

L'utilizzazione di immagini telerilevate ad alta risoluzione per lo studio dell'erosione costiera: estrazione della linea d'acqua e valutazione della sua accuratezza

Sara Carli ¹, Niccolò Iandelli ¹, Enzo Pranzini ¹ e Rosamaria Salvatori ²

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze.

² CNR - Istituto per lo Studio dell'Inquinamento Atmosferico,
Via Salaria, km 29.300 - 00016 Monterotondo Stazione (RM).

Riassunto

Il confronto fra le firme spettrali acquisite lungo un profilo di spiaggia in punti caratterizzati da diverse condizioni di umidità (sabbia asciutta, umida, satura e coperta da un velo d'acqua) mette in evidenza la difficoltà di identificazione della linea di riva su immagini telerilevate. La misura della distanza media fra la linea d'acqua rilevata *in situ* con DGPS e l'analoga linea estratta automaticamente da una immagine Ikonos ha consentito di valutare l'efficacia delle varie tecniche di elaborazione finalizzate al monitoraggio dell'erosione costiera.

Lo scostamento medio fra la linea d'acqua estratta dal rapporto B2/B4 e dall'NDVI è risultato inferiore alle dimensioni del pixel al suolo.

La distanza fra le due linee risulta essere minima in quei tratti di litorale in cui la pendenza della *nearshore* è elevata, mentre dove questa è modesta lo scostamento diventa estremamente variabile. L'accuratezza della linea d'acqua estratta da dati telerilevati è quindi tale da consentire il monitoraggio dell'erosione in quei tratti costieri in cui il tasso di arretramento è elevato. I risultati qui ottenuti consentono di affermare che i dati che verranno prodotti dai satelliti che stanno per essere messi in orbita, e che ospiteranno sensori a maggiore risoluzione spaziale e con bande di acquisizione più estese verso l'IR, consentiranno il controllo dell'erosione costiera anche dove il processo è meno intenso.

Parole chiave: telerilevamento, erosione costiera, Ikonos, firme spettrali.

Abstract

Comparison of spectral signatures acquired along a beach transect, in points characterised by different wetness conditions (sand that is dry, wet, saturated, and covered by a water layer) puts into evidence the difficulty that arises when identifying the shoreline position using satellite images, and suggests which are the best image processing techniques to be used for this end. Measuring the mean distance between the shoreline position obtained in situ using DGPS, and the corresponding shoreline position that was extracted automatically from an Ikonos image, allowed to evaluate the efficiency of different image processing techniques that are used in coastal erosion monitoring. The mean difference between the DGPS shoreline position, and the shoreline positions extracted from the B4/B2 rapport and from the NDVI were, respectively, 2.27 m and 2.89 m, being therefore smaller than the pixel dimensions at the ground.

The distance between the two shoreline positions results to be very short in those coastal sections where the slope of the nearshore is high, whereas distance varies considerably where this slope is low. The accuracy of the position of the water line extracted from remotely sensed data is able to allow erosion monitoring in

coastal sections which are under severe shoreline retreat. Our results allow to state that data that will come from satellites that will be put into orbit in the near future, hosting sensors at a higher spatial resolution which will have acquisition bands that are enlarged towards the IR, will allow to monitor coastal erosion even where this process is less intense.

Keywords: *Remote sensing, beach erosion, Ikonos, spectral signatures.*

Introduzione

Fin dal 1972, anno in cui si resero disponibili alla comunità scientifica i dati del primo satellite a media risoluzione per l'Osservazione della Terra (ERTS-1, poi ribattezzato Landsat-1) si cercò di utilizzarli per lo studio delle aree costiere, sia nella loro parte emersa che in quella sommersa (Nayak e Sahai, 1985; King e Green, 2003).

Nonostante gli ottimi risultati ottenuti nella caratterizzazione morfologica dei litorali, nello studio degli estuari e dei fondali, l'estrazione della linea di riva, sia in modo manuale che automatico, e quindi lo studio dei processi erosivi, non raggiunse mai risultati soddisfacenti per la scarsa risoluzione geometrica del sensore MSS (IFOW = 79 m x 79 m; dimensioni nominali del pixel = 56 m x 79 m).

La messa in orbita dei satelliti Landsat di seconda generazione (1982), con il sensore TM (Thematic Mapper), aprì nuove possibilità per lo studio dei litorali grazie alle ridotte dimensioni del pixel al suolo (IFOW = 30 m x 30 m nominali; 28.5 x 28.5 m nelle immagini georiferite) ed anche alla estensione della finestra di osservazione all'infrarosso medio, parte dello spettro elettromagnetico in cui la riflettività dell'acqua e della sabbia bagnata è prossima a zero.

Con SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre; 1986), oltre ad un ulteriore incremento della risoluzione geometrica nelle bande multispettrali (20 m), si creò la possibilità di una loro fusione con la banda Pancromatica con risoluzione di 10 m; cosa possibile dal 1999 con i dati Landsat ETM (Enhanced Thematic Mapper), in cui vi è una banda Pancromatica a 15 m.

L'accuratezza che si poteva raggiungere nella determinazione della posizione della linea di riva poteva quindi arrivare ad una decina di metri, anche se con tecniche di "unmixing" era teoricamente possibile scendere a valori ancora più bassi (Yates et al., 1993).

Per il monitoraggio di breve e medio termine dell'erosione costiera una simile accuratezza non era sufficiente, dato che lo spostamento della linea di riva procede in genere con tassi annuali assai inferiori, anche se vi sono casi di arretramento maggiori, come quelli registrati sul delta del Nilo (39m/anno; Frihy et al., 1998) e sul delta del Gange-Brahmaputra (25 m/anno; Allison, 1998), dove infatti i dati telerilevati furono usati con successo.

Anche in Italia, dove il 42% delle spiagge è in erosione (G.N.R.A.C., 2006), i tassi massimi di arretramento si verificano sui delta fluviali e si attestano proprio intorno ai 10 m/anno: delta dell'Arno e dell'Ombrone (Pranzini, 2001), del Tevere (Caputo et al., 1986) e del Po, (Cecini, 1998). In genere, però, raramente superano i 5 m/anno. Con i dati rilevati da satellite non era quindi possibile effettuare un vero monitoraggio del fenomeno, a meno di non accettare un errore nel posizionamento della linea di riva dello stesso ordine di grandezza del dato che si andava a misurare.

