

Individuazione della linea di costa mediante immagini satellitari multispettrali ad alta risoluzione

Valerio Baiocchi (*), Raffaella Brigante (**), Donatella Dominicin (***), Fabio Radicioni (**)

(*) DICEA – Dipartimento Ingegneria Civile Edile ed Ambientale, Area di Geodesia e Geomatica, “Sapienza”

Università di Roma, Via Eudossiana 18, I-00184 Roma, valerio.baiocchi@uniroma1.it

(**) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia, topos@unipg.it

(***) Dipartimento di Architettura e Urbanistica, Università degli Studi dell’Aquila, via Gronchi 12

Zona industriale di Pile, 67100, L’Aquila, donatella.dominici@univaq.it

Riassunto

La sperimentazione in oggetto è volta alla definizione di una metodologia di individuazione della linea di costa, o linea istantanea di riva, tramite delle immagini riprese dal satellite WorldView 2, con 8 bande spettrali, aventi risoluzione geometrica pari a 0.5 m per l’immagine pancromatica e 1.8 m per quella multispettrale. In particolare viene utilizzata una metodologia di classificazione *pixel based* con la quale si identificano i vari tipi di copertura del suolo, oltre ad effettuare combinazioni tra le 8 bande disponibili.

Le 8 bande in cui è ripresa l’immagine consentono di ottenere buoni risultati sia nel processo classificativo sia nella combinazione tra bande, tramite gli algoritmi NDVI, NDWI, SAM, FM, riguardo alla identificazione delle varie coperture del suolo e in particolare della linea di separazione sabbia asciutta-sabbia bagnata. Sicuramente risultati migliori possono essere ottenuti utilizzando dati altimetrici (modelli di geoide e modelli digitali del terreno) unitamente a quelli radiometrici presenti sulle immagini.

Abstract

In the present paper is shown a methodology for coastline identification from WorldView 2 images, available in 8 spectral bands, with 0.5 m of spatial resolution for panchromatic image and 1.8 m for the multispectral image. In particular, a "pixel based" multispectral classification was used to identify various types of land cover. The 8 bands allow to get good results both in the classification process and with NDVI NDWI, SAM, FM algorithms, for the identification of various land cover and in particular to separate dry sand and wet sand. Better results surely can be obtained by using elevation data (geoid models and digital terrain models) as well as those present on the radiometric image.

Introduzione

L’ambiente costiero rappresenta la fascia di transizione tra le terre emerse ed il mare. Si tratta di una risorsa naturale ed economica di straordinario valore, sottoposta però ad una continua ed incessante trasformazione. L’ambiente costiero è infatti un sistema altamente dinamico dove i fenomeni di erosione, e quindi di arretramento o di avanzamento della linea di costa, sono controllati da numerosi fattori meteorologici, geologici, biologici ed antropici (si pensi alla crescente urbanizzazione del territorio costiero a partire dal secondo dopoguerra, legata allo sviluppo socio-economico, con il continuo incremento di attività industriali, commerciali e turistico-ricreative con la necessità di nuove strutture a supporto). Molti studiosi sia oggi che in passato si sono occupati delle problematiche relative alla definizione e alla restituzione della linea di costa, argomento piuttosto complesso a causa delle numerose incertezze che emergono sia nell’individuare una

definizione chiara e universalmente accettata di linea di costa, sia nel definire idonei metodi di monitoraggio del litorale e dei suoi cambiamenti. Attualmente il telerilevamento sta divenendo uno dei metodi più utilizzati per studi di questo tipo, grazie agli enormi vantaggi rappresentati da questa tecnica (possibilità di riprendere aree vaste in un'unica immagine, alta risoluzione geometrica dei sensori montati a bordo dei satelliti di ultima generazione, capacità di riprendere la scena in più bande spettrali,...).

Modificazioni dell'ambiente costiero

Con il termine "dinamica costiera" si indica il complesso dei fenomeni che governano l'evoluzione della fascia costiera nel tempo. La descrizione dell'evoluzione della linea di costa richiede l'analisi delle dinamiche sia fluviali che marine; dalle terre emerse le coste ricevono, infatti, attraverso i fiumi, gran parte dei sedimenti che alimentano le spiagge. Il mare, mediante l'azione delle onde e delle correnti, contribuisce in modo determinante a modellare la conformazione della costa, svolgendo una triplice azione di erosione, trasporto e accumulo dei sedimenti costieri. Tale opera modellatrice del mare può portare o all'arretramento della linea di costa, quando prevalgono i suoi effetti erosivi, o ad un avanzamento, nel caso siano preponderanti i processi di accumulo, spesso con entrambi i fenomeni agenti contemporaneamente in settori costieri contigui. In Italia si alternano due principali tipologie morfologiche costiere naturali:

- coste alte e rocciose (costa morfologicamente accidentata e articolata, con pareti molto ripide, spesso subverticali, parallele alla linea di riva) per circa il 34% del totale;
- coste basse e sabbiose (spiaggia più o meno ampia a debolissima pendenza, con eventuale presenza di sistemi dunali) per circa il 58%.

