

Ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione finalizzata al monitoraggio costiero a scala regionale

Donatella Dominici ¹, Gian Mario Beltrami ², Paolo De Girolamo ²

¹ DAU, Università di L'Aquila, 60790 Monteluco di Roio, L'Aquila.

² LIAM-DISAT, Università di L'Aquila, 60790 Monteluco di Roio, L'Aquila.

Riassunto

La presente memoria descrive la procedura messa a punto per effettuare l'ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione finalizzata ad un loro utilizzo quale strumento di monitoraggio geometrico della costa della Regione Abruzzo. La memoria si concentra sulle ragioni che hanno portato a prediligere – in relazione a requisiti quali la limitazione dell'intervallo temporale di esecuzione della misura e la precisione delle stessa – le immagini da satellite a elevata risoluzione spaziale quale strumento di monitoraggio. Vengono descritte le tecniche utilizzate per georeferenziare tali immagini, illustrando i risultati di una applicazione effettuata su un'area campione. Le specifiche fornite alle autorità regionali per la messa a regime – con cadenza annuale - del monitoraggio della costa mediante immagini satellitari concludono la memoria.

Parole chiave: monitoraggio della costa, immagini satellitari, georeferenziazione, scala regionale.

Abstract

The present paper illustrates the procedure developed in order to orthorectify high resolution satellite images with the aim of using them as a tool for monitoring the coast of the Regione Abruzzo. The paper concentrates on the reason for choosing high resolution satellite images as a basic coastal survey tool in the light of monitoring requirements such as measurement repeatability and efficiency. The procedure developed for georeferencing these images is described, and the results of an application to the chosen test area are shown. Guidelines for annual coastal monitoring using satellite images, suggested to the Regione Abruzzo authority, are presented.

Keywords: coast monitoring, satellite images, georeferencing, administrative region scale.

Introduzione

Con il passaggio alle regioni delle competenze in materia di difesa delle coste, la Regione Abruzzo è stata tra le prime ad aderire agli indirizzi comunitari riguardanti la gestione integrata della fascia costiera (Integrated Coastal Zone Management – ICZM). Proprio allo scopo di definire procedure di gestione rispondenti ai citati indirizzi, la Regione Abruzzo ha finanziato diversi progetti specifici, tra i quali sono da ricordare il progetto RICAMA (Rationale for Integrated Coastal Area Management, <http://www.regione.abruzzo.it/ricama>) cofinanziato dalla Comunità Economica Europea nell'ambito del programma LIFE, e il progetto SICORA (Supporto Informativo per la gestione della zona COstiera della Regione Abruzzo, <http://ing.univaq.it/sicora/home.htm>), da considerarsi quale naturale continuazione del progetto RICAMA.

Assunto di una efficace gestione della costa è la possibilità di controllare con continuità il suo stato. A tal fine occorre definire e quindi 'misurare' opportuni parametri quantitativi che possano rispondere al ruolo di indicatori di stato (Belfiore et al., 2003). In altre parole, risulta indispensabile la preventiva pianificazione e la successiva messa a regime di un sistema di monitoraggio geometrico-quantitativo atto a fornire alle amministrazioni e ai portatori di interesse (*stakeholders*) le informazioni necessarie all'esercizio di tale controllo.

Proprio seguendo una logica di pianificazione, nell'ambito del progetto RICAMA, si è innanzitutto cercato di identificare i parametri che, risultando maggiormente rispondenti al ruolo di indicatori di stato per la costa abruzzese, potessero essere oggetto di monitoraggio (Consorti et al., 1998; De Girolamo et al., 1999; Università degli Studi di L'Aquila, 1998). L'operazione di identificazione è stata effettuata non solo tenendo conto delle diverse scale di interesse (regionale o locale), ma anche stabilendo a priori i requisiti da soddisfare (significatività statistica, economica, etc.).

Tra i vari parametri individuati, quello che è apparso di maggiore efficacia per la rappresentazione - a scala regionale - dello stato della costa da un punto di vista morfologico è risultato la posizione assunta dalla linea di riva in funzione del tempo. Si è infatti riconosciuto come la conoscenza delle variazioni diacroniche di tale linea, oltre a consentire l'individuazione delle tendenze evolutive di un litorale (erosione/deposizione), permetta una valutazione quantitativa dei gradienti del trasporto solido longitudinale - ovvero del trasporto da cui dipende il bilancio solido litoraneo - risultando quindi fondamentale per l'identificazione dei fenomeni evolutivi in atto e la verifica dei diversi scenari di intervento.

Una volta identificato nella linea di riva il parametro di monitoraggio morfologico più efficace, si è reso necessario definire una procedura 'standard' di rilievo a scala regionale che rispondesse a requisiti quali la 'sinotticità' e precisione della misura, consentendo inoltre il contenimento dei costi, al fine di rendere praticabile la ripetizione annuale dell'osservazione. Riguardo i requisiti, occorre osservare come le tecniche di rilievo tradizionali, non potendo garantire l'esecuzione della misura su vaste aree in intervalli di tempo limitati, non siano implicitamente in grado di rispondere al requisito fondamentale di 'sinotticità' della misura. In base alla metodologia di rilievo scelta, in particolare il telerilevamento mediante immagini satellitari ad alta risoluzione, si sono in seguito dovuti definire le metodologie di individuazione della linea di riva.

La presente memoria si concentra essenzialmente sulle scelte innovative operate nella definizione di tale procedura, lasciando a una successiva memoria il compito di mostrare i criteri individuati per la definizione e quindi il monitoraggio della linea di riva vera e propria. In particolare, dopo aver illustrato i criteri che hanno portato a preferire l'immagine satellitare ad alta risoluzione quale strumento operativo per l'esecuzione del rilievo a scala regionale, vengono presentate nel dettaglio le problematiche che emergono, le scelte operate, le tecniche nonché le modellazioni utilizzate per ortorettificare e georeferenziare le immagini satellitari utilizzate. Le varie fasi della procedura elaborata vengono illustrate facendo riferimento all'applicazione operata utilizzando l'area campione del litorale di Pescara, che ha peraltro permesso di redigere le specifiche - anch'esse presentate - utilizzate dalle autorità regionali per la messa a regime del monitoraggio della costa con cadenza annuale.

L'attività di ricerca di seguito illustrata è stata svolta nell'ambito del progetto SICORA (De Girolamo et al., 2005), per il quale la Regione Abruzzo si è avvalsa del coordinamento scientifico del LIAM (Laboratorio di Idraulica Ambientale e Marittima), afferente al DISAT (Dipartimento di Ingegneria delle Strutture delle Acque e del Terreno) dell'Università degli Studi di L'Aquila.