Recentemente sono stati messi in orbita nuovi sensori che riprendono immagini ad altissima risoluzione spaziale e rendono quindi possibile affrontare il problema del monitoraggio dell'erosione costiera con dati da remoto.

I satelliti Ikonos e Quickbird, ad esempio, acquisiscono immagini multispettrali con risoluzione rispettivamente di 4 m e 2.40 m, ed immagini pancromatiche a 1 m e 0.61 m di risoluzione, e quindi compatibili con l'entità del fenomeno da monitorare.

Entrambi i sensori, però, operano solo nell'intervallo spettrale compreso tra 450 e 900 nm e di conseguenza non acquisiscono dati in quelle bande dell'infrarosso in cui l'acqua modifica sensibilmente la risposta spettrale delle superfici e che permettono quindi di enfatizzare il contrasto terra-acqua, o meglio, sabbia asciutta-sabbia bagnata.

Nonostante ciò, il monitoraggio dell'erosione costiera da satellite diventa una possibilità concreta, anche se non sono state ancora sviluppate quelle metodologie certe ed efficaci di estrazione automa-

tica della linea di riva che renderebbero il processo di analisi e confronto rapido e completamente indipendente dall'operatore.

Nell'ambito del Progetto BEACHMED-e l'Unità operativa di Firenze sviluppò e testò una procedura di estrazione della linea di riva da dati Landsat TM che consentiva il tracciamento semiautomatico della linea di riva, intesa come l'isobata "zero". Il processo si basava sull'identificazione del bordo acqua-non acqua fatta su di una banda rilevata nell'InfraRosso Vicino (NIR), nell'estrazione della linea di contatto attraverso l'applicazione di un filtro *edge detection* e nella sua traslazione in funzione della pendenza della spiaggia (da rilievi a terra indipendenti) e dei valori di marea astronomica e barica. In questo modo l'accuratezza raggiunta si aggirava intorno ad 1-2 pixel (BEACHMED, 2004).

In questo lavoro si intende valutare l'efficacia dei tradizionali algoritmi di estrazione della "linea d'acqua" da immagini ad alta risoluzione; ove per linea d'acqua si intende l'insieme dei punti in cui terra, mare ed aria si incontrano (Pranzini, 2004). Ovviamente questa linea non costituisce un *datum* assoluto, ma questo può essere ricavato con le tecniche di traslazione prima citate.

I dati utilizzati sono quelli acquisiti dal satellite Ikonos e l'area di test corrisponde ad un tratto del litorale del Golfo di Follonica.

L'area di studio: la spiaggia di Follonica

La spiaggia antistante l'abitato di Follonica (Fig. 1) fa parte dell'unità fisiografica che si estende dal promontorio di Piombino al Puntone di Scarlino ed è alimentata prevalentemente dal F. Cornia, dal F. Bruna e dal Fosso di Valmaggiore.



Figura 1 - Immagine Ikonos della spiaggia di Follonica acquisita il 18/04/2007 (Bande 1-2-3; B-G-R) sulla quale sono state effettuate tutte le elaborazioni. Nel riquadro il tratto di costa per il quale vengono presentati i dati nelle figure successive (in blu la linea d'acqua rilevata con GPS).

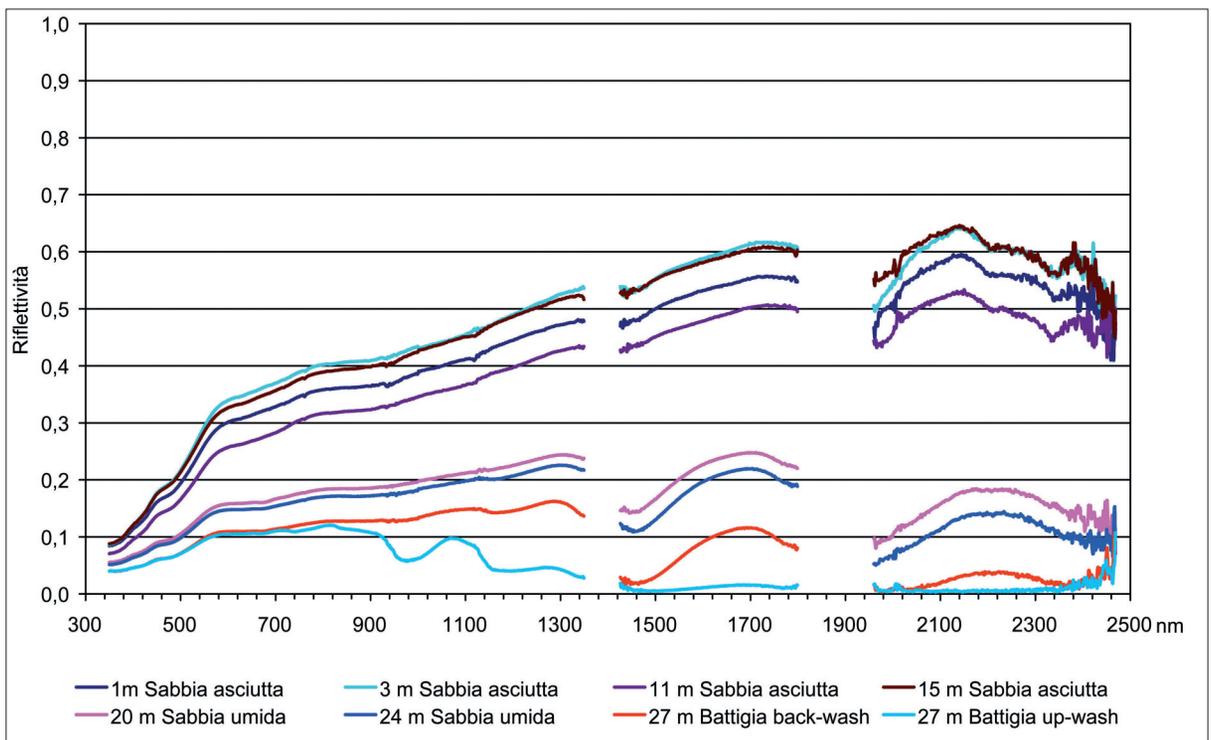
I sedimenti che formano la spiaggia di Follonica sono costituiti da *sabbia fine* ($2 < Mz < 3 \text{ phi}$) *ben classata* ($0.35 < \sigma_1 < 0.50 \text{ phi}$) secondo la classificazione di Folk e Ward (1957). Nella composizione mineralogica principale prevale il Quarzo monocristallino (56%) e subordinatamente i frammenti litici carbonatici (18%); seguono poi i frammenti litici metamorfici (10%), i Feldspati potassici (7%) e i litici terrigeni (5%). Fra i minerali pesanti prevalgono Augite, Epidoto e Picotite (Gandolfi e Paganelli, 1975).

