trasformazione delle coordinate dei punti di controllo al sistema UTM-WGS84.

⁴ Alcune varianti del metodo si ritrovano in letteratura.

L'errore di altezza, o spostamento planimetrico della posizione dei punti dovuto alla proiezione sul piano di riferimento, è calcolabile nella componente radiale con la seguente equazione:

$$\Delta XY = -\Delta Zi/\tan(e) \quad [1]$$

e nelle due componenti X e Y:

$$\Delta X = -\Delta Zi*\sin(a)/\tan(e) \quad \Delta Y = -\Delta Zi*\cos(a)/\tan(e) \quad [2]$$

Nelle formule sopra riportate, ΔZi è la differenza tra la quota del punto considerato e la quota del piano di riferimento, (a) è l'azimut del sensore, (e) è l'angolo di elevazione del sensore.

La prima formula [1] mostra che l'errore di altezza radiale dipende, oltre che dall'entità del dislivello, anche dall'angolo di elevazione del sensore, mentre la formula [2] indica che distribuzione nelle due componenti X e Y dipende dall'azimut del sensore. Entrambi gli angoli (di elevazione e azimut) sono riportati nei metadati a corredo dell'immagine. Quando il satellite non effettua rotazioni durante la ripresa, come in genere avviene per il satellite IKONOS nella modalità "reverse", essi possono essere considerati costanti all'interno di una stessa scansione (Beltsavias e al., 2001, Fraser e al. 2002).

Tuttavia, poiché i loro valori sono individuati con riferimento al centro della scena, se nello sviluppo delle formule sopra riportate si assumono gli stessi dati angolari per tutti i punti dell'array⁵, quando il terreno è accidentato si determina un residuo nella correzione dell'errore di altezza, lungo la direzione perpendicolare a quella dell'orbita. Il residuo è massimo per punti ripresi all'estremità dell'array e, a parità di quota e di posizione dei punti, è maggiore per forti inclinazioni del sensore. In figura 2 sono riportati alcuni esempi di errori residui al variare dell'inclinazione, per differenze locali di quota pari a 100 e 300 m rispetto al piano di riferimento. Ciò suggerisce di limitare l'applicazione del metodo a territori modestamente accidentati.

La trasformazione piana associata alla correzione dell'errore di altezza può essere di vario tipo, ossia una semplice traslazione, una trasformazione conforme o ancora preferibilmente una trasformazione affine.

Il percorso completo delle operazioni di ortoproiezione è illustrato in figura 3.

Per lo svolgimento del calcolo sono necessari, oltre ai metadati già individuati per la determinazione dell'errore di altezza, anche un DEM di passo opportuno e punti di appoggio (GCP) in numero variabile a seconda del tipo di trasformazione adottato e alla ridondanza o meno del calcolo. Le fasi c), d) ed e) possono essere combinate tra loro in un'unica formula.

2. 1. Applicazione al caso di studio

Il metodo è stato verificato mediante un'applicazione all'immagine *Geo* precedentemente descritta.

Si è proceduto seguendo le fasi elencate: a) calcolo dell'errore di altezza; b) verifica dell'immagine depurata dall'errore di altezza; c) trasformazione piana dell'immagine corretta dall'errore di altezza e nuova verifica.

Le operazioni sono state condotte sui punti di controllo già utilizzati nella fase precedente di analisi

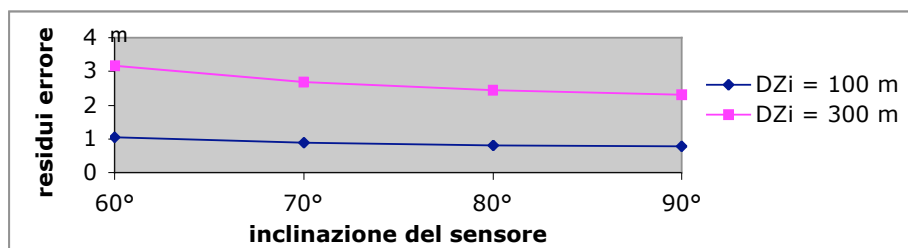


Figura 2. Residuo nel calcolo dell'errore di altezza al variare dell'inclinazione della presa per punti all'estremità dell'array e ΔZi pari a 100 e 300 m.

⁵ I sensori del satellite IKONOS-2 impiegano la tecnologia TDI (*Time Delay and Integration*), e sono costituiti da CCD-array, ossia un insieme di linee con un piccolo numero di *pixel* nella direzione di volo. Ogni linea è composta da 13800 *pixel*.