Tecniche operative per il controllo geodetico-topografico

L'informazione richiesta per studiare il territorio che ci circonda può distinguersi in due grandi tipologie. Da una parte vi è una informazione a carattere qualitativo, relativa alla tipologia di copertura (acque, boschi, minerali, terreno coltivato, terreno edificato ecc.), dall'altra vi è una informazione a carattere geometrico-quantitativo, relativa alla posizione e ai contorni delle diverse 'qualità' identificate.

La necessità di reperire una informazione a carattere geometrico ha portato negli anni all'emergere di metodologie di rilievo sempre più avanzate. In particolare, i sistemi di rilevamento fotogrammetrico o basati sullo studio della radiazione elettromagnetica emessa o riflessa dagli oggetti a terra e rilevata da sensori remoti (*remote sensing*) hanno portato allo sviluppo di metodologie di analisi che hanno vissuto e continuano a vivere forti evoluzioni, passando dalla fotogrammetria analitica a quella digitale, fino a giungere alle tecniche di analisi delle immagini satellitari a fini metrici. Al riguardo, occorre precisare che, se l'utilizzo di tali immagini quale strumento di reperimento dell'informazione qualitativa ha circa 30 anni, solo la recente disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione ha portato a considerare tale forma di telerilevamento uno strumento utile anche al reperimento dell'informazione geometrico-quantitativa (AA.VV., 2001).

Rilevamento mediante foto aeree

Il rilevamento del territorio mediante foto aeree realizzate in forma di stereocoppie durante voli opportunamente progettati costituisce il principio base della fotogrammetria classica o analitica la quale, tramite procedimenti di restituzione e ortofotoproiezione, consente la costruzione di modelli tridimensionali delle aree di interesse attraverso l'unione di sequenze di stereocoppie adiacenti (Kraus, 1994). Sullo stesso principio si fonda anche la fotogrammetria digitale, sviluppatasi in seguito all'emergere delle moderne tecnologie informatiche di acquisizione e trattamento delle immagini. La costruzione del modello tridimensionale richiede comunque - in entrambi i casi - una accurata determinazione di quei punti a coordinate note conosciuti come punti di controllo a terra (GCPs - *Ground Control Points*). L'emergere dei sistemi di posizionamento globale (GPS - *Global Positioning System*), consentendo la copertura di vaste aree in poco tempo e con ottime precisioni, ha dunque permesso un considerevole sviluppo anche in questo campo, ovvero il superamento delle tradizionali tecniche di rilievo plano-altimetrico. Il lettore interessato è rimandato a Kraus (1994) per i necessari approfondimenti.

In questa sede preme tuttavia osservare come la necessità di progettare uno specifico volo aereo per lo studio di ciascuna area di interesse, limitando di fatto la regolarità dell'acquisizione e quindi la ripetibilità delle prese fotografiche, costituisca una limitazione di questa tecnica (Sylos Labini, 2003).

Telerilevamento mediante immagini satellitari

Le immagini satellitari provengono da sensori posizionati su satelliti che percorrono orbite ottimali in funzione dello scopo. Ad esempio, le orbite sono quasi circolari in modo da garantire una distanza costante del satellite dalla superficie terrestre, mentre i piani orbitali sono quasi polari in modo da garantire una operatività sincrona al sole. Il periodo dell'orbita dipende ovviamente dalla sua quota, cui è anche legata la risoluzione spaziale della presa (decrescente al crescere della quota stessa). A causa della rotazione della terra, il satellite percorre a ogni rivoluzione una nuova traccia, posta a Ovest della precedente. Questa caratteristica viene utilizzata per tarare l'orbita in modo da garantire il tracciamento di tutto il pianeta (con eccezione delle calotte polari) in un certo numero di giorni. Tale intervallo di tempo definisce il ciclo di ripetizione (*repeat cycle*) e determina la risoluzione temporale (*temporal resolution*) dei dati registrati. Il sensore, inteso come lo strumento che acquisisce le immagini, non registra in modo omogeneo la radiazione in arrivo dal corrispondente *pixel quadrato* al suolo, risultando spesso più sensibile in corrispondenza del centro del pixel. Ciò porta a definire la sua risoluzione spaziale (*spatial resolution*) come l'estensione dell'area circolare ove la sensibilità dell'elemento del sensore è superiore al 50% della sensibilità massima. Come risoluzione radiometrica (*radiometric resolution*) si definisce invece il dettaglio adottato nella registrazione della quantità di radiazione incidente sul sensore.

Occorre osservare come, almeno fino all'avvento dei nuovi sensori ad alta risoluzione, l'utilizzo dei dati telerilevati da satellite per il reperimento di informazioni geometrico-quantitative abbia trovato nella scarsa risoluzione geometrica delle immagini, nell'indeterminazione della posizione e dell'assetto del sensore e nella complessità della geometria della presa elementi di oggettiva difficoltà, risultando estremamente complesso collocare sul terreno, con sufficiente accuratezza, le informazioni derivanti dai dati telerilevati (operazione necessaria per ottenere una rappresentazione cartografica metricamente corretta).

L'introduzione di nuovi sensori ad alta risoluzione, consentendo l'utilizzo della stessa immagine quale fonte d'informazione radiometrica e geometrica, ha permesso di ridurre se non eliminare il preesistente scollamento tra le due tipologie di informazione, rendendo possibile un approccio capace di fornire le informazioni metriche e fisiche richieste in un unico sistema di riferimento (*Datum*) e con un unico livello di precisione. In particolare, la disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione quali ad esempio QuickBird (QB), generate da un sensore pancromatico e un sensore multispettrale rispettivamente con risoluzioni di 0.61 m e 2.5 m (Toutin e Cheng, 2002), hanno aperto interessanti prospettive per l'impiego dell'immagine satellitare nel campo della descrizione metrica del territorio (cartografia a grande e media scala), ovvero per il reperimento di una informazione geometrico-quantitativa. Il lettore interessato è rimandato ai già citati atti del PRIN (Progetto di Rilevante Interesse Nazionale) dal titolo "L'uso di immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali" per dettagliate informazioni (AA.VV., 2001).

I vantaggi rispetto alla tradizionale presa fotogrammetrica non sono solo legati alla relativamente alta ripetibilità della presa, ma anche all'estensione della scena ripresa, ovvero alla capacità di visione 'sinottica', non-

ché alle potenzialità di acquisire immagini con la medesima facilità in qualunque zona. Ulteriore aspetto da considerare è l'effettiva riconoscibilità degli oggetti relativi ai dati da analizzare. La possibilità di reperire periodicamente immagini di aree territoriali senza la necessità di progettare appositi voli ha quindi portato a un crescente utilizzo delle prese da satellite, elaborate mediante metodologie operative proprie della fotogrammetria (Boccardo et al., 2003, 2004; Kraus, 1994; AA.VV., 2001). I costi dipendono dalla politica dei fornitori, ovvero dalla concorrenzialità tra gli stessi, e rappresentano un elemento destinato a condizionare l'uso di tali immagini.