Il litorale del Golfo di Follonica è entrato in erosione nel XIX sec., quando i principali corsi d'acqua che lo alimentano furono deviati per la bonifica delle numerose aree palustri presenti lungo la costa (Bartolini et al., 1977). Nel XX secolo furono le variazioni di uso del suolo nei bacini di alimentazione e le estrazioni di inerti in alveo a favorire il perpetuarsi del processo erosivo che, nel tratto di litorale in questione, è stato combattuto fin dagli anni '60 con la costruzione di opere di difesa aderenti, parallele emerse e sommerse e pennelli, che conferiscono oggi alla linea di riva una forte variabilità.

La firma spettrale della spiaggia

Per valutare come la presenza di acqua modifichi la risposta spettrale dei sedimenti di spiaggia, sono state effettuate misure *in situ* per acquisire la firma spettrale della sabbia asciutta, bagnata e coperta da un velo d'acqua. A questo scopo è stato utilizzato un radiometro FieldSpec 3 (ASD inc. USA) con risoluzione spettrale di 1 nm nell'intervallo 350 ÷ 2500 nm, mediando 10 misure successive ed utilizzando un pannello di *Spectralon* come superficie di riferimento per il calcolo della riflettanza.

Le misure sono state effettuate in 8 punti lungo un transetto ortogonale a riva partendo dalla spiaggia alta e giungendo sulla battigia: in 4 punti sulla spiaggia asciutta, in 2 all'interno della fascia bagnata e in uno sulla battigia. In quest'ultimo punto la misura è stata fatta sia in fase di *wash-up* (con uno spessore di circa 1 cm di acqua) sia in fase di *wash-down* (spiaggia saturata). In Figura 2 compaiono le firme spettrali nel range 350 ÷ 2500 nm, mentre in Figura 3 sono tracciate le firme spettrali limitatamente all'intervallo di acquisizione del sensore posto a bordo del satellite Ikonos, del quale sono indicati i valori medi delle quattro bande.



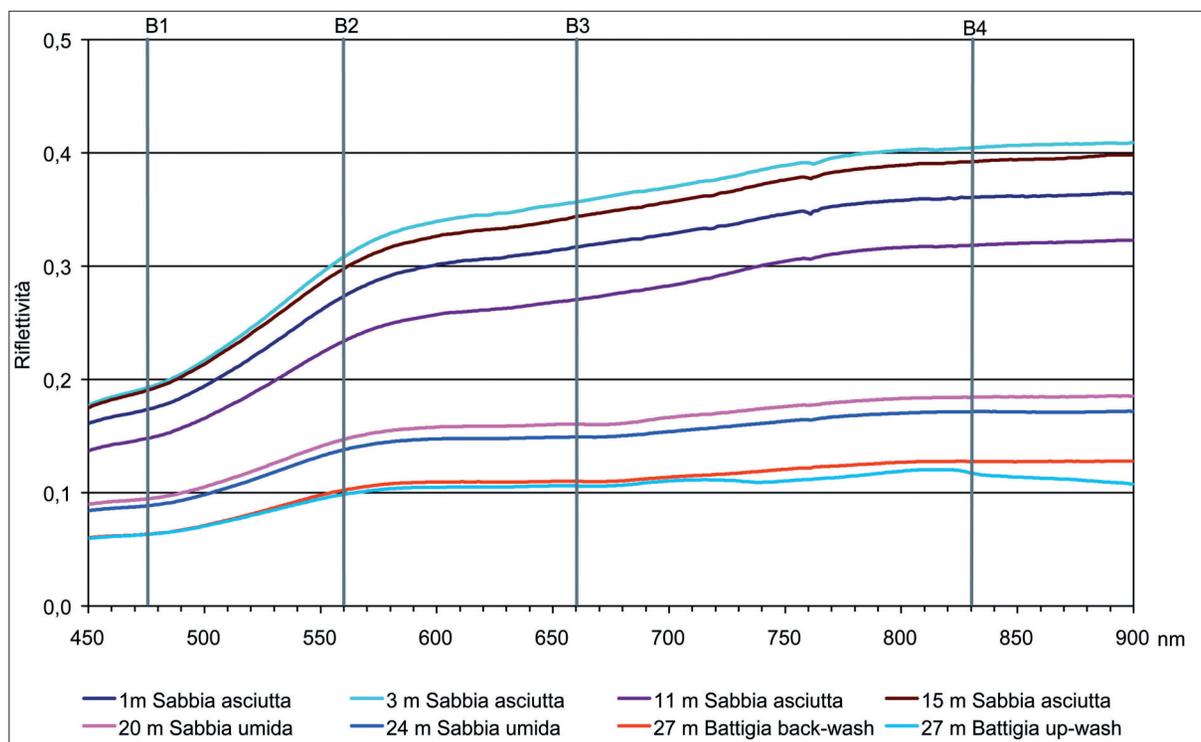


Figura 2 - Firme spettrali nell'intervallo 350 ÷ 2500 nm acquisite lungo un transetto ortogonale a riva sulla spiaggia di Follonica.

Figura 3 - Firme spettrali nell'intervallo 450 ÷ 900 nm acquisite lungo un transetto ortogonale a riva sulla spiaggia di Follonica. È indicato anche il centro dell'intervallo spettrale di acquisizione delle 4 bande multispettrali Ikonos. Scala verticale limitata al valore di 0.5.

La sabbia asciutta mostra valori di riflettività estremamente bassi al limite inferiore del visibile fra 350 e 450 nm, ma che crescono rapidamente andando verso il rosso, per poi proseguire a crescere in modo più leggero fino ai 2200 nm. Per i quattro punti osservati la variazione di riflettanza è circa del 10% e sembra non esserci correlazione tra i valori di riflettanza e la distanza lungo il transetto.

La sabbia bagnata, nella zona che era stata interessata dal *run-up* poche ore prima delle misure, mostra un andamento simile ma con una variabilità minore e con valori decisamente più bassi nel visibile ed ancor più bassi nell'IR vicino e medio, evidenziando così la presenza di acqua, che a queste lunghezze d'onda assorbe la radiazione solare, come già osservato in spiagge diverse (Deronde et al., 2006).

