

Sviluppo e sperimentazione di un sistema per l'estrazione dell'informazione batimetrica da immagini telerilevate

Monica Deidda, Giannina Sanna

Università degli studi di Cagliari, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Strutturale Infrastrutturale e Geomatica (D.I.S.I.G.), Piazza d'Armi, 0706755429, 0706755405
mdeidda@unica.it, topoca@unica.it

Riassunto

Il monitoraggio degli ambienti marino-costieri necessita del controllo delle variazioni della linea di costa nonché dei fondali marini. Gli studi volti a definire la posizione della prima risultano ormai innumerevoli, per contro meno numerosi risultano quelli legati a valutazioni batimetriche. In considerazione di ciò, il presente studio utilizza il Telerilevamento quale tecnica possibile per il monitoraggio della dinamica costiera di un sito locale. Il modello per l'estrazione dell'informazione batimetrica scelto è quello di Jupp o delle DOP (*Depth Of Penetration*) Zones. Il metodo, applicato al sensore ad alta risoluzione Ikonos, impone un pretrattamento radiometrico allo scopo sia di correggere l'alterazione del segnale luminoso dovuta all'attraversamento dell'atmosfera che di ottenere valori radiometrici che siano rappresentativi della sola profondità, omogeneizzando la risposta dovuta alla presenza di tipi di fondale differenti (correzione della colonna d'acqua). Laddove infine era presente un fenomeno di "abbagliamento" dovuto all'incidenza del raggio luminoso sulla superficie (*sunglint*) esso è stato corretto con un'apposita procedura. Il modello è stato sviluppato in linguaggio IDL (*Interactive Data Language*) e inserito nel sistema di menù di ENVI. Il modello è stato sperimentato in un'area test nelle vicinanze di Cagliari.

Abstract

In order to monitor the coastal-sea environment it is necessary to check variations of the coastal line as well as the sea bottom. The studies aimed at defining the position of the former are countless but, on the other hand, the studies concerning the assessment of the bathymetry are very few. In relation to this, the present study uses the remote sensing as a possible technique for the monitoring of the sea dynamic of a local site. The model for the extraction of the bathymetry information is the Jupp Model, also called Depth of Penetration Zone (DOP Zone). The method, applied to Ikonos sensor high resolution imagery, requires a preliminary radiometric process in order to both correct the alteration of the light signal due to crossing into the atmosphere and achieve radiometric values that are representative of the depth only, as to homogenize the upwelling response from different bottom types (water column correction). Finally, where sunglint was present, as a result of the sun beams reflecting on the sea surface, it was corrected with a special procedure. The model was applied to a region near the city of Cagliari.

Introduzione

Il presente lavoro costituisce lo sviluppo di quanto già effettuato dal gruppo di ricerca nell'applicazione del modello di Jupp alle immagini Landsat per la determinazione della batimetria nell'area di mare del Poetto di Cagliari. L'area è da tempo studiata a causa dei fenomeni di erosione che in circa 60 anni hanno ridotto notevolmente la spiaggia al punto da rendere necessario un ripascimento effettuato nel 2002. I risultati raggiunti, per quanto relativi ad immagini a media risoluzione (Landsat TM5), sono stati incoraggianti al punto di condurci a valutare la possibilità di

utilizzare immagini ad alta risoluzione spaziale e radiometrica (Ikonos e ADS40), in grado di fornire un modello digitale del fondo marino a scala maggiore.

L'applicazione del modello di estrazione delle batimetrie a questi due sensori è stata suddivisa in tre fasi che riguardano:

1. il pre-trattamento delle immagini multispettrali e l'implementazione in ambiente IDL delle procedure atte a realizzarlo;
2. la progettazione e realizzazione di un sistema speditivo per la misura delle batimetrie nelle aree di calibrazione dei modelli;
3. la calibrazione e validazione di tutto il sistema

Allo stato attuale è stata completata la prima fase e nel seguito vengono descritte le operazioni di pre-trattamento delle immagini previste per il sensore ikonos e la loro applicazione alle immagini dell'area del Poetto di Cagliari.