Il problema della correzione geometrica

Qualunque immagine ad alta risoluzione, al momento della presa, risulta affetta da distorsioni geometriche e radiometriche, ovvero da distorsioni dell'energia raggiante rilevata, che ne impediscono il corretto utilizzo, particolarmente nelle applicazioni cartografiche. Tali distorsioni sono essenzialmente dovute al sistema di acquisizione (piattaforma e sensore), al mezzo di propagazione del segnale (atmosfera), all'angolo di ripresa rispetto al Nadir e all'effetto della curvatura terrestre. Prima del rilascio quindi, l'immagine deve essere corretta geometricamente. I differenti livelli di correzione geometrica e radiometrica caratterizzano le diverse tipologie di prodotto e, ovviamente, il rapporto tra costo e ampiezza dell'area rilevata.

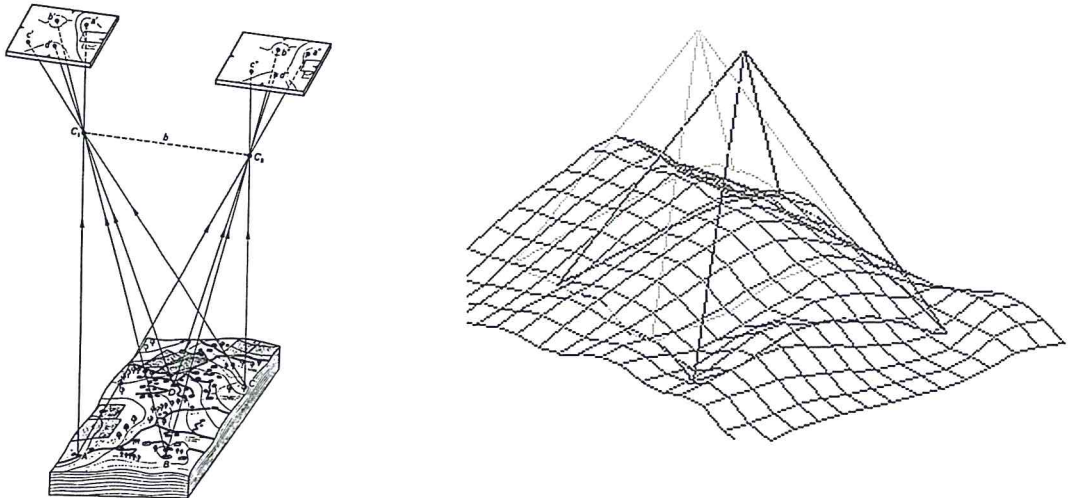


Figura 1 - Equazioni di collinearità (a sinistra) e utilizzo del DTM per la ortofotoproiezione (a destra).

L'applicazione di procedimenti di ortofotoproiezione, nonché l'eventuale ricostruzione di modelli stereoscopici, richiedono la conoscenza di modelli fisico-geometrici - quali le equazioni di collinearità (Fig.1 sx) - in grado di mettere in relazione lo spazio immagine con lo spazio oggetto (Kraus, 1994). Tali modelli richiedono a loro volta la conoscenza dei parametri di presa, ovvero dei parametri di posizione e assetto della piattaforma, nonché dei parametri ottico-geometrici del sensore. A differenza del rilevamento mediante foto aeree, il rilevamento tramite immagini satellitari non prevede la diffusione di tali parametri, rientrando questi ultimi nel novero delle informazioni mantenute riservate dai gestori delle piattaforme. In questo caso quindi, risulta necessario ricorrere a criteri alternativi di definizione della corrispondenza tra immagine e terreno. Un criterio comunemente applicato consiste nell'istituire tale corrispondenza tramite punti noti sull'oggetto, ovvero punti di controllo a terra (GCPs), utilizzando modelli di tipo puramente analitico, quali funzioni polinomiali, razionali o 'spline', ovvero modelli che, non riferendosi a un particolare tipo di coppia sensore-piattaforma, risultano applicabili in maniera generalizzata. Si noti come i GCPs scelti, determinabili mediante un sistema di posizionamento globale (GPS), debbano essere facilmente 'riconoscibili' sia sull'immagine sia sul terreno, e come l'accuratezza delle loro coordinate influenzi in maniera determinante la corrispondenza istituita.

Occorre inoltre osservare come le immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica quali le immagini QB non siano disponibili in forma di stereocoppie. Per produrre immagini ortoproiettate con caratteristiche tali

da poter essere utilizzate per l'aggiornamento cartografico occorre quindi utilizzare un modello digitale del terreno (DTM - *Digital Terrain Model* - Fig.1 dx), risultando necessario disporre di informazioni tridimensionali sulla morfologia del terreno (Caprioli et al., 2003; Cheng et al., 2003; Dardanelli et al., 2003; Dermanis e Biagi, 2002; Kraus, 1994). Il DTM adottato dovrà ovviamente avere caratteristiche di precisione e di passo di griglia idonei al raggiungimento della precisione prefissata per l'ortofotoproiezione, ovvero dipendenti dalla scala della carta. Inoltre, la sovrapposizione tra immagine e DTM dovrà essere operata all'interno dello stesso *datum*. Piccoli errori nella posizione relativa tra i punti sull'immagine e sul DTM possono infatti comportare errori consistenti nella ortofotoproiezione (Coppola et al., 2001).