La battigia, sia nel momento di *wash-up* che di *wash-down* ha riflettività identica fino a 650, nm per differenziarsi poi con un abbassamento rapido nella fase in cui è coperta da un velo d'acqua; le differenze sono ovviamente ancora maggiori nell'NIR dove l'acqua ha riflettività praticamente uguale a zero.

Purtroppo le differenze maggiori fra le firme acquisite si manifestano oltre il range di acquisizione del sensore a bordo di Ikonos, mentre fra 450 e 900 nm i valori di riflettività sono piuttosto omogenei e le curve hanno un andamento circa parallelo.

L'albedo nel range 475 ÷ 900 nm è di 0.309 per la sabbia asciutta, 0.128 per quelle umida, 0.108 per quella saturata e di 0.101 per l'acqua.

Questi valori mostrano che una discriminazione fra le superfici non è semplice, fatta eccezione per la separazione fra sabbia asciutta e sabbia umida, tanto da fare pensare che, in assenza di un controllo a terra, la gran parte delle elaborazioni presenti in letteratura per l'identificazione della linea di riva nella banda pancromatica del sensore Ikonos mettano in realtà in evidenza il limite superiore raggiunto dal *run-up* nelle ore precedenti l'acquisizione.

Tabella 1 - Misure di campo ricampionate per l'ampiezza delle bande Ikonos e valore dei due rapporti che hanno permesso la migliore discriminazione fra le superfici analizzate.

Bande Ikonos (nm)	1 m Sabbia asciutta	3 m Sabbia asciutta	11 m Sabbia asciutta	15 m Sabbia asciutta	20 m Sabbia umida	24 m Sabbia umida	27 m Battigia back-wash	27 m Battigia up-wash
Pan 450 ÷ 900	0.3030	0.3405	0.2631	0.3297	0.1567	0.1459	0.1078	0.1015
B1 450 ÷ 520	0.1839	0.2047	0.1570	0.2018	0.1003	0.0938	0.0675	0.0671
B2 510 ÷ 600	0.2621	0.2948	0.2239	0.2857	0.1404	0.1316	0.0972	0.0941
B3 630 ÷ 700	0.3181	0.3585	0.2723	0.3450	0.1611	0.1498	0.1105	0.1067
B4 760 ÷ 850	0.3575	0.4012	0.3157	0.3886	0.1826	0.1697	0.1262	0.1166
B2/B4	0.7331	0.7349	0.7095	0.7352	0.7693	0.7751	0.7707	0.8070
B3/B4	0.8899	0.8937	0.8626	0.8878	0.8825	0.8826	0.8760	0.9147

La verità al suolo

Nel presente studio la verità al suolo è costituita dalla linea d'acqua acquisita in contemporanea al sorvolo del satellite da due squadre che operavano con un DGPS in modalità RTK.

Al momento del rilievo il mare era calmo e la posizione della linea d'acqua era facilmente individuabile dagli operatori. I rilievi sono stati effettuati fra un'ora prima ed un ora dopo il passaggio del satellite, cosa che ha contenuto le variazioni di marea astronomica e barica entro i 5 cm che, data la modesta pendenza della battigia (media 4.76%), implicano uno spostamento della linea d'acqua di circa ± 0.5 m.

In alcuni punti è stata rilevata anche la posizione del limite fra la sabbia bagnata e quella asciutta, che corrisponde alla posizione raggiunta dal *run-up* alcune ore prima del rilievo, e dista in media 6.0 m dalla linea d'acqua.

Elaborazione delle immagini

L'elaborazione delle immagini è stata effettuata con il software ENVI ver. 4.4 e i risultati sono stati confrontati con la verità al suolo in ambiente GIS (ESRI ArcGIS, ver. 9.1).

Una prima fase di elaborazione è consistita in semplici *stretch* lineari delle varie bande, nello *slicing* in due livelli, nell'estrazione del bordo con filtro *edge detection*.

Successivamente, sono state effettuate differenze normalizzate e rapporti fra bande (Fig. 4), per procedere poi ad elaborazioni più complesse, dall'Analisi delle Componenti Principali al *Ratio Transform Method* (Stumpf e Holderied, 2003); è stata effettuata anche una classificazione *unsupervised* (ISO-DATA) in due classi, ipoteticamente "acqua" e "non acqua" (Alphan, 2005).

Dato che le varie elaborazioni producono immagini con una distribuzione bimodale dei valori digitali, esse sono state oggetto di *slicing* in due livelli ponendo la separazione nel cavo presente fra le due mode, in modo da rendere più oggettiva la decisione. Nel caso in cui gli indici portino a valori positivi e negativi, è stato usato lo zero come valore di separazione. Per consentire una più chiara comprensione dei risultati delle varie elaborazioni, nella Figura 4 sono riprodotte le bande Ikonos come appaiono prima della separazione di toni.

Le linee di riva così estratte sono state confrontate con la posizione della linea d'acqua rilevata *in situ*, calcolandone la distanza lungo 33 profili per i quali è stata misurata la pendenza del tratto compreso fra le quote 0.0 e -0.5 m su di un rilievo batimetrico effettuato due mesi dopo il sorvolo. Il tratto studiato è difeso intensamente da scogliere parallele e le condizioni meteomarine dei due mesi intercorsi consentono di ritenere che non si siano verificate variazioni significative della pendenza del profilo di spiaggia nel tratto considerato.

Tabella 1 - Distanza media fra la linea di riva estratta dall'immagine Ikonos e quella rilevata *in situ* con DGPS. I valori negativi indicano che la linea telerilevata è posta a terra rispetto a quella "vera".

	GPS - B4	GPS - NDVI	GPS - NDWI	GPS - UNSUP	GPS - RWD Algorithm	GPS - (B2/B4)	GPS - PCA1 (Green vs NIR)
Media	-8.40	-2.89	11.85	-3.83	-7.61	-2.27	-4.75
Dev. Std.	5.42	2.11	11.57	3.01	5.66	2.21	2.59

Sono state effettuate anche elaborazioni sulle bande multispettrali dopo averne portato la risoluzione ad 1 m con una tecnica di fusione con la banda Pancromatica (*Pan-sharpening*), ma i risultati raggiunti non sono stati soddisfacenti per problemi relativi alle tecniche di ricampionamento: quella basata sul *nearest neighbour* delocalizza i valori originari dei pixel con spostamenti dello stesso ordine di grandezza dell'accuratezza raggiunta, mentre quella basata sull'interpolazione (bilineare o cubica) riduce il contrasto spettrale fra i pixel d'interesse che hanno già differenze modestissime.