Il restante 8% è costituito da foci e coste banchinate.

L'ampiezza della fascia costiera può essere condizionata, talvolta in modo significativo, dai fenomeni di *subsidenza* ed *eustatismo*. La *subsidenza* è un processo a lungo termine di lento abbassamento del terreno, legato alla naturale costipazione dei sedimenti fini nelle pianure alluvionali, spesso acuito dall'estrazione di acqua e idrocarburi dal sottosuolo. Con il termine *eustatismo* si indicano invece le modificazioni a lungo termine, sia positive che negative, del livello del mare, legate a cause climatiche (Antonoli, Silenzi, 2007).

Inoltre, variazioni anche repentine della linea di costa possono essere indotte da movimenti tettonici, per lo più associati a terremoti di forte magnitudo. Un parametro morfologico importante è costituito dalle variazioni storiche subite dalla linea di riva, che consentono di effettuare numerose analisi mirate a definire le naturali tendenze evolutive di un litorale; è possibile in tal modo individuare le zone soggette a fenomeni erosivi o accrescitivi locali dovuti alla realizzazione di opere litoranee, calibrare modelli numerici di evoluzione della linea di riva, stimare il bilancio solido della fascia costiera, ecc.

Individuazione della linea di costa

Elemento chiave nel monitoraggio delle modificazioni dell'ambiente costiero (sia della parte emersa che sottomarina) risulta essere la determinazione della *linea di riva* e la sua *restituzione come linea di costa*. La fascia costiera è infatti quella porzione di territorio emerso e sommerso che contiene la linea di riva (figura 1) ed è sottoposta a processi geomorfologici sia continentali che marini.

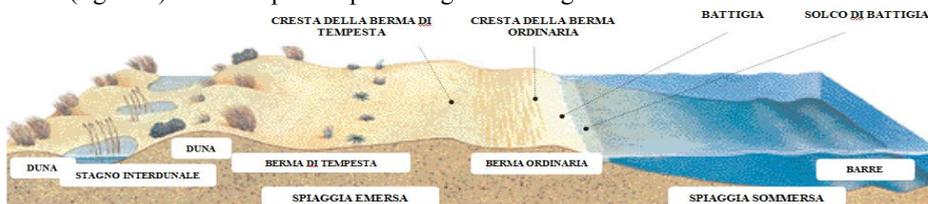


Figura 1 – Battigia: limite tra sabbia asciutta e sabbia bagnata.

La linea di riva è l'espressione più evidente di come questo settore sia particolarmente dinamico registrando in modo più o meno immediato le tendenze evolutive in corso (Cervino et al, 2010).

La valutazione della posizione e dei cambiamenti della linea di costa è una considerazione importante per scienziati, ingegneri, e coloro che sono impegnati nella gestione delle coste anche nel campo della progettazione e dell'ingegneria. La posizione del litorale e del suo cambiamento storico è in grado di fornire informazioni importanti per la progettazione di opere di protezione delle coste, piani per lo sviluppo costiero, e la taratura e la verifica dei modelli numerici (Klein et al, 2006). Alla continua crescita di interesse a cui è soggetta l'area costiera si aggiunge la preoccupazione del rischio e delle conseguenze della crescente pressione antropica (sulla costa si concentrano più dei due terzi della popolazione mondiale). Da qui la necessità di supportare la pianificazione della fascia costiera con il *monitoraggio della linea di riva* con rilievi ravvicinati nel tempo al fine di correggere le variabilità stagionali o le singolarità indotte da mareggiate intense e quindi la necessità di individuare dei metodi sempre più efficienti per la sua estrapolazione che risultino un buon compromesso tra accuratezza, costi e tempi. Un monitoraggio efficace presuppone lo sviluppo di tecnologie idonee a fornire conoscenze nel tempo utili alla salvaguardia, alla prevenzione, all'intervento e alla gestione. Non esiste un unico metodo per la modellazione di litorale, che è stato ampiamente accettato dalle comunità costiere, anche se negli ultimi dieci anni si è assistito ad un grande progresso nella tecnologia di *mapping* che va dallo sviluppo di nuove e sempre più precise apparecchiature GPS (Global Positioning System), alla messa in orbita di satelliti ad alta ed altissima risoluzione, fino allo sviluppo di dispositivi particolarmente efficienti per la valutazione della topografia costiera come il LIDAR (Light Detection And Ranging) (Tarig, 2003).