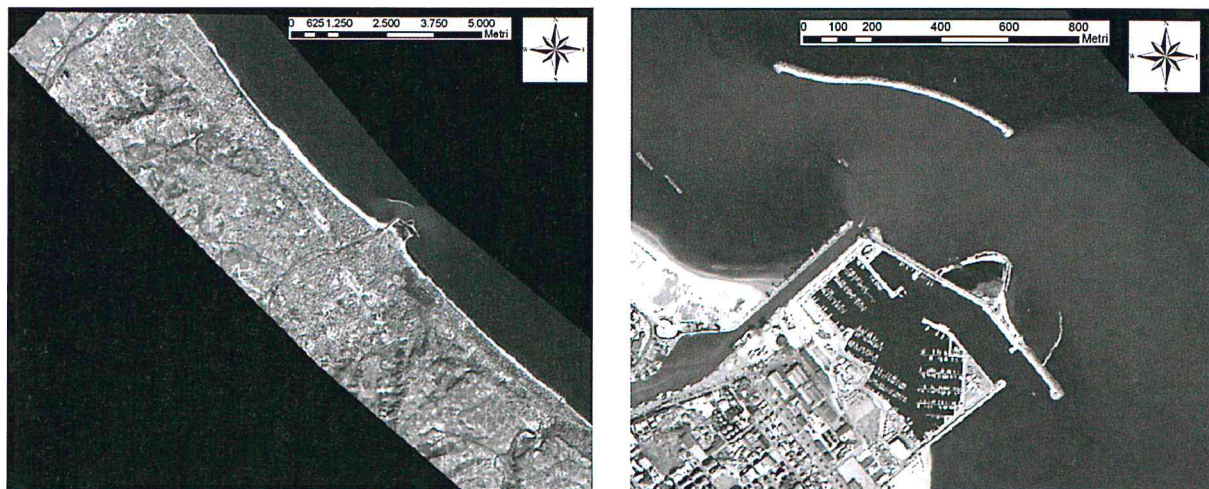


Figura 2 - Zona costiera nei pressi di Pescara (sx) e dettaglio del porto turistico di Pescara (dx). (Immagine ripresa dalla piattaforma Quickbird).

La procedura di georeferenziazione elaborata

Come evidenziato, lo scopo principale del lavoro qui presentato è stato quello di elaborare una procedura di georeferenziazione delle immagini satellitari la quale, dipendentemente dal materiale e dagli strumenti disponibili, risultasse la più efficiente da un punto di vista del rapporto tra i costi e i tempi di realizzazione. L'efficienza di tale rapporto appare infatti elemento fondamentale per la ripetibilità insieme dell'acquisizione e dell'analisi di tali immagini e, quindi, per un loro concreto utilizzo a fini di monitoraggio dell'evoluzione della linea di costa. Tenuto conto di questo fine ultimo, allo scopo di elaborare e verificare preventivamente la procedura di georeferenziazione, si è provveduto a limitare l'area di prova alla sola zona circostante il Porto di Pescara (Fig. 2 sx).

Analisi e scelta della piattaforma e del formato dell'immagine

Le immagini acquisite nell'ambito del progetto sono quelle riprese dalla piattaforma QuickBird (QB), rilasciate nel formato 'Standard'. Tale scelta è legata al fatto che le immagini QB sono attualmente le uniche a raggiungere, nel pancromatico, risoluzioni submetriche (0.61 m).

Le immagini QB hanno dimensioni dell'area ripresa variabili tra 16.5x16.5 km² e 20.8x20.8 km² e sono rese disponibili in differenti formati, differenziati dal grado di elaborazione geometrica e radiometrica cui sono sottoposte. Tra i formati più utilizzati ci sono le predette 'Standard', le 'Standard orthoready' e le 'Basic'. Le immagini 'Basic' sono da considerarsi immagini 'grezze', ovvero prive di qualunque correzione geometrica. Tali immagini sono comunemente preferite da utenti che, intendendo fare un uso metrico di esse, preferiscono avere il controllo dell'intero processo di ortorettificazione. Le 'Standard' e le 'Standard orthoready' sono invece immagini 'ortorettificate' rispettivamente tramite un modello digitale del terreno (DTM) a bassa risoluzione, in particolare il GTOPO30, e tramite l'ellissoide come superficie di riferimento per la quota. Tale trattamento rende i formati 'Standard' e le 'Standard orthoready' meno adatti per una successiva ortorettificazione, risultando ovviamente più complessa la ricostruzione della proiettività originale (si veda al riguardo: AA.VV., 2001).

Un considerevole vantaggio delle immagini 'ortorettificate' consiste nel fatto di essere fornite anche 'tagliate' specificatamente secondo l'area di interesse richiesta, risultando vincolante il solo minimo dell'area da acquistare (circa 64 km² per immagine). Quindi, per quanto le immagini 'Basic' abbiano un costo per km² minore delle immagini 'Standard' e 'Standard orthoready' (a tutto il 2003, circa 19 €/km² contro 22 €/km² per le immagini pancromatiche), tenuto conto che i formati delle immagini QB non risultano vincolati all'utilizzo di un prescritto modello fisico-geometrico di ortorettificazione, appare evidente come la scelta delle immagini 'Standard' abbia rappresentato il compromesso tecnico-economico più vantaggioso in relazione al fine di realizzare il monitoraggio metrico dell'area costiera abruzzese, particolarmente in virtù della ristrettezza della fascia di interesse (circa 5 km per una lunghezza complessiva di circa 135 km). La Figura 2 mostra la fascia dell'area di interesse mostrata dall'immagine QB in formato 'Standard' (sx) e un suo particolare (dx – dettaglio del porto turistico di Pescara).

Il modello di ortorettificazione

Non è questa la sede per una completa esposizione delle caratteristiche e delle problematiche connesse con l'uso dei vari modelli di ortorettificazione. Nel seguito verranno quindi ricordati solo alcuni punti principali. Per i necessari approfondimenti si rimanda ai riferimenti bibliografici (Kraus, 1994).

Allo stato attuale l'ortorettificazione di un'immagine satellitare può essere effettuata tramite:

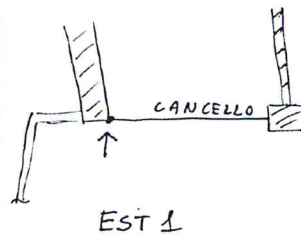
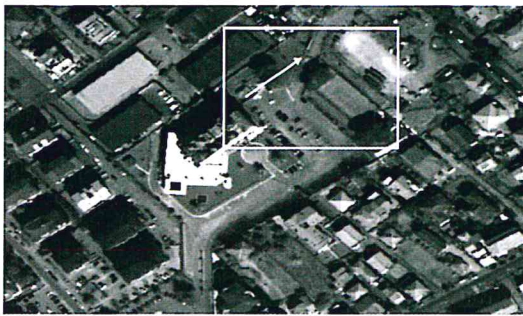
1) modelli rigorosi - quali le equazioni di collinearità - che portano alla descrizione del processo fisico geometrico relativo all'acquisizione dell'immagine attraverso la conoscenza dei parametri di orientamento interno del sensore, nonché di posizionamento e orientamento spaziale (Robertson, 2003; Toutin, 2004);

2) le funzioni polinomiali razionali (RPFs - *Rational Polynomial Functions*) che non tengono conto del processo fisico-geometrico di generazione dell'immagine (Borgogno Mondino et al., 2003) e richiedono la conoscenza di punti di controllo a terra (GCPs). Queste funzioni si dividono in RPFs basate esclusivamente su punti di controllo a terra e in RPFs calcolate anche in base a coefficienti forniti insieme alle immagini satellitari stesse tramite chiamata a un processo remoto (RPC - *Remote Process Call*). Sebbene nel primo caso si parli di RPFs senza RPC e nel secondo di RPFs con RPC, la distinzione appare puramente formale, trattandosi soltanto di avere o non avere a disposizione dei parametri forniti in un file di meta-data in formato testo (txt). In entrambi i casi occorre comunque distinguere i punti di controllo a terra (GCPs), ovvero i punti di coordinate note collimabili sull'immagine e in base ai quali viene stimato il modello, dai punti di controllo (CPs - *Check Points*), ovvero i punti utilizzati solo per il controllo dell'accuratezza dei risultati (Di et al., 2003a; Grodecki e Dial, 2003; Fraser e Hanley, 2003; Toutin, 2003).