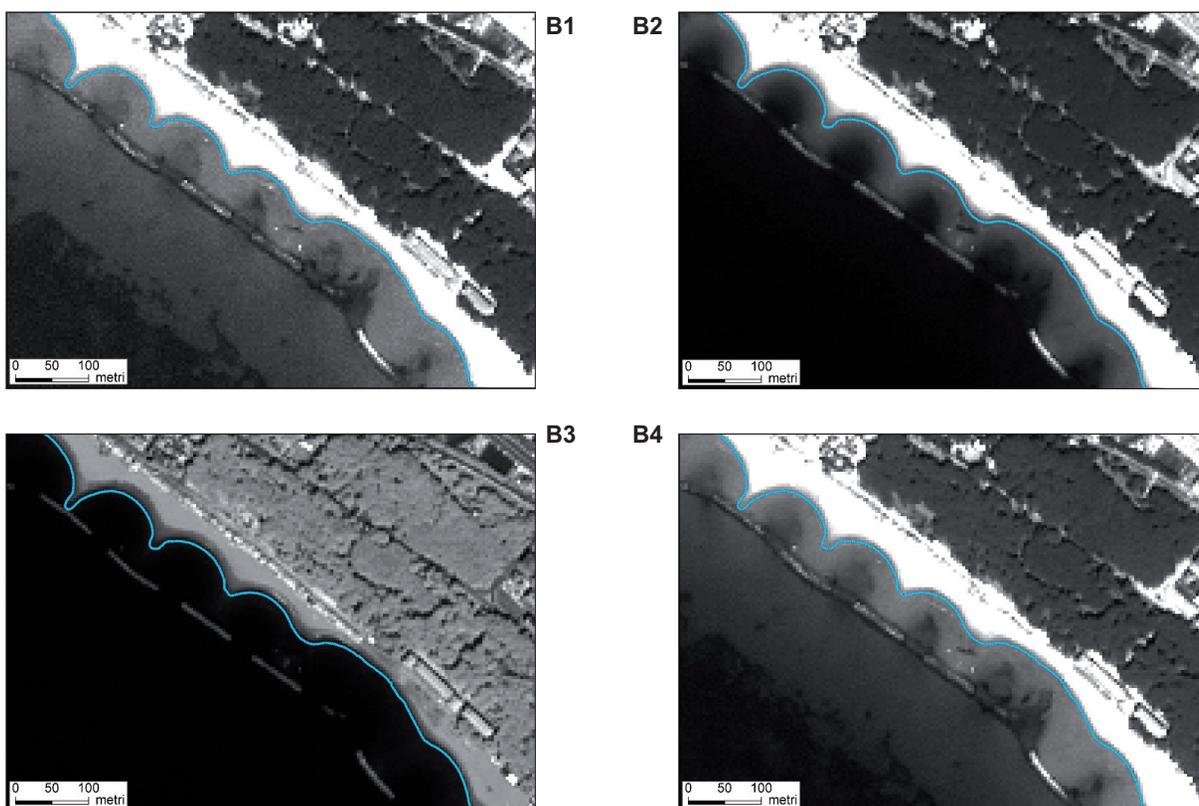


Figura 4 - Le 4 bande di Ikonos con sovrapposta la linea d'acqua GPS.

Infrarosso vicino

Fra le singole bande (Fig. 4) quella che consente la discriminazione migliore fra acqua, sabbia bagnata e sabbia asciutta è la Banda 4, come appare anche dalle firme spettrali di Figura 3. Nonostante ciò, nei 33 transeetti considerati lo scostamento medio della linea d'acqua estratta dopo aver effettuato uno *slicing* in due livelli e aver sottoposto l'immagine risultante ad un filtro *edge detection*, lo scostamento dalla linea DGPS è risultato pari a -8.40. Nel risultato influisce in modo determinante il valore del livello di grigio sul quale porre la separazione fra "acqua" e "non acqua", decisione estremamente soggettiva dato che le due mode non sono separate nettamente.

Rapporto fra bande

Il rapporto fra bande viene in genere usato per ridurre l'effetto rilievo dalle immagini (Crippen et al., 1988), cosa ovviamente non necessaria nel nostro caso; l'utilizzazione che qui ne viene fatta si basa sulla possibilità di separare superfici che hanno un diverso gradiente di riflettanza in un determinato intervallo spettrale.

Sebbene nel range 450 ÷ 900 nm le curve rappresentative della firma spettrale delle diverse superfici di spiaggia siano circa parallele, si osserva che da 560 nm a 830 nm (B2 + B4) il gradiente è leggermente diverso fra la curva dell'acqua e quella della battigia. Infatti, fra tutti i rapporti fra bande possibili (Fig. 5) è proprio il rapporto B2/B4 quello che porta ad una migliore discriminazione fra le due superfici considerate, con uno scostamento medio della linea d'acqua di 2.27 m rispetto a quella GPS.

Il rapporto B3/B4 esplicita il gradiente fra 660 nm e 830 nm, che è leggermente diverso fra la firma della spiaggia umida e quella della spiaggia asciutta e consente quindi di delimitare in modo netto il limite superiore del *run-up* nelle ore precedenti l'acquisizione.

Fra i rapporti è l'unico che non consente di vedere le scogliere parallele, che assumono lo stesso livello di grigio del mare; queste sono costituite da massi molto scuri ed hanno una "cresta bassa" tale da renderle costantemente bagnate: non sorprende quindi che abbiano una risposta simile a quella della zona di *run-up* che, in questa elaborazione, viene associata al mare.