Tecniche di rilievo

In questa sede non verranno trattati i metodi di acquisizione della spiaggia sommersa, ma ci si soffermerà maggiormente sulle tecniche di rilievo della spiaggia emersa. Tra i più comuni metodi attualmente in uso si ricordano (Ivaldi, Surace, 2010):

- Indagini topografiche tradizionali (livellazione, rilievi con stazioni totali) e GPS (modalità RTK): consentono di ottenere precisioni elevate (precisioni millimetriche per quanto riguarda la livellazione geometrica, centimetriche con stazioni totali e sistemi di posizionamento GPS), ma forniscono un rilievo “per punti”;
- Immagini aeree: hanno la necessità di essere ortorettificate (mediante la conoscenza di un DSM) e mosaicate, ma forniscono un rilievo non puntuale come le tecniche precedenti, rappresentando l'intera area di studio al momento della ripresa; le precisioni ottenibili sono centimetriche-subdecimetriche, ma i costi sono elevati;
- Airborne Videografia: tecnica simile alla fotogrammetria, in cui la camera fotogrammetrica è sostituita da una telecamera. A causa di una non elevatissima risoluzione geometrica dei dati acquisiti, tale tecnica consente di effettuare un'analisi di tipo qualitativo dei cambiamenti più che quantitativo;
- Sistemi video: consentono di effettuare rilievi ad elevata frequenza (in genere ogni ora diurna) per mezzo di sistemi composti da 4-5 telecamere installati su punti prominenti del paesaggio o su supporti appositamente posizionati, che coprono una vista di 180° e permettono una copertura totale di circa 4-6 chilometri di spiaggia. L'immagine acquisita è obliqua e necessita di una operazione di *ortorettificazione* oltre che di una *georeferenziazione* (Kroon et al, 2007).
- Telerilevamento satellitare: facendo riferimento ai satelliti per il telerilevamento di ultima generazione, si può sicuramente affermare che tale tecnica sta diventando sempre più competitiva rispetto alle altre sopra menzionate. Rispetto alla fotogrammetria aerea consente un'acquisizione dei dati ed un'elaborazione degli stessi più rapida, con precisioni paragonabili data l'alta risoluzione geometrica che consente di riprodurre un dettaglio elevatissimo. Inoltre importantissima è la capacità di riprendere la scena in più bande

spettrali, consentendo di ottenere molte più informazioni rispetto a quelle estraibili indagando la scena solo nel campo del visibile e di creare delle mappe tematiche del territorio mediante classificazione multispettrale. I tempi di rivisitazione molto brevi (qualche giorno) inoltre consentono di effettuare studi di monitoraggio della zona in esame, mettendo in relazione immagini riprese in tempi diversi.

Immagini WorldView 2

Il satellite *WorldView 2*, messo in orbita nell'ottobre 2009, completa la costellazione di satelliti commerciali della società *DigitalGlobe*, già formata dai satelliti *WorldView-1* (lanciato nel 2007) e *QuickBird* (lanciato nel 2001). *WorldView-2* opera ad una quota di 770 km con un'inclinazione di 97.2° per un periodo orbitale massimo di 100 minuti. E' equipaggiato con una strumentazione che consente una grande capacità di raccolta di immagini multispettrali ad alta risoluzione, e una grande efficienza nella ripresa di immagini stereoscopiche. La risoluzione di *WorldView-2* nella banda pancromatica è di 46 cm, mentre nel multispettrale è di 1.8 m, tuttavia la distribuzione e l'uso di immagini con risoluzione maggiore di 50 cm nel pancromatico e 2 m nel multispettrale è soggetta all'approvazione del governo degli USA. L'elevata *risoluzione spaziale* permette la discriminazione dei dettagli, come i veicoli, i bassi fondali e i singoli alberi in un frutteto, mentre l'alta *risoluzione spettrale* fornisce informazioni dettagliate su diversi settori quali la qualità del manto stradale, la profondità del mare, e la salute delle piante. Le immagini sono riprese in 8 bande spettrali, infatti, oltre alle 4 bande standard, blu, verde, rosso e infrarosso vicino, *WorldView-2* include 4 nuove bande a 1.8 metri di risoluzione: *coastal blue, yellow, red edge e near infrared-2* (figura 2).

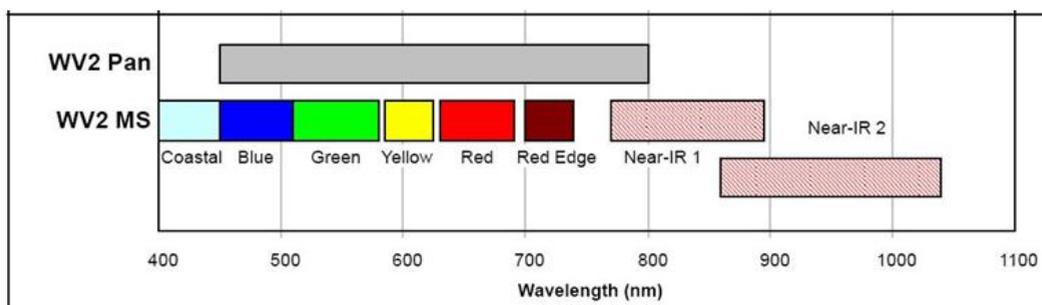


Figura 2 – Bande spettrali del satellite WorldView 2.