Il confronto tra le due tipologie di modellazioni (Baiocchi et al., 2004; Toutin, 2004) mostra come l'approccio mediante modelli rigorosi risulti il più corretto da un punto di vista fotogrammetrico. Tali modelli tuttavia, pur risultando in assoluto più robusti, richiedono l'utilizzo di software specializzati, nonché specificamente adattati alla piattaforma satellitare considerata. Al contrario, l'approccio RPFs con RPC - più robusto di quello RPFs senza RPC e più semplice da implementare rispetto ai modelli rigorosi - è sempre più diffuso a livello di software commerciali (a esempio ENVI). Il conseguente favorevole rapporto tra costi e benefici ha orientato la scelta del modello di ortorettificazione da utilizzare verso la tipologia RPFs con RPC, tenuto conto peraltro che tali modelli possiedono già, seppur approssimati, tutti i coefficienti necessari e richiedono quindi un minor numero di punti di controllo.

Rilievo GPS per determinazione dei punti di controllo a terra

Tenuto conto dell'area campione scelta (Fig. 2), il rilievo GPS effettuato per la determinazione sia dei GCPs che dei CPs si è svolto su un'area rappresentata da una fascia della larghezza di circa 4 km che, interessando una superficie complessiva di circa 80 km², si estende in direzione Sud - Est, Nord - Ovest fra i comuni di Francavilla al Mare e di Città S. Angelo.



**Coordinate Immagine
WGS 84 UTM 33N**
Geografiche
LAT. N 42°31'26,19482"
LON. E 14°08'22,57627"
Cartesiane
E 429331,3750
N 4708310,3320
Quota Ellissoidica
49,324 m

Figura 3 - Estratto immagine: esempio di quadrante della griglia tracciata sull'immagine originale e di monografia del punto scelto all'interno di esso.

La posizione generica dei punti è stata individuata utilizzando una griglia tracciata sull'immagine originale. In particolare, partendo dalla linea che segue la costa, parallelamente a questa e distanziata di circa 1.5 km, si sono individuate 57 intersezioni. Utilizzando tale griglia si sono individuati, nell'intorno di ciascuna intersezione, i punti da rilevare, scegliendo spigoli di recinzioni o di manufatti che fossero ben distinguibili nell'immagine originale, ovvero che presentassero una netta separazione delle zone chiare (illuminate) da quelle scure (in ombra). Altre caratteristiche richieste ai punti scelti sono state la lontananza da ostacoli di qualsiasi natura in grado di creare problemi di ricezione del segnale GPS, nonché la raggiungibilità per lo stazionamento. Il progetto del rilievo è stato completato con la redazione delle monografie di ciascuno dei singoli punti sulle quali è stato riportato un estratto dell'immagine satellitare su cui si individua il punto di interesse (Fig. 3), le sue coordinate nel sistema WGS84 (World Geodetic System 1984) estratte dall'immagine stessa, le necessarie annotazioni, nonché uno schizzo planimetrico della zona del punto rilevato. Ciò rende tra l'altro possibile l'eventuale utilizzazione di navigatori satellitari per rendere più agevole il raggiungimento dello stesso punto in caso di necessità.

Data l'estensione e l'orografia del territorio in esame, caratterizzato da alternanza di zone pianeggianti a zone collinari, il rilievo dei punti è stato effettuato in quattro sessioni ognuna della durata di circa 10 ore. In particolare, sono state impiegate due squadre ciascuna dotata di una base fissa (ricevitore Trimble 5700) e due stazioni mobili (ricevitori Trimble 5700 e Trimble 4700). Il rilievo è stato eseguito nella modalità *rapido-statica*, individuando due punti come origine – rispettivamente denominati *Madonnina* e *Franca villa* - in modo che ognuno dei vettori non avesse una lunghezza superiore ai 15 km. La scelta dei punti origine è stata obbligata, non essendo risultato possibile utilizzare i vertici della rete IGM95 presenti nelle vicinanze. La collocazione dei punti rilevati è quella schematizzata in Figura 4.

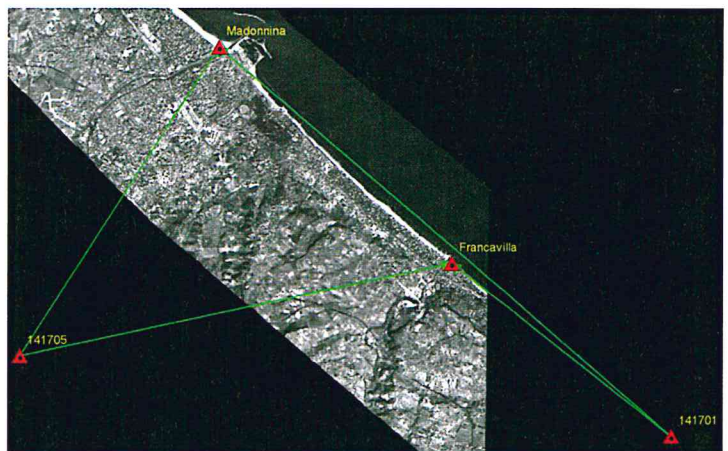
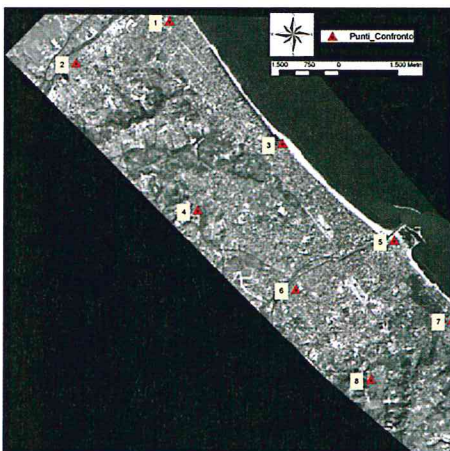


Figura 4 - Dislocazione dei punti rilevati e schema dell'inquadramento del rilievo nella rete IGM95.