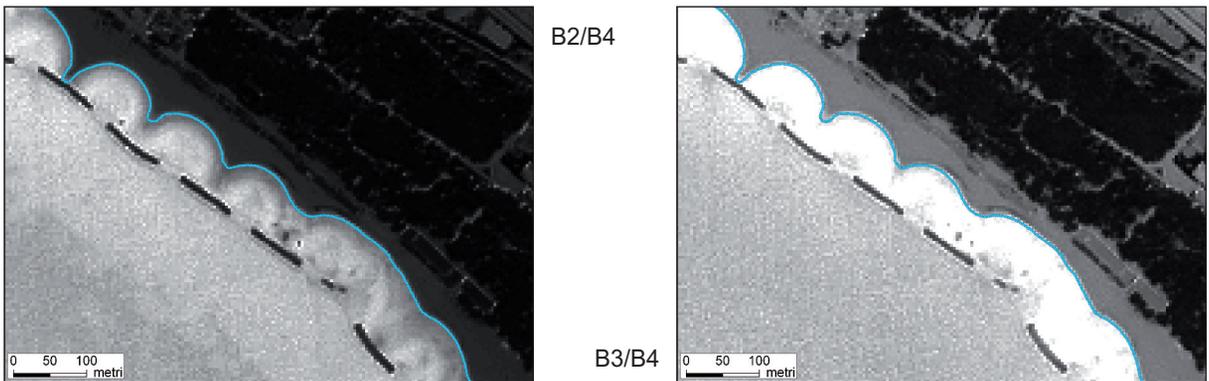


Figura 5 - Rapporti fra le bande del satellite Ikonos. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

NDVI

Il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) è un algoritmo semplice ma estremamente robusto per valutare la densità e lo stato della vegetazione e opera sul contrasto spettrale Rosso *vs* InfraRosso Vicino. E' stato utilizzato in passato anche per mappare gli specchi d'acqua, in particolare in aree vegetate (Hirose et al., 2005). Nel nostro caso ha prodotto risultati interessanti, consentendo di posizionare la linea d'acqua ad una distanza media di soli 2.89 m da quella "vera".

NDWI

Il *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (McFeeters, 1996) inverte i termini dell'NDVI ed usa la banda del Verde al posto di quella del Rosso: $(Green - NIR) / (Green + NIR)$. In questa elaborazione l'acqua assume valori positivi, mentre il suolo e la vegetazione valori negativi; la sabbia asciutta, con riflettività elevata sia nel Verde che nell'NIR viene ad avere valori positivi ma prossimi a zero.

Nell'area di test i risultati di questa elaborazione non sono stati soddisfacenti, con uno scostamento della linea d'acqua di ben 11.85 m dalla linea "vera"; inoltre è l'unica elaborazione che posiziona il contatto terra-acqua a mare rispetto alla linea DGPS. In effetti, come appare anche nella Figura 6b, l'errore è molto forte dietro alle scogliere parallele, dove la pendenza della spiaggia è minima e si hanno bassi fondali fino alle opere di difesa. Questo algoritmo, nel caso studiato, tende quindi a "non vedere" i piccoli spessori d'acqua che coprono la battigia e i fondali antistanti.

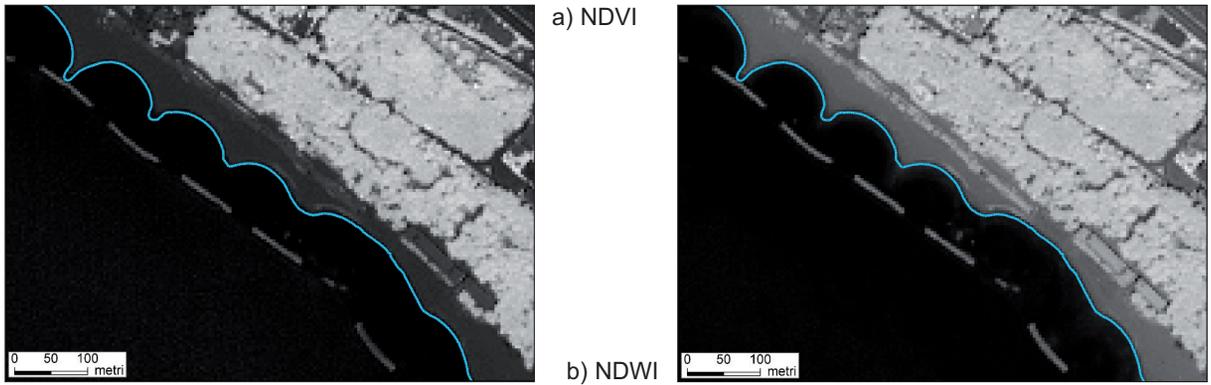


Figura 6 - Immagini NDVI e NDWI prodotte dalle bande del satellite Ikonos. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

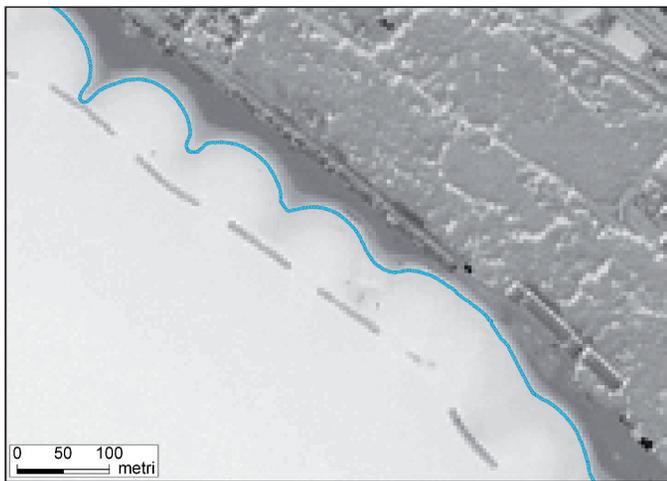


Figura 7 - Immagine della PC1 calcolata con le Bande 2 e 4 del satellite Ikonos. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

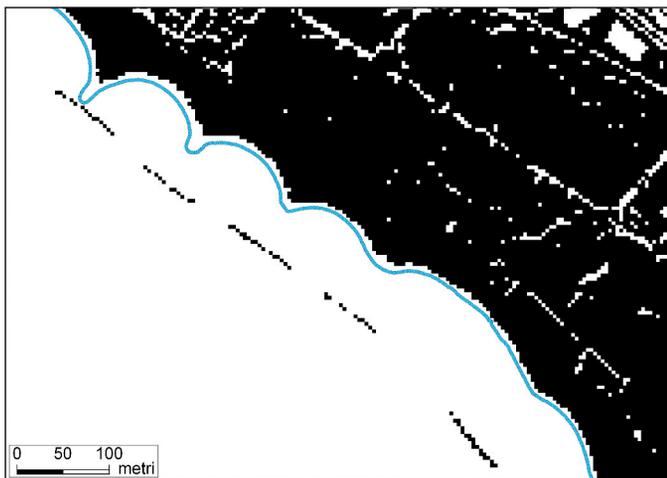


Figura 8 - Immagine della Relative Water Depth con *slicing* a 0 m. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

Analisi delle Componenti Principali

L'Analisi delle Componenti Principali (PCA) è una elaborazione statistica utilizzata frequentemente in telerilevamento per generare, dalle bande originali fortemente correlate, nuove bande sintetiche non correlate.