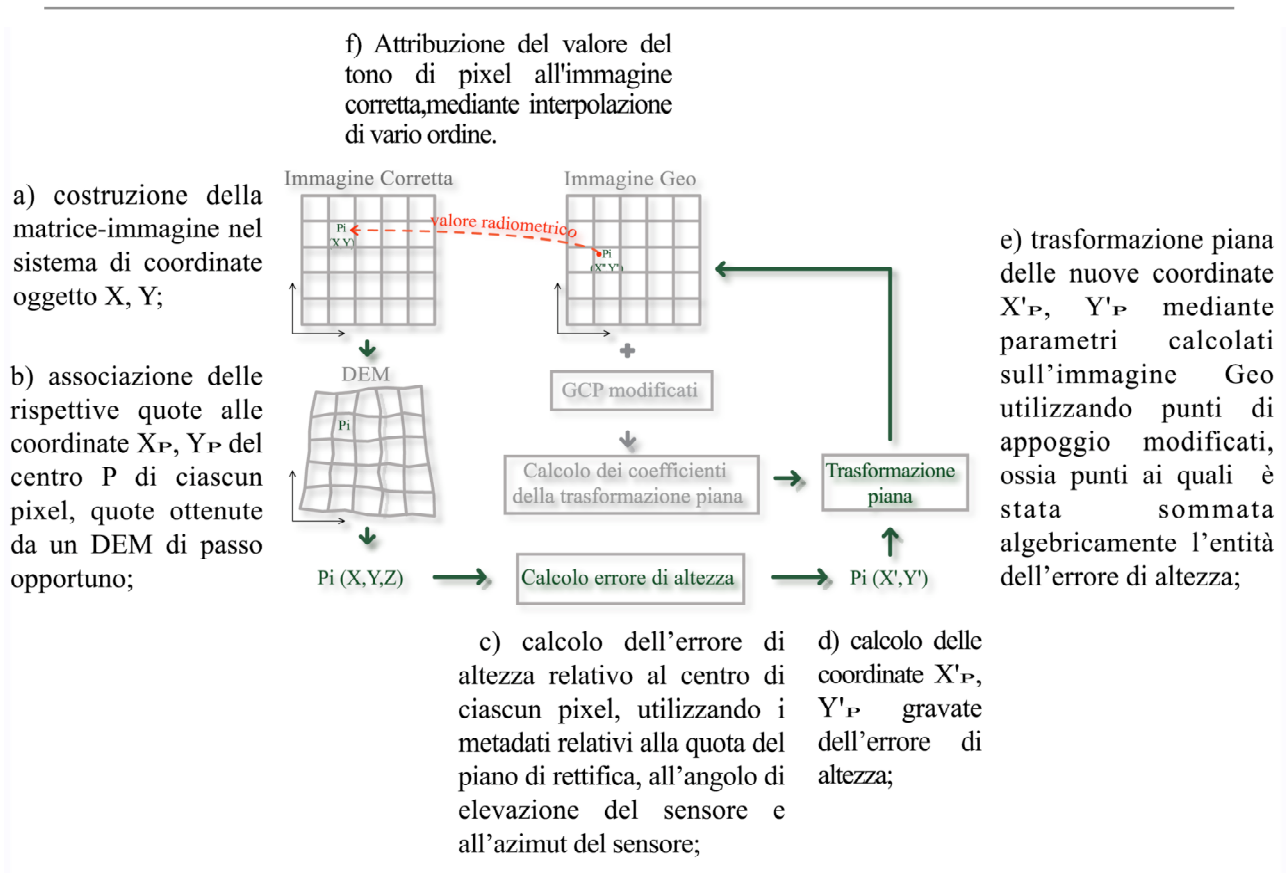


Figura 3. Schema di ortoproiezione mediante correzione dell'errore di altezza e trasformazione piana

dell'immagine Geo. In tabella 2 sono riportati gli RMS degli scarti sui CP in X e in Y, nonché gli scarti massimi ottenuti con la sola correzione dell'errore di altezza, mentre in tabella 3 gli stessi dati sono stati ottenuti associando una trasformazione piana alla correzione dell'errore di altezza.

La trasformazione piana è stata replicata in due prove distinte, ricorrendo rispettivamente a 2 ed a 3 punti di appoggio estratti dalla cartografia a scala 1:2000.

RMS CP X	RMS CP Y	Scarto max CP X (val ass)	Scarto max CP Y (val ass)
12,11	11,73	16,61	18,33

Tabella 2. Accuratezze (in m) sull'immagine Geo depurata dall'errore di altezza.