L'intero rilievo è stato comunque inquadrato nella rete nazionale IGM95. Per questo inquadramento sono stati utilizzati due ricevitori fissi posizionati in corrispondenza dei vertici 141705 e 141701, con un terzo ricevitore è stata fatta stazione in modalità statica per circa un'ora e trenta minuti sui due punti origine (Fig. 4). L'elaborazione dei dati è stata eseguita utilizzando il software 'Trimble Geomatics Office v1.50' con effemeridi trasmesse. Le precisioni finali - orizzontali e verticali - delle coordinate dei punti risultano essere dell'ordine del centimetro sia in planimetria che in quota. Unica eccezione è risultata il punto OVEST_09 le coordinate del quale sono risultate avere una precisione di 3.3 cm in planimetria e 4.6 cm in quota.

Verifica della procedura di ortorettificazione

Condizione sicuramente sfavorevole della procedura elaborata risulta la ristrettezza della fascia di distribuzione dei GCPs. Il fatto che gran parte dell'immagine sia coperta dal mare può infatti portare il software utilizzato per la ortorettificazione a non sfruttare al massimo le potenzialità dei suoi algoritmi, pur avendo a disposizione GCPs rilevati con precisione ottimale. Ulteriore elemento sfavorevole è costituito dall'utilizzo di immagini in formato 'Standard', ovvero già corrette mediante un DTM a bassa risoluzione.

Per quanto riguarda il primo fattore - sicuramente vero dal punto di vista della fotogrammetria - si deve tuttavia tenere presente che la zona di interesse coincide con la stessa fascia di distribuzione, risultando quindi ben coperta di GCPs. Per quanto riguarda l'utilizzazione di immagini QB in formato 'Standard', l'effetto del DTM a bassa risoluzione, che in zone con notevoli variazioni altimetriche può comportare significative deformazioni planimetriche, non è apparso influire significativamente sulla linea di costa bassa - principale oggetto dello studio - sulla quale anche tale tipologia di DTM appare garantire indicazioni sufficienti. Una qualche deformazione si è invece manifestata nelle zone caratterizzate da versanti collinari.

La procedura di ortorettificazione mediante modello RPFs con RCP ha comunque previsto l'utilizzo di un DTM con una risoluzione spaziale di 5 m, ricavato dalla nuova Carta Tecnica Regionale Numerica della Regione Abruzzo (CTRN 1:5000) e riproiettato nel sistema UTM, Zona 33 Nord nel datum WGS84.

Particolare interesse è stato riservato all'analisi dei risultati ottenibili utilizzando - con i modelli RPFs con RPC - un differente numero di punti di controllo a terra, ovvero di GCPs. I diversi insiemi di punti considerati sono stati scelti in maniera di garantire una copertura comunque omogenea dell'immagine, seppure con una densità di distribuzione maggiore o minore. I risultati sono stati valutati in termini di radice quadrata della media (RMS - *Root Mean Square*) degli scarti sia dei punti di controllo a terra (GCPs), che dei punti di controllo (CP) dell'accuratezza. Ciò si è reso necessario in quanto mentre i residui dei GCPs sono funzione della precisione del modello, gli scarti sui CPs riflettono l'accuratezza estraibile da ogni singola immagine. In Figura 5 è illustrata la variabilità di entrambi i residui - nel modello RPFs con RPC utilizzato - al variare del numero dei GCPs. Come è possibile osservare, all'aumentare del numero di punti di controllo a terra non corrisponde un sensibile aumento della precisione e dell'accuratezza del modello, rispetto alle coordinate Est e Nord UTM. Un numero non elevato di GCPs risulta quindi sufficiente al raggiungimento di un'ortorettifica dell'immagine con una precisione perfettamente idonea. Si osserva come, in termini di precisione e accuratezza, i risultati ottenuti appaiano non solo perfettamente compatibili con quanto riportato in letteratura relativamente a simili sperimentazioni (Radicioni et al., 2003), ma anche leggermente più precisi. Tale maggiore precisione è imputabile alle favorevoli condizioni morfologiche della zona di interesse, ovvero una fascia costiera bassa caratterizzata da variazioni orografiche estremamente esigue. Infine, per quanto riguarda la possibilità di attuare delle indagini dettagliate nella zona costiera, si può notare come il grado di dettaglio (Fig. 2 dx) sia assolutamente idoneo a evidenziare anche evoluzioni della linea di costa.

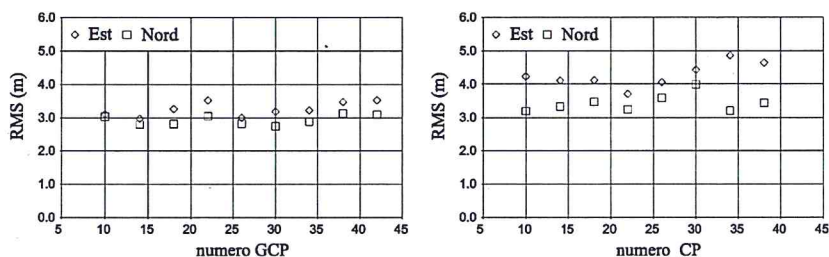


Figura 5 - Precisione (RMS dei GCP) del modello (sx) e accuratezza (RMS dei CP) delle immagini (dx) al variare dei GCP.

Considerazioni in merito ad altre procedure di georeferenziazione

La procedura di georeferenziazione esposta si fonda sull'utilizzo di una distribuzione di densità nota di GCPs e CPs, rilevati utilizzando la tecnica GPS in modalità rapido-statica, ovvero rilevati utilizzando una tecnica in grado di garantire una precisione del rilievo *sub-metrica*, nonché la possibilità di eseguire velocemente periodici controlli.

Una possibile alternativa può essere costituita dall'individuazione ed estrazione dei GCPs e CPs da Cartografia Tecnica Regionale (CTRN) a scala 1:5000, ovvero 1:10000. Al riguardo tuttavia, occorre notare come - nei casi più aggiornati - la formazione di tale cartografia (Fondelli, 2004) prescrive, per gli elaborati prodotti alla scala 1:5000, un errore massimo planimetrico dell'ordine di 2.0 m e un errore massimo altimetrico di 1.2 m. La formazione della stessa cartografia alla scala 1:10000 prevede invece un'approssimazione metrica espressa da errori massimi in planimetria dell'ordine di 4.0 m e in altimetria di 1.8 m, con tolleranze altimetriche per le curve di livello pari a 3.5 m. Il collaudo dei lavori per la formazione di queste cartografie tecniche viene effettuato *a campione* - direttamente sul terreno - e gli elaborati vengono dichiarati accettabili soltanto quando non più del 3% di quelli esaminati risulta fuori tolleranza. Costituiscono una eccezione i vertici delle reti di raffittimento, nonché dei punti di appoggio, per i quali tutti gli elementi debbono essere rigorosamente in tolleranza, essendo stata riconosciuta e condivisa in questo limite fiduciario la possibilità di coprire gli inevitabili errori grossolani che - nell'insieme delle informazioni qualitative e quantitative costituenti gli elaborati tecnici cartografici - possono spesso verificarsi. E' inoltre da considerare come tali precisioni possono essere ritenute effettive solo nel caso di utilizzo, per la georeferenziazione di immagini satellitari, di una cartografia CTRN in formato *vettoriale*, risultando gli inevitabili processi di rettificazione cui deve soggiacere una cartografia *raster* ulteriore fonte di errore. L'eventuale scelta di tale metodologia deve quindi essere necessariamente preceduto da un esame critico delle caratteristiche della cartografia utilizzata relativamente agli scopi prefissati.