Pre-trattamento delle immagini

Alle immagini sono state applicate le seguenti correzioni

- La correzione per abbagliamento (sun glint);
- La correzione atmosferica;
- La correzione per la colonna d'acqua;
- Classificazione dei fondali.

Gli algoritmi che reggono le correzioni per abbagliamento e per la colonna d'acqua sono stati implementati in ambiente IDL. I due moduli sono stati inseriti nel menù del software ENVI alla voce *Topography*.

Il problema del sunglint

La cartografia delle caratteristiche dei fondali può essere seriamente impedita dall'abbagliamento sulla superficie dell'acqua. Sfortunatamente tale problema è particolarmente sentito nelle condizioni che per la tecnica del telerilevamento risultano ottimali: cieli limpidi, acque poco profonde ed immagini ad alta risoluzione.

Tipicamente il "Sun Glint" (abbagliamento) forma bande bianche lungo la cresta delle onde, dalla parte in cui soffia il vento e in prossimità della costa. Queste bande bianche impediscono l'identificazione visiva delle caratteristiche del fondale compromettendone la classificazione.

Benché in aree con *sun glint* il segnale registrato appare quasi interamente composto dal segnale riflesso dalla superficie dell'acqua, la componente dovuta alla radianza ascendente può essere recuperata fornendo al sensore quella residua spettralmente non satura.

Il modulo di correzione del sunglint in ENVI

In una pubblicazione di Hedley (Hedley et al, 2005) viene presentato un metodo con il quale il sun glint è rimosso dalle bande spettrali delle lunghezze d'onda del visibile usando quella dell'infrarosso vicino.

Sfruttando le potenzialità del linguaggio IDL è stato scritto un modulo per la correzione del fenomeno del sun glint.

Le operazioni necessarie al processamento dell'immagine che l'operatore deve eseguire, sono state implementate seguendo le fasi del metodo sviluppato da *Hochberg et al.* nel 2003 (Hochberg et al, 2003) e modificato come detto da Hedley et al nel 2005.

Il metodo del "*deglint*" (togliere l'abbagliamento) può essere spiegato con le seguenti due affermazioni:

1. Il segnale nell'NIR (near infrared, infrarosso vicino) è composto solo dal sun glint e da un segnale ambiente spazialmente costante. In particolare nell'infrarosso non c'è contributo bentico variante spazialmente.
2. La quantità di sun glint nelle bande del visibile è in rapporto lineare al segnale nella banda dell'NIR.

La prima affermazione è giustificata dal fatto che l'acqua è relativamente opaca alle lunghezze d'onda dell'NIR (Mobley, 1994) così che le acque poco profonde possiedono sempre una bassa radianza ascendente nell'NIR indifferentemente dal tipo di fondo.

Benché il minimo del segnale nell'NIR su acque profonde dovrebbe essere zero, nella pratica questo minimo (MIN_{NIR}) è generalmente più grande di zero. In particolare se l'immagine non è atmosfericamente corretta questo segnale residuo o "ambiente" corrisponde alla diffusione in atmosfera dell'NIR.

Questo metodo assume un livello di segnale ambiente costante (MIN_{NIR}), che durante le analisi è rimosso da tutti i pixel dell'immagine. L'assunto secondo il quale la relazione tra il segnale nell'NIR e la quantità di sun glint nelle bande del visibile sia lineare, è valido poiché l'indice reale di rifrazione è approssimativamente quasi uguale per l'NIR e per le lunghezze d'onda del visibile. Il metodo procede quindi definendo la relazione lineare tra il segnale NIR e la quantità di sun glint in ogni banda del visibile. Questa informazione, combinata con il segnale dell'infrarosso in ogni pixel dell'immagine, è usata per ottenere la misura di quanto ridurre il segnale per rimuovere il sun glint in ogni pixel.