Queste bande offrono diversi vantaggi agli utenti nell'identificazione di un maggior numero di classi di copertura del suolo (ad esempio più varietà di vegetazione), nell'estrazione di un numero maggiore di *features*, nel monitoraggio dei cambiamenti dell'uso del suolo ed eventuali abusi e violazioni e nella visualizzazione delle immagini più realistica, molto più vicina alla naturale visione umana. Ulteriori informazioni sul satellite *WorldView 2* sono riportate sul sito <http://www.digitalglobe.com>.

Area di studio e materiale a disposizione

L'immagine utilizzata, concessa a scopo di ricerca dalla *Planetek Italia S.r.l.*, è stata ripresa dal satellite *WorldView-2* nella zona della baia di Salvador, capitale dello stato brasiliano di Bahia (figura 3). Salvador si trova sulle coste dell'oceano Atlantico con litorali sabbiosi e rocciosi. La terraferma è prevalentemente pianeggiante con una zona ampiamente edificata dove abitazioni e infrastrutture dominano di gran lunga sugli spazi verdi e liberi.

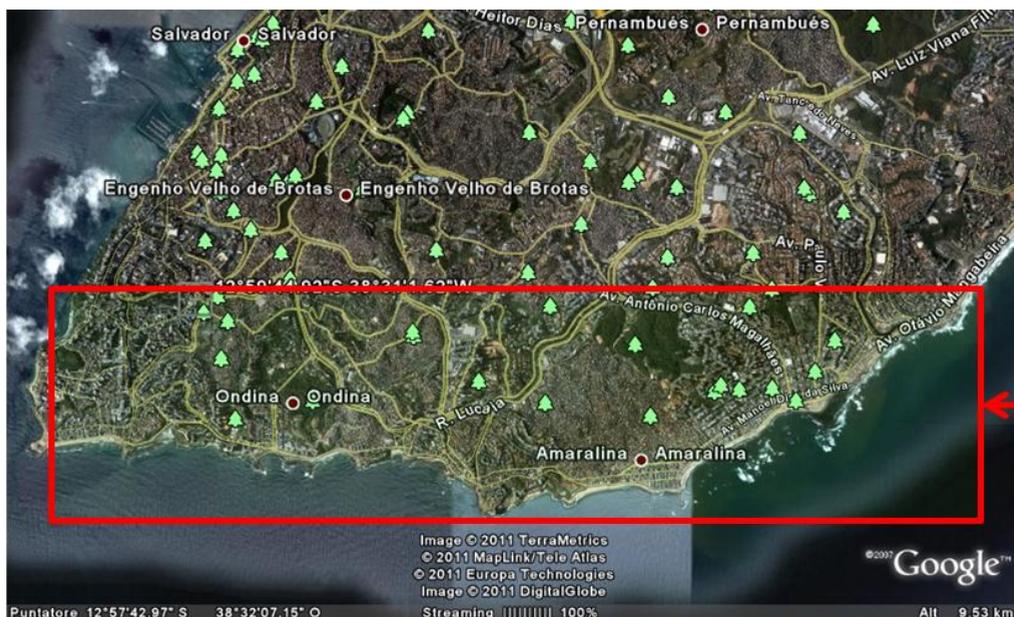


Figura 3 – Area di studio.

In questa sperimentazione si vogliono testare le potenzialità di tale immagine per l'individuazione e la restituzione della linea di costa, o meglio della *linea istantanea di riva*; in particolare la ricerca è rivolta all'individuazione di un algoritmo che permetta l'estrazione della linea di costa in modo automatico o semiautomatico. Tutte le elaborazioni sono state condotte utilizzando il software commerciale ENVI 4.7 della ITT specifico per la visualizzazione, l'analisi e la classificazione di differenti tipi di immagini telerilevate.

Analisi singole bande e combinazioni tra bande

La prima operazione effettuata nella sperimentazione in oggetto è stata la creazione dell'immagine *pansharpened* di un ritaglio rappresentativo dell'area di studio (figura 4), attraverso l'algoritmo *Gram-Schmidt*, che consente di integrare il dettaglio geometrico dell'immagine pancromatica a 0,5 m di risoluzione spaziale con l'informazione radiometrica dell'immagine multispettrale a otto bande ma a risoluzione spaziale più bassa (risoluzione di 1,8 m), per produrre un'immagine multispettrale ad elevata risoluzione (figura 5).