Nello caso specifico della costa abruzzese, la Regione ha provveduto a dotarsi recentemente di una cartografia in scala 1:5000 in grado di coprire l'intero suo sviluppo. In linea di principio quindi, l'aggiornamento degli elaborati prodotti avrebbe consentito l'utilizzo di tale strumento quale mezzo di georeferenziazione, ovviamente accettando gli errori plano-altimetrici indicati in precedenza. A titolo di esempio, la Figura 6 riporta il minimo e massimo scostamento rilevato tra GCPs localizzati sull'immagine satellitare originale e i loro corrispondenti individuati sia sulla CTRN che mediante rilievo GPS. Si osservi come - a rigore - la figura fornisca solamente una indicazione relativa all'ordine di grandezza della rettifica operata sull'immagine satellitare nei due casi. Il desiderio, da una parte, di ottenere una precisione sub-metrica dei punti di controllo e, dall'altra, di possedere il complessivo controllo dell'intero processo, ovvero una esatta conoscenza sulla distribuzione e sulla densità degli stessi punti, ha tuttavia portato a preferire la metodologia fondata sull'utilizzo di GCPs e CPs rilevati mediante GPS.



Figura 6 - Minimo e massimo scostamento rilevato tra punti (GCPs) localizzati sull'immagine satellitare originale e i loro corrispondenti individuati [(a), (b)] sulla Carta Tecnica Regionale (CTRN - 1:5000), ovvero [(c), (d)] mediante rilievo GPS.

Specifiche per la messa a regime del monitoraggio della costa

Come osservato, le varie fasi della procedura presentata, elaborata facendo riferimento all'area campione del litorale di Pescara, hanno permesso di redigere le specifiche fornite alle autorità della Regione Abruzzo per una corretta georeferenziazione delle immagini satellitari QB e, conseguentemente, per la messa a regime del monitoraggio geometrico dell'intero sviluppo della costa regionale.

Tali specifiche prevedono innanzitutto che il rilevamento dei punti di controllo a terra (GCP) sia realizzato utilizzando la tecnica GPS in modalità statica, con tempi minimi di stazionamento sul singolo punto di circa 1 ora. L'ottenimento di una densità di punti ottimale viene condizionato al posizionamento di almeno un GCP ogni 2 – 4 km², in dipendenza della morfologia del terreno. Per la scelta dei punti, le specifiche prescrivono di preferire spigoli di recinzioni o di fabbricati ben distinguibili nell'immagine considerata, nonché di evitare locazioni in prossimità delle quali siano presenti ostacoli in grado di compromettere una buona ricezione del segnale GPS. Ovviamente, si prescrive di segnalare i punti scelti attraverso opportune materializzazioni (chiodi, etc.). Per ciascun punto è poi richiesta la compilazione di una apposita monografia indicante le coordinate del punto in datum WGS84, le corrispondenti coordinate nel sistema Gauss-Boaga Fuso Est, nonché l'indicazione della porzione di immagine ove il punto è localizzato e uno schizzo planimetrico in scala opportuna. Particolare risalto viene infine dato alla valutazione della quota *ortometrica* dei punti individuati. Quest'ultima deve essere determinata tramite utilizzo di caposaldi della rete di livellazione IGM, ovvero collegando i caposaldi posti in prossimità dei vertici della rete GPS ai vertici stessi tramite livellazione geometrica di precisione. Come noto infatti, i vertici della rete GPS sono dati in coordinate ellissoidiche (*datum* WGS84) e solo tramite livellazione geometrica di precisione è possibile determinare la loro quota ortometrica, ovvero calcolare puntualmente l'effettiva *ondulazione geoidica*.

Conclusioni

Una effettiva ed efficace gestione della costa presuppone il continuo controllo del suo stato, ovvero la pianificazione e la messa a regime di un sistema di monitoraggio atto a fornire i dati necessari all'esercizio di tale controllo. La pianificazione di un tale sistema implica l'identificazione – sulla base delle scale di interesse e dei requisiti da soddisfare – dei parametri oggetto di monitoraggio maggiormente rispondenti al ruolo di indicatori di stato. Nell'ambito di diversi progetti finanziati dalla Regione Abruzzo, e intesi a definire procedure di gestione rispondenti agli indirizzi della Comunità Economica Europea riguardanti la gestione integrata della fascia costiera, è emerso che il parametro di maggiore efficacia per la rappresentazione - a scala regionale - dello stato della costa da un punto di vista morfologico risulta la localizzazione spazio-temporale della linea di riva. E' stata quindi definita una procedura 'standard' di rilievo a scala regionale che, rispondendo a requisiti quali la limitazione dell'intervallo temporale di esecuzione della misura e la precisione delle stessa, consentisse il contenimento dei costi, al fine di rendere praticabile la ripetizione annuale dell'osservazione. L'elaborazione di tale procedura, fondandosi sull'utilizzo di immagine satellitare ad alta risoluzione, ha reso necessario affrontare problematiche quali la scelta delle immagini e la georeferenziazione delle stesse. In merito alla scelta, l'analisi delle varie offerte del mercato ha portato a individuare nelle immagini riprese dalla piattaforma QB - e rilasciate nel formato 'Standard' - le immagini tecnicamente ed economicamente più rispondenti alle necessità di monitoraggio. Occorre osservare come tale scelta, maturata nel 2003, sia intrinsecamente legata alle variazioni di un mercato in continuo e repentino sviluppo. Ad esempio, la possibilità recentemente emersa di acquistare immagini 'tagliate' (vedi par. 3.1) anche in formato 'Basic' rende queste ultime maggiormente vantaggiose non solo dal punto di vista tecnico ma anche economico. Per quanto riguarda le tecniche di georeferenziazione, l'approccio RPFs con RPC si è dimostrato più robusto e più semplicemente implementabile rispetto ai modelli rigorosi, risultando inoltre determinante, nel rapporto costi-benefici, la sua larga diffusione a livello di software commerciali. Fondamentale è infine apparsa l'individuazione dei GCPs e CPs mediante tecniche di rilievo GPS, essendo risultata l'alternativa individuazione mediante utilizzo di CTRN fortemente condizionata, non solo dalla scala, ma anche dal grado di aggiornamento della cartografia utilizzata.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto SICORA (Supporto Informativo per la gestione della zona COstiera della Regione Abruzzo) finanziato dalla Regione Abruzzo. Gli autori intendono ringraziare il personale del Laboratorio di Topografia dell'Università degli Studi di Perugia per i preziosi consigli e delucidazioni, nonché la Dott. Francesca Giannone dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" per il paziente supporto nelle varie prove necessarie. Si ringrazia inoltre la "Digitalglobe" per la rapidità e la precisione del supporto tecnico.