La relazione lineare tra la banda NIR ed ogni banda del visibile viene stabilita usando una regressione lineare. Per fare questo, allo scopo di ottenere l'intervallo di variazione del sun glint (da basso ad alto abbagliamento), si selezionano sull'immagine una o più regioni laddove il segnale sia consistente. Il modulo calcola quindi la regressione lineare della nuvola di punti costruita ponendo in ordinate i valori del segnale nelle bande del visibile e in ascisse quelli dell'infrarosso vicino.

Se la pendenza della linea di regressione per la banda i è b_i , allora da tutti i pixel dell'immagine nella banda i può essere eliminato l'abbagliamento attraverso l'applicazione dell'equazione seguente:

$$R_i' = R_i - b_i \cdot (R_{NIR} - MIN_{NIR}) \quad [1]$$

Ciò significa semplicemente: ridurre il segnale nel pixel in banda i (R_i) mediante il prodotto della pendenza della regressione (b_i) per la differenza tra il valore dei pixel nell'NIR (R_{NIR}) e il livello di segnale ambiente (MIN_{NIR}).

Il minimo nell'NIR rappresenta essenzialmente il segnale dell'NIR in un pixel senza sun glint e può essere valutato attraverso il minimo della banda NIR trovato nel campione della regressione o alternativamente come il minimo della banda NIR trovato nell'intera immagine.

Il modulo è stato testato su un'immagine del sensore ad alta risoluzione Ikonos dell'area costiera cagliaritana del Poetto. In Figura 1 le immagini a confronto: sulla sinistra l'immagine originale, a destra l'immagine risultato del procesamiento.



Figura 1 – La correzione del sun glint: confronto tra l'immagine originale (a sinistra) e quella processata (a destra).

La correzione della colonna d'acqua

Nel suo percorso ideale la luce, partendo dalla sorgente sole, raggiunge un fondale attraversando due strati: quello atmosferico e quello costituito dalla colonna d'acqua. Entrambi condizionano i valori di radianza al sensore, e se l'obiettivo è quello di renderli rappresentativi delle superfici sulle

quali la luce incide (e quindi indipendenti dalla profondità) risulta essenziale sottoporre le immagini a un pretrattamento volto alla correzione dei fenomeni indotti dall'attraversamento dei due strati. Mentre sono ormai molteplici i moduli per la correzione atmosferica (FLAASH in ENVI o ATCOR in PCI sono solo un esempio), non esistono invece pacchetti per la correzione della colonna d'acqua. In assenza di questi, le operazioni di classificazione in mare risultano fortemente condizionate da valori di radianza poco rappresentativi delle caratteristiche dei fondali su cui l'energia luminosa incide.

Il modulo Water column correction (metodo di Lyzenga) in ENVI

Concettualmente il metodo si basa sul fatto che la radianza riflessa dal fondo è una funzione lineare della riflettanza del fondale e una funzione esponenziale della profondità dell'acqua.

Per realizzare una relazione lineare tra la radianza e la profondità, i valori di radianza (corretti atmosfericamente) devono essere trasformati usando il logaritmo naturale. Poiché i valori nei substrati omogenei sono costanti, quando si mettono in un diagramma due bande, i valori dei pixel per ogni banda si disporranno su una linea retta. Le variazioni dei valori rispetto alla retta saranno dovuti ai soli cambiamenti di profondità. La pendenza della linea rappresenta il rapporto dei coefficienti di attenuazione tra le due bande.

Il coefficiente di attenuazione K è un importante fattore di correzione per la colonna d'acqua. Esso considera infatti l'effetto che l'assorbimento e lo scattering, all'interno della colonna d'acqua, hanno sulla radianza registrata dal sensore.

La relazione tra K , varianza e profondità è descritta dalla