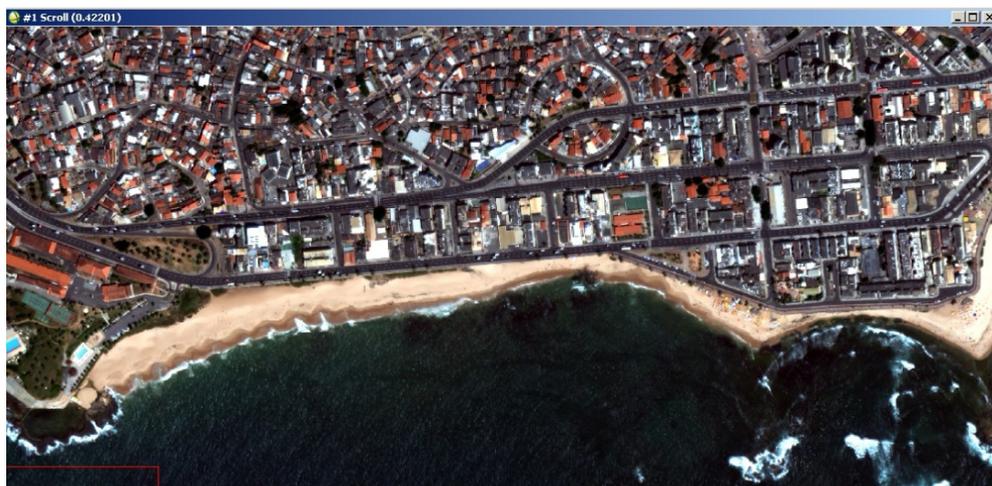


Figura 4 – Ritaglio rappresentativo dell'area di studio.



Figura 5 – Immagine multispettrale, pancromatica e pansharpened.

Dapprima sono state eseguite varie prove nelle diverse bande caricate singolarmente e come combinazioni di bande (colori reali e falsi colori) per individuare quale di queste risultasse particolarmente sensibile alla presenza di acqua. Successivamente sono state applicate tecniche di classificazione *pixel-based* e sono stati sfruttati alcuni algoritmi utilizzati nello studio della vegetazione e dell'acqua (come l'indice di vegetazione normalizzato NDVI e l'indice NDWI) in modo da poter evidenziare meglio la collocazione della linea di costa. Tra le 8 bande disponibili, quella che maggiormente evidenzia il contrasto tra sabbia asciutta (molto chiara) e sabbia bagnata (grigio scuro) è la NRI 2, mentre stessa differenziazione viene messa maggiormente in risalto dalle combinazioni tra le tre bande Yellow-Green-Blue e NR1-NR2-Red Edge. Sono state effettuate anche delle sezioni in cui in ordinata è rappresentato il valore radiometrico dell'immagine, che mette in risalto un brusco cambiamento di pendenza della curva nel passaggio tra sabbia asciutta e sabbia bagnata (figura 6).

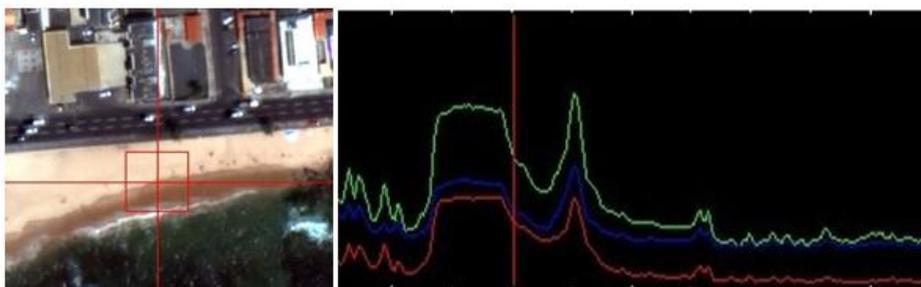


Figura 6 – Profilo dell'immagine nelle bande RGB.

Successivamente si è valutato l'indice di Vegetazione NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), un algoritmo semplice ma altamente affidabile per stimare la densità e lo stato della vegetazione, che sfrutta la diversa risposta della copertura vegetale alle bande spettrali del visibile (rosso) e del vicino infrarosso, e fornisce un valore numerico adimensionale compreso tra -1 e +1. La sua espressione è la seguente:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Quest'indice può essere utilizzato anche per ottenere utili informazioni sulla linea di costa; infatti si è osservato che sull'interfaccia acqua/sabbia l'indice NDVI assume valori compresi tra -0,1 e -0,5. Un altro indice utilizzato per lo studio delle aree coperte d'acqua è il NDWI (*Normalized Difference Water Index*), analogo al NDVI, ma che utilizza la banda del verde al posto del rosso.

$$NDWI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$$

In questo caso l'acqua assume valori positivi mentre il terreno e la vegetazione assumono valori negativi; la sabbia asciutta, con alta riflettanza sia nel verde che nel NIR presenta valori positivi ma molto vicini allo zero.