GCP	RMS CP X	RMS CP Y	Scarto max CP X (val ass)	Scarto max CP Y (val ass)
2	1,93	3,07	4,32	8,96
3	1,88	2,94	4,17	7,66

Tabella 3. Accuratezze (in m) sull'immagine Geo depurata dall'errore di altezza e sottoposta a trasformazione piana.

2.2. Alcune considerazioni sul metodo proposto

La sperimentazione condotta ha permesso, partendo da un'accuratezza sull'immagine originale di 12,32 m in X e 64,00 m in Y, di raggiungere un'accuratezza di 1,88 m in X e 2,94 m in Y, con l'impiego di 3 GCP. Come già specificato, sia i punti di appoggio che di controllo sono stati estratti da cartografia. Per questo motivo sui valori calcolati agisce, oltre all'approssimazione dovuta all'assunzione dell'invariabilità dell'angolo di elevazione e dell'azimut per l'intera scena, anche l'influenza della trasformazione dal sistema di coordinate planimetriche della carta a quello

dell'immagine, l'approssimazione delle quote estratte da cartografia e la loro trasformazione al sistema della quota della superficie di riferimento. Si ricorda, a titolo di esempio, che un errore di 1 m nella stima della quota si traduce in un residuo di 0,56 m nel calcolo dell'errore di altezza radiale, nel caso di un'inclinazione del sensore pari a quella in esame.

Poichè le applicazioni sono state svolte su una sola scena, i risultati sono circoscritti ad immagini con le caratteristiche di quella utilizzata. Tuttavia, le simulazioni di calcolo, già riportate in figura 2, rendono possibile effettuare alcune generalizzazioni e desumere che l'impiego del metodo è preferibile nel caso di immagini riprese su territori modestamente accidentati.

E' importante, infine, rilevare alcuni vantaggi. Essi sono costituiti dal numero assai contenuto di GCP, nonché dalla mancanza di deformazioni rilevanti, nelle zone al di fuori del perimetro dei punti di appoggio, successivamente alla correzione geometrica.

3. Il modello delle funzioni razionali.

La seconda procedura di ortoproiezione sperimentata è basata sul modello delle funzioni razionali. Essa è stata utilizzata per verificare l'attendibilità del metodo precedentemente descritto, attraverso il confronto dei risultati.

Il modello delle funzioni razionali è utilizzato da software commerciali dedicati alla correzione delle immagini satellitari e generalmente applicato nella forma diretta in cui, cioè, le coordinate immagine sono determinate a partire dalle coordinate terreno, attraverso rapporti tra due polinomi del tipo:

$$i_n = P_1(X_n, Y_n, Z_n) / P_2(X_n, Y_n, Z_n); \quad j_n = P_3(X_n, Y_n, Z_n) / P_4(X_n, Y_n, Z_n) \quad \text{in cui: } P = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad [3]$$

Le operazioni di ortoproiezione richiedono un DTM nella fase di redazione dell'ortofoto. E' possibile non ricorrere a nessun metadato, quando i coefficienti (a_{ijk}), denominati RPC, sono calcolati mediante punti di appoggio (modalità terreno-dipendente). E' quest'ultima procedura che è stata applicata nella sperimentazione di seguito descritta, per il cui svolgimento è stato utilizzato il modulo *OrthoEngine* del software PCI Geomatica.

3.1. Applicazione al caso di studio

L'applicazione delle funzioni razionali prevede la scelta di varie configurazioni costituite dal numero dei coefficienti impiegati, nonché dal numero e dalla distribuzione dei GCP. Il numero minimo di GCP dipende dal numero dei coefficienti (n) ed è pari a: $GCP = 2n-1$.

Nella sperimentazione descritta, sono state scelte tre configurazioni: una prima configurazione a basso numero di coefficienti, ovvero 4 coeff./11 GCP, una seconda configurazione con un numero elevato di coefficienti, ovvero 10 coeff./29 GCP, ed infine una terza configurazione, sempre di 10 coeff./29 GCP, creata variando la distribuzione dei GCP rispetto alla precedente, in modo tale da lasciare una zona marginale esterna al perimetro dei punti di appoggio.

I valori degli RMS degli scarti relativi ai CP estratti da cartografia, già impiegati nelle fasi precedenti, e gli scarti massimi sono di seguito riportati:

coef	nGCP	RMS CP X	RMS CP Y	Scarto max CP X val ass	Scarto max CP Y val ass
4	11	1,87	2,61	5,09	5,95
(a) 10	29	2,10	2,91	5,75	6,86
(b) 10	29	3,68	3,82	14,62	13,21

Tabella 4. Accuratezza (in m) sull'immagine Geo corretta applicando le funzioni razionali.