Bibliografia

- AA.VV. (2001) - *COFIN 2001: Uso di immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali*. Atti a cura di Sergio Dequal. A.I.T – A.S.I.T.A. – S.I.F.E.T.
- Baiocchi V., Crespi M., De Vendictis L., Giannone F. (2004) - *Ortorettificazione di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi cartografici: metodologie ed implementazione di un nuovo software*. Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, SIFET, 2.
- Belfiore S., Balgos M., McLean B., Galofre J., Blydes M., Tesh D. (2003) - *A reference guide on the use of indicators for integrated coastal area management*. UNSCO-IOC, Manuals and Guides n.45.
- Boccardo P., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo F. (2003) - *High resolution satellite images position accuracy tests*. Atti IEEE International geoscience and remote sensing symposium, Toulouse.
- Boccardo P., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo F., Lingua A. (2004) - *Orthorectification of high resolution satellite images*. Atti XX ISPRS Congress, Istanbul.
- Borgogno Mondino E., Giulio Tomolo F., Rinaudo F. (2003) - *Calibrazione di immagini satellitari ad alta risoluzione. Il metodo dei rapporti polinomiali*. Atti 7 Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- Caprioli M., Scognamiglio A., Strisciuglio G., Tarantino E. (2003) - *Verifica dell'accuratezza nella generazione di ortoimmagini da dati satellitari Quickbird*. Atti 7 Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- Cheng P., Toutin T., Zhang Y., Wood M. (2003) - *Quickbird - geometric correction, path and block processing and data fusion*. Earth Observation Magazine, 3: 24-30.
- Cina A. (2000) - *GPS: Principi, modalità e tecniche di posizionamento*. Ed. CELID.
- Consorti V., Caputi P., De Girolamo P. (1999) - *La gestione integrata delle aree costiere con tecnologie GIS*. Atti III Conferenza Nazionale ASITA, Napoli.
- Coppola F., Lo Brutto M., Villa B. (2001) - *Proposte metodologiche per il controllo di qualità di un DTM*. Rivista dell'Agenzia del Territorio, 1: 129-143.
- Dardanelli G., Emmolo D., Franco V., Lo Brutto M., Midolla P., Orlando P., Villa B. (2003) - *Uso di immagini Quickbird per la formazione di ortofotocarte a scala 1:5000*. Atti 7 Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- De Girolamo P., Contini P., Mondini F. (1999) - *Proposta di pianificazione e coordinamento dei monitoraggi delle spiagge*. Atti del ciclo di seminari sulle opere portuali e di difesa delle coste, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Sezione Italiana AIPCN-PIANC.
- De Girolamo P., Caputi P., Visca C., Beltrami G.M., Venturini G., Bobbio V. (2005) - *L'esperienza di gestione integrata della costa dell'Abruzzo: il progetto S.I.Co.R.A.* Regioni & Ambiente, 7: 20-23.
- Dermanis A. e Biagi L. (2002) - *Telerilevamento - Informazione territoriale mediante immagine da satellite*. Casa Editrice Ambrosiana.
- Di K., Ma R., Li R. (2003a) - *Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS) 69: 33-41.
- Di K., Ma R., Li R. (2001) - *Deriving 3D shorelines from high resolution IKONOS satellite images with rational functions*. Proceedings of 2001 ASPRS Annual Convention, St Louis.
- Di K., Wang J., Ma R., Li R. (2003b) - *Automatic shoreline extraction from high-resolution IKONOS satellite imagery*. Proceedings of 2003 ASPRS Annual Convention, Anchorage.
- Digitalglobe (2005) - *QuickBird Imagery Products: Product Guide*. <http://www.digitalglobe.com>
- Fiani M. e Pistillo P. (2004) - *Test di georeferenziazione di immagini satellitari ad alta risoluzione: L'uso delle immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali*. Atti del COFIN 2001 dal titolo: "Uso di immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali". A.I.T – A.S.I.T.A. – S.I.F.E.T.
- Fondelli M. (2004) - *Cartografia tecnica regionale*. In Italia - Atlante dei tipi geografici, Istituto Geografico Militare, pp. 62-66.
- Fraser C.S. e Hanley H.B. (2003) - *Bias Compensation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS) 69: 53-57.
- Grassi S., Radicioni F., Stoppini A. (2003) - *Immagini QuickBird-2 ad alta risoluzione: comparazione qualitativa e metrica tra diversi formati commerciali*. Atti della VII Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- Grodecki J. e Dial G. (2003) - *Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Functions*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS), 69: 59-68.
- Kraus K. (1994) - *Fotogrammetria*. Levrotto & Bella, Torino.

- Li R., Di K., Ma R. (2003) - *3D shorelines extraction from IKONOS satellite imagery*. Marine Geodesy, 26: 107-115.
- Radicioni F., Grassi S., Mancini F. (2002) - *Utilizzazione di immagini satellitari ad alta risoluzione ai fini cartografici*. Atti VI Conferenza Nazionale ASITA. Perugia.
- Robertson B.C. (2003) - *Rigorous geometric modeling and correction of Quickbird imagery*. Atti IEEE International geoscience and remote sensing symposium, Toulouse.
- Rondella R., Forlani G., Remondino F. (2005) - *Photogrammetry for geological applications: automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes*. Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging SPIE. 5665: 17-27.
- Sylos Labini, G. (2003) - *Aereo vs satellite*. Cartographica, 2.
- Toutin T. (2003) - *Error Tracking in Ikonos Geometric Processing Using a 3D Parametric Model*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS), 69: 43-51.
- Toutin T. (2004) - *Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods*. International Journal of Remote Sensing, 25: 1893-1924.
- Toutin T. e Cheng P. (2002) - *Quickbird - A milestone for high resolution mapping*. Earth Observation Magazine, 4: 14-18.
- Università degli Studi di L'Aquila (1998) - *Rapporto N. 1 – Stato della zona costiera abruzzese*, Progetto RICAMA.

Manoscritto ricevuto il 29/3/2006; accettato il 24/7/2006.