Essa porta necessariamente a risultati dipendenti dalla statistica del *data set* e non consente interpretazioni codificate delle immagini prodotte. Già il taglio della scena influenza i risultati e quanto ottenuto per il nostro *subset* non è trasferibile ad altre aree dello stesso Golfo di Follonica. Fra le varie elaborazioni possibili, mostriamo qui l'immagine della Prima Componente Principale (PC1) estratta dal *data-set* costituito solo dalle Bande 2 e 4, quelle che avevano prodotto il migliore rapporto. La linea d'acqua estratta da questa immagine ha uno scostamento medio di 4.75 m dalla linea "vera".

Ratio Transform Method

Il *Ratio Transform Method* (Stumpf e Holderied, 2003) è stato sviluppato per la determinazione della profondità relativa fra due o più zone sulla base dei valori di riflettanza nel Blu e nel Verde e contiene al suo interno le opportune correzioni radiometriche ed atmosferiche. L'uso che ne viene fatto in questo lavoro è quindi "atipico", in quanto la differenza di profondità cercata è quella fra le zone emerse e quelle sommerse. L'immagine prodotta, in effetti, presenta un istogramma con due mode ben separate, ma lo *slicing* in due livelli porta ad una discriminazione fra sabbia asciutta, da un lato, e battigia + acqua, dall'altro, ma non consente un accurato tracciamento della linea d'acqua (scostamento medio 7.61 m).

Valutazione dei risultati in funzione della pendenza della spiaggia

Per la linea d'acqua ottenuta con la migliore accuratezza, quella prodotta dal rapporto B2/B4, si è analizzato come si distribuisce l'errore in funzione della pendenza della battigia, essendo questo il parametro che determina lo spessore della lamina d'acqua ad una determinata distanza dalla linea d'acqua effettiva.

Il confronto fra pendenza ed errore (distanza fra linea GPS e linea derivata da Ikonos) mostra in modo chiaro questa correlazione: laddove la pendenza è maggiore l'accuratezza della linea derivata è assai migliore (Fig. 9).

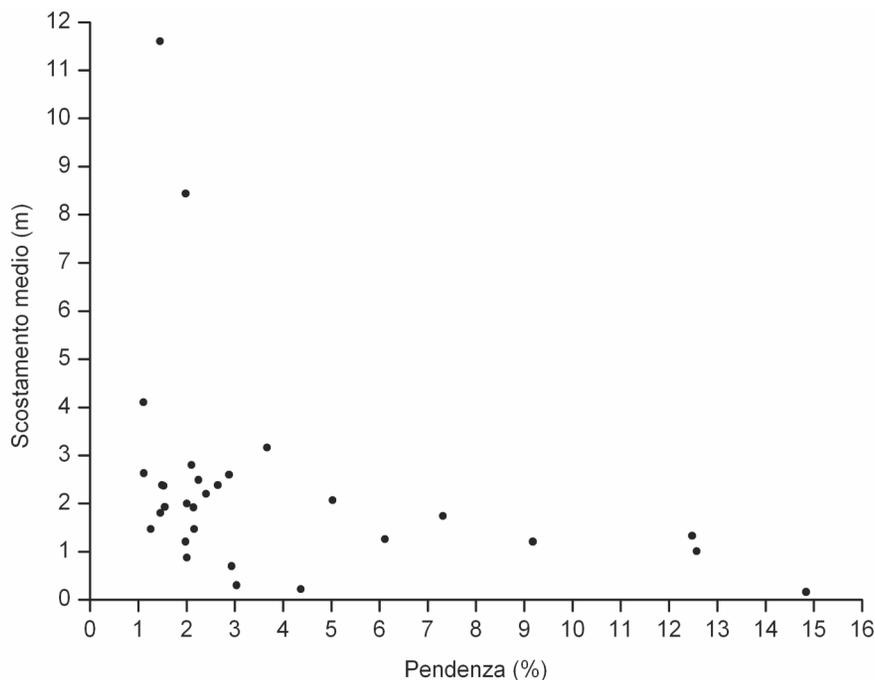


Figura 9 - Confronto fra pendenza della spiaggia e scostamento della linea di riva estratta dal rapporto B2/B4 dalla linea DGPS.

La dispersione dei punti è estremamente elevata a pendenze modeste, dove si hanno scostamenti sia piccoli che grandi, ma con pendenza superiore al 6% lo scostamento risulta sempre inferiore ai 2 m. I tratti di litorale in cui l'accuratezza è minore sono quelli più direttamente difesi dalle scogliere parallele, che formano salienti con una pendenza del profilo di spiaggia estremamente modesta (Fig. 10).



La dispersione dei punti è estremamente elevata a pendenze modeste, dove si hanno scostamenti sia piccoli che grandi, ma con pendenza superiore al 6% lo scostamento risulta sempre inferiore ai 2 m. I tratti di litorale in cui l'accuratezza è minore sono quelli più direttamente difesi dalle scogliere parallele, che formano salienti con una pendenza del profilo di spiaggia estremamente modesta (Fig. 10).

Figura 10 - Linea di riva estratta dal rapporto B2/B4 (in rosso) linea d'acqua da DGPS (punti ciano). Si noti come la distanza fra le due linee sia maggiore nel tratto più riparato dalla scogliera parallela, dove la pendenza della spiaggia è minore.

Conclusioni

I dati rilevati dal satellite Ikonos consentono di tracciare con buona approssimazione la linea d'acqua lungo i litorali sabbiosi, elemento di partenza per ottenere la posizione della linea di riva tramite la correzione per la marea astronomica e barica.

La linea d'acqua estratta dall'immagine rapporto B2/B4 mostra uno scostamento medio pari a 2.27 m rispetto alla linea acquisita *in situ* nel momento del passaggio del satellite. È ragionevole pensare che risultati analoghi, in rapporto delle dimensioni del pixel al suolo, siano raggiungibili con i dati prodotti dai satelliti che ospitano sensori che acquisiscono nelle stesse bande spettrali. In questo senso l'accuratezza raggiungibile con immagini Quickbird dovrebbe essere pari a circa 1.40 m.

I buoni risultati ottenuti nel nostro test sono certamente dovuti alla bassa riflettività della sabbia del Golfo di Follonica, che mostra un'albedo di 0.309 nel range di osservazione di Ikonos; non è detto che in spiagge costituite da sabbie più chiare si possa ottenere un'accuratezza simile.