3.2. Alcune considerazioni sul modello delle funzioni razionali.

Il modello delle funzioni razionali permette di ortoproiettare immagini riprese su territori accidentati, scegliendo la configurazioni di dati di volta in volta più idonea. Nella sperimentazione

descritta, i risultati migliori sono stati conseguiti con l'impiego di un numero esiguo di coefficienti, caso in cui le accuratèzze sono state pari a 1,87 m in X e a 2,61 m in Y, per prove svolte impiegando GCP e CP desunti dalla cartografia. Come per il metodo alternativo, i risultati sono quindi condizionati dalla tipologia dei punti utilizzati. Anche la scelta della configurazione influisce sulle accuratèzze. Particolare importanza assume poi la distribuzione dei GCP, quando si adotti un numero di coefficienti elevato. Ciò si evince dalla tabella 4, in cui i valori degli RMS e degli scarti massimi della configurazione (b)10 coeff./29 GCP sono maggiori rispetto a quelli della configurazione (a) di pari numero di coefficienti e di GCP, per la presenza di un punto di controllo esterno al perimetro dei punti di appoggio.

Occorre infine considerare che l'applicazione delle funzioni razionali, pur a ridotti coefficienti, richiede un numero di punti di appoggio maggiore rispetto al metodo non convenzionale proposto.

4. Confronto conclusivo tra i due metodi

Il confronto dei risultati ottenuti applicando i due diversi metodi ha permesso di riscontrare accuratèzze pressoché omogenee, quando vengano utilizzati gli stessi CP e la stessa tipologia di GCP. Ciò costituisce una convalida dell'attendibilità del metodo alternativo, per immagini del tipo di quella considerata (si tratta, infatti, di una sperimentazione circoscritta ad una sola immagine, con i limiti conseguenti). Lo stesso metodo alternativo, inoltre, offre il vantaggio di operare con un numero notevolmente ridotto di GCP, senza introdurre deformazioni rilevanti nelle porzioni di immagine esterne ai punti di appoggio. Di contro, esso presenta il limite di essere più proficuamente applicabile nel caso di terreni modestamente accidentati, se si vogliono raggiungere accuratèzze nell'ordine di quelle descritte e, inoltre, richiede la conoscenza dell'inclinazione del sensore e della quota della superficie di riferimento. Tuttavia, poiché tali dati sono forniti dall'agenzia produttrice nei file a corredo dell'immagine, ciò non costituisce un lavoro suppletivo per l'operatore né un aumento di costi.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'arch. R. Amato che ha collaborato alle prove di ortoproiezione descritte.

Lavoro prodotto nell'ambito di ricerche svolte con finanziamento MIUR ex quota 60%, 2001 e 2003.

Bibliografia

- Baltsavias E., Pateraki M, Zhang L. (2001), *Radiometric and geometric evaluation of Ikonos Geo images and their use for 3D building modeling*, in proceedings of ISPRS Workshop "High resolution mapping from space 2001", Hannover, 19-21 September 2001.
- Dial G., Grodecki J. (2003), *Applications of IKONOS Imagery*, in proceedings of ASPRS 2003 Conference, Anchorage, Alaska, May 5-9.
- Fraser C.S., Yamakawa T. (2004), *Applicability of the affine model for Ikonos image orientation over mountainous terrain*, in proceedings of ISPRS 2004 Conference, Istanbul 12-23 July.
- Grodecki J., Dial G. (2001), *IKONOS geometry accuracy*, in Joint workshop of ISPRS WG I/2, I/5 and IV/7, Hannover, September 2001.
- Hu Y., Tao V., Croitoru A. (2004), *Understanding the rational function model: methods and applications*, in proceedings of ISPRS 2004 Conference, Istanbul 12-23 July.
- Jacobsen K. (2002), *Geometric aspects of the handling of space images*, in ISPRS commission I/Pecora 15/ Conference proceedings, IntArchPhRS (34) Part 1 Com I, Denver.
- Midulla P., Amato R. (2004), *Impiego del modello delle funzioni razionali nell'ortoproiezione di immagini IKONOS Geo*, in atti dell'8^ conferenza ASITA, 14-17 dicembre 2004, Roma, pgg. 1463-1468.
- Midulla P., Amato R. (2005), *Influenza dei GCP e del numero dei coefficienti nel modello delle funzioni razionali terreno-dipendenti*, in bollettino della SIFET n. 3/2005.
- Midulla P., Amato R. (2005), *Un metodo alternativo per l'ortoproiezione di immagini IKONOS-Geo*, in atti della SIFET, Palermo 29-30 giugno/1 luglio 2005, CD-ROM.