Individuazione automatica della vegetazione e delle masse d'acqua

Il software Envi consente di effettuare una completa analisi sulla presenza e sullo stato di salute della vegetazione presente nell'immagine, sfruttando le informazioni contenute nelle bande del rosso e dell'infrarosso mediante l'algoritmo *vegetation delineation*. Tale algoritmo crea in maniera automatica tre classi di vegetazione (sparsa, moderata e densa) che possono essere utilizzate in una classificazione multispettrale dell'immagine come *Region of interest (ROI)* (figura 7).

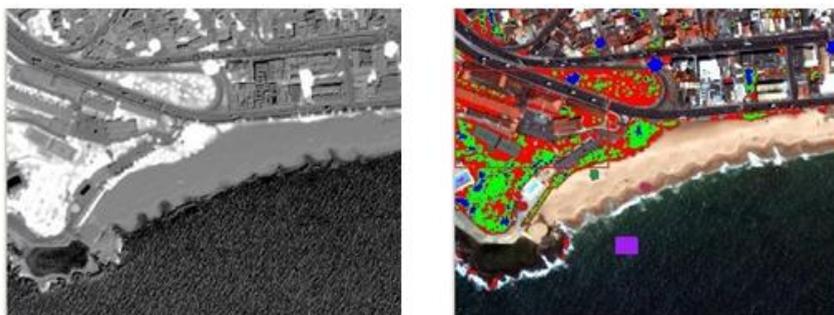


Figura 7 – NDVI e ROI ottenute dall'algoritmo *vegetation delineation* (in rosso vegetazione sparsa, in verde vegetazione moderata e in blu vegetazione densa).

Un processo analogo, sempre utilizzabile in Envi, consente di studiare la presenza di aree coperte d'acqua, sfruttando le informazioni contenute nelle bande del verde, blu, rosso e infrarosso, separandole in *Muddy Water* e *Dark Water*, tramite gli algoritmi MF (*Matched Filtering*), SAM (*Spectral Angle Mapper*) e il rapporto fra i due, che meglio evidenzia la separazione tra sabbia asciutta e sabbia bagnata (figura 8).



Figura 8 – Il rapporto MF/SAM evidenziata con una colorazione molto chiara la sabbia bagnata.

Un profilo effettuato su questa immagine consente di evidenziare delle brusche variazioni della pendenza della curva in prossimità dei passaggi tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua. In figura 9 in verde è evidenziata la zona corrispondente alla sabbia asciutta, in giallo la sabbia bagnata e in ciano il mare. In corrispondenza delle frecce rosse si identificano i passaggi tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua.

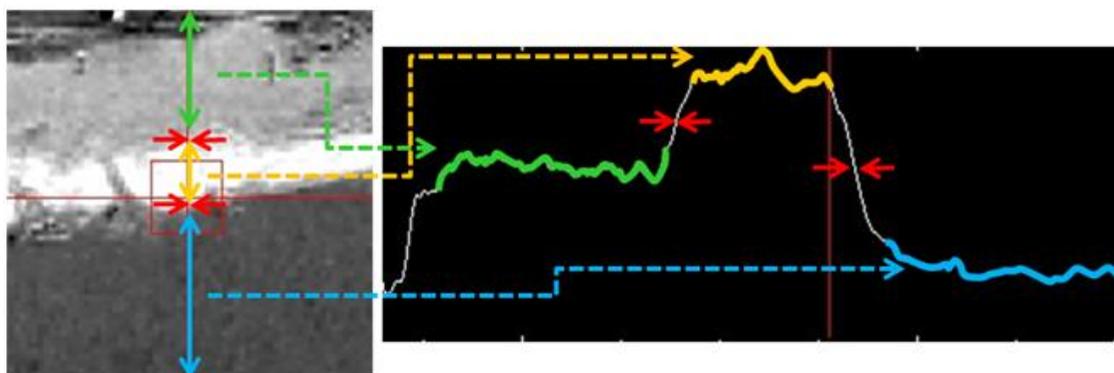


Figura 9 – Passaggio tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua sulla curva rappresentativa del rapporto FM/SAM.

In figura 10 sono state sovrapposte tutte le curve ottenute in corrispondenza della stessa sezione rappresentanti gli indici NDVI, NDWI, FM, SAM, FM/SAM. Tutte le curve hanno andamento simile, soprattutto in corrispondenza dei passaggi tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua, in cui si nota una brusca variazione di pendenza.

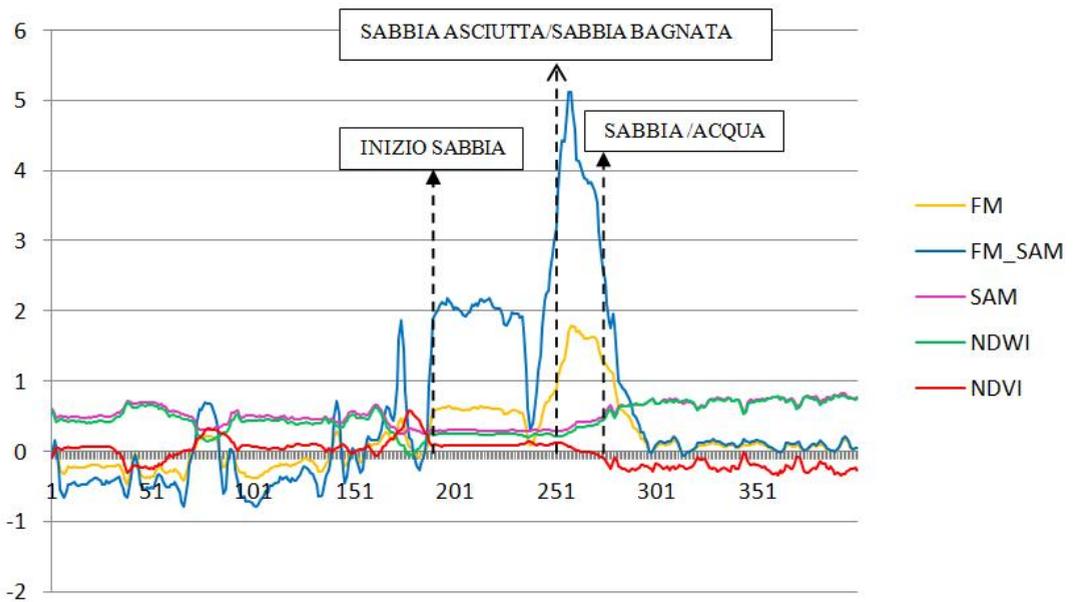


Figura 10 – Andamento NDVI, NDWI, SAM, FM, FM/SAM.

Classificazione multispettrale

In ultima analisi sull'area di studio è stata effettuata una classificazione multispettrale supervisionata mediante l'algoritmo *Maximum Likelihood* (Massima Verosimiglianza). Sono state definite diverse regioni di interesse (ROI) tra cui 4 diversi tipi di edifici, sabbia asciutta, sabbia bagnata, strade, piscine, marciapiedi, ombre, onde, mare e letre classi per la vegetazione individuate automaticamente dallo strumento di Envi *vegetation delineation*. Come risultato si è ottenuta una nuova immagine in cui ad ogni pixel è associato un *digital number* rappresentativo della classe di copertura del suolo corrispondente (figura 11).

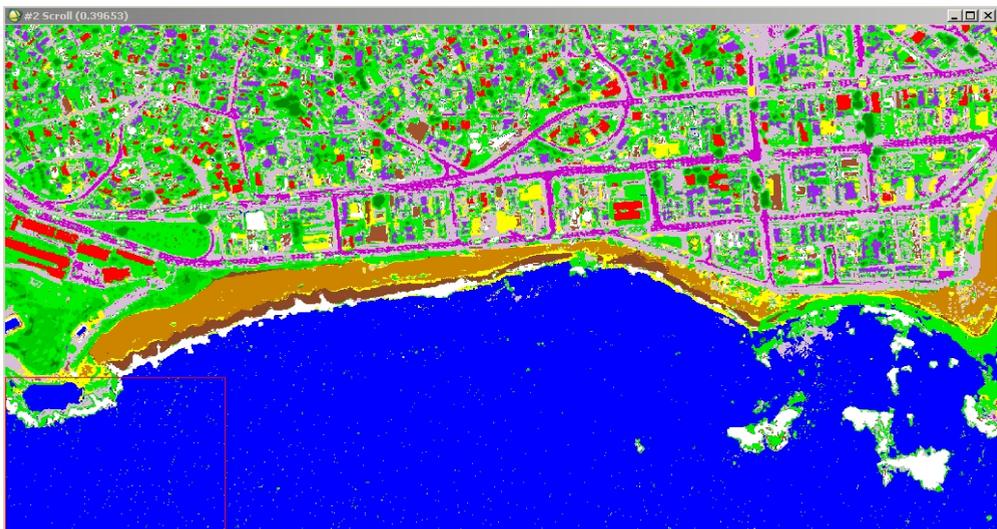


Figura 11 – Immagine classificata.

Le classi relative agli edifici e alla vegetazione sono quelle che meglio sono state individuate, come mostrato in figura 12, ma anche in corrispondenza della separazione sabbia asciutta-sabbia bagnata-mare si è ottenuto un buon riconoscimento della copertura del suolo.



Figura 12 – Risultati della classificazione multi spettrale.

Si sono inoltre effettuate ulteriori elaborazioni in modo da evidenziare maggiormente la separazione tra sabbia asciutta e sabbia bagnata, inglobando tutte le classi individuate in due sole categorie (zone in giallo e in marrone in figura 13). La separazione tra queste due classi può essere vettorializzata ottenendo uno *shapefile* (contorno rosso) utilizzabile in successive analisi.

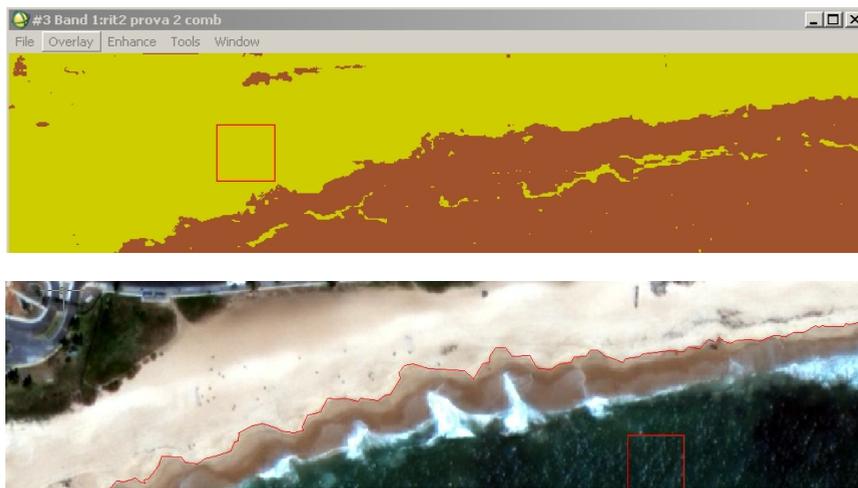


Figura 13 – Separazione sabbia asciutta-sabbia bagnata e settorializzazione.

Problematiche e sviluppi futuri

Al fine di testare l'accuratezza e l'affidabilità delle procedure sperimentate, si dovrà procedere ad un confronto fra la linea di riva estratta dalle immagini satellitari (sia tramite fotointerpretazione che con tecniche di riconoscimento automatico e semiautomatico) e quelle ottenute da cartografia per un controllo grossolano o tramite misure a terra GPS o tradizionali condotte contemporaneamente o a poche ore di distanza dall'acquisizione dell'immagine per un controllo più di dettaglio. Per tale motivo è in corso una nuova sperimentazione su alcune immagini satellitari WorldView 2 per una zona costiera adriatica (Ortona) di cui si ha a disposizione cartografia di riferimento e per la quale sono previsti rilievi topografici tradizionali e GPS da usare per la validazione dei risultati. Per tale area si pensa inoltre di integrare i risultati ottenuti dalle immagini WorldView, puramente planimetrici, con informazioni altimetriche ottenute dall'intersezione tra un modello digitale della superficie (ottenibile da cartografia o da immagini stereo) con un modello di geoidi relativo alla stessa zona.

I risultati ottenuti rappresentano sicuramente uno spunto importante per l'utilizzo di tale metodologia per un possibile *aggiornamento delle carte tecniche regionali* e in particolare per l'aggiornamento delle *linee di costa*. Infatti le tecniche di controllo finora utilizzate, rilievo classico e GPS ed indagini con fotogrammetria aerea, sono sicuramente valide per ciò che concerne la precisione che da esse si può ottenere, tuttavia possono non risultare particolarmente pratiche ed economiche per un monitoraggio continuo della zona costiera. In particolare il telerilevamento offre la possibilità di poter elaborare la stessa scena con una certa cadenza temporale consentendo di utilizzare questo tipo di prodotti per il monitoraggio continuo della linea di costa con tempi più rapidi e a costi più vantaggiosi rispetto ad altre tecniche di rilievo.

Riferimenti bibliografici

Antonioli F. e Silenzi S., 2007, "Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere", Quaderni della società geologica italiana, n.2, ottobre 2007.

Cervino R., Ivaldi R., Surace L., 2010, "Il ruolo dell'Istituto lidrografico della Marina nel monitoraggio costiero", Atti del Terzo Simposio *Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura*, Livorno, 15-16-17 giugno 2010.

Klein M., Lichter M., 2006, "Monitoring changes in shoreline position adjacent to the Hadera power station, Israel", *Applied Geography*, 26, pp. 210–226, Elsevier, 2006.

Tarig A., 2003, "New Methods for positional quality assessment and change analysis of shoreline features", Tesi di dottorato, School of the Ohio State University, 2003.

Ivaldi R., Surace L., 2010: "Rapid procedures for coastal environmental assessment: case histories in Liguria and Tyrrhnia littoral", Atti del Terzo Simposio *Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura*, Livorno 15-16-17 giugno 2010.

Kroon A., Davidson M.A., Aarninkhof S.G.J., Archetti R., Armaroli C., Gonzalez M., Medri S., Osorio A., Aagaard T., Holman R.A., Spanhoff R., 2007, "Application of remote sensing video systems to coastline management problems", *Coastal Engineering*, 54, pp. 493–505, Elsevier, 2007

Envi User Guide, 2010

<http://www.digitalglobe.com>