D'altra parte, la spiaggia di Follonica ha una pendenza modesta anche nei tratti non difesi dalle scogliere e si ritiene che l'algoritmo proposto, ed anche gli altri qui meno efficaci, possa portare a risultati decisamente migliori in spiagge più ripide.

In conclusione, i dati prodotti dai sensori ad alta risoluzione consentono l'estrazione della linea di riva con un'accuratezza sufficiente a garantire un monitoraggio di medio e lungo termine dei processi erosivi dei litorali, mentre per l'analisi di breve periodo, dove sono attese variazioni di qualche metro, la risoluzione spaziale e spettrale dei sensori attualmente in orbita non consente ancora di operare in modo efficace.

In realtà è oggi operativo il satellite Geo-Eye-1, con una banda pancromatica con risoluzione di 0.41 m e 4 bande multispettrali a 1.64 m, ma il dato pancromatico è commercializzato dopo un ricampionamento che abbassa la risoluzione a 0.50 m, in osservanza delle restrizioni del governo americano. Le bande multispettrali potrebbero comunque consentire un'accuratezza di circa 1 m.

Più che di un incremento della risoluzione spaziale dei sensori, per i nostri scopi è auspicabile l'estensione dei rilievi all'infrarosso medio, ma la minore quantità di energia in arrivo dal Sole a queste lunghezze d'onda rende difficile la realizzazione di un sensore capace di attivarsi se non raccogliendo luce da una superficie maggiore. In questa direzione le attese sono poste in WorldView-II che, oltre alla banda pancromatica con risoluzione 0.41 m (degradata a 0.50 m), ospiterà un sensore con risoluzione di 1.84 m in multispettrale con una banda nell'intervallo $0.86 \div 1.04$. Non siamo ancora nell'infrarosso medio, ma le misure che abbiamo effettuato indicano che in questo range l'acqua ha una risposta spettrale assai diversa da quella della spiaggia satura. Le possibilità di un monitoraggio dell'erosione costiera con dati rilevati da satellite si faranno assai più concrete.

Ringraziamenti

Ricerca effettuata nell'ambito dell'Operazione BEACHMED-e "La gestione strategica della difesa dei litorali per lo sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo".

Si ringrazia Roberto Salzano del CNR-IIA (Roma) per la collaborazione fornita nell'esecuzione delle misure di riflettività della spiaggia.

I rilievi topografici e batimetrici sono stati effettuati dalla GeoCoste (Firenze).

Bibliografia

- Allison M.A. (1998) - *Historical changes in the Gange-Brahmaputra delta front*. Journ. Coastal Research, 14: 480-490).
- Alphan H. (2005) - *Perceptions of coastline changes in river deltas: southeast Mediterranean coast of Turkey*. International Journal of Environment and Pollution, 23: 92-102.
- Aminti P., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2002) - *Beach erosion control along the Golfo di Follonica (Southern Tuscany): actual hard protections vs. potential soft solutions*. Littoral 2002, 6th Int. Symp., Porto, Portogallo. Pp. 355-363.
- Bartolini C., Pranzini E., Lupia Palmieri C. e Caputo C. (1977) - *Studi di geomorfologia costiera: IV - L'erosione del Golfo di Follonica*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 87-116.
- BEACHMED (2004) - *Quaderno tecnico n. 3*. Roma, pp. 275.

- Caputo C., La Monica G.B., Lupia Palmieri E. e Pugliese F. (1986) - *Physiographic characteristics and dynamics of the shore of Rome*. International Geomorphology, John Wiley & Sons, Part 1, pp. 1185-1189.
- Cecini C. (1998) - *Physical processes and human activities in the evolution of the Po delta, Italy*. Journ. Coastal Research, 14: 774-793.
- Crippen R.E., Blom R.G. e Heyada J.R. (1988) - *Directed band ratioing for the retention of perceptually-independent topographic expression in chromaticity-enhanced imagery*. Int. J. Remote Sensing, 9: 794-765.
- Deronde B., Houthuys R., Henriët J.-P., Van Lancker V. (2007) - *Monitoring of the sediment dynamics along a sandy shoreline by means of airborne hyperspectral remote sensing and LIDAR: a case study in Belgium*. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 33, Issue 2, Pagg. 280-294.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. J. Sedim. Petrol., 27: 3-26.
- Frihy O.E., Dewider K.M. e El Banna M.M. (1998) - *Natural and human impact on the northeastern Nile delta coast of Egypt*. Journ. Coastal Research, 14: 1109-1118.
- Gandolfi G. e Paganelli L. (1975) - *Il litorale toscano fra Piombino e la foce dell'Ombrone (Area campione Alto Tirreno). Composizione, provenienza e dispersione delle sabbie*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1911-1832.
- GNRAC (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. Studi Costieri 10, pp. 176.
- Hirose K., Soyji M., Hang H.T.M., Anh N.H., Triet T. Nam V.N., e Tran T.B. (2005) - *Satellite data application for mangrove management*. 16th Workshop OMISAR, pp. 7.1-7.4.
- Innocenti L. e Pranzini E. (1993) - *Geomorphological evolution and sedimentology of the Ombrone River delta (Italy)*. Journ. Coastal Research, 9: 481-493.
- King S.D. e Green D.R. (2003) - *Matching issue to utility: an hierarchical store of remotely sensed imagery for coastal zone management*. In Green e King Ed., Coastal Systems and Continental Margin, Vol. 4, Coastal and Marine Geo-Information Systems. Kluwer Academic Publishers, pp. 473-486.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. e Chipman J.W. (2008) - *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 756.
- McFeeters S.K. (1996) - *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. Int. J. Remote Sensing, 17: 1425-1432.
- Nayak, S.R. e Sahai, B. (1985) - *Coastal morphology: a case study in the Gulf of Khambhat*. International Journal of Remote Sensing, 6: 559-568.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. Geomorphology, 1-2: 125-132.
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli, Bologna, pp. 246.
- Stumps R.P. e Holderied K. (2003) - *Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types*. Limn. Oceanogr., 48: 547-556.
- Yates M.G., Jones A.R., McGroarty S e Gross-Custard J.D. (1993) - *The use of satellite imagery to determine the distribution of inter-tidal surface sediments of the Wash, England*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 36: 333-344.

Manoscritto ricevuto il 13/11/2007, accettato il 18/02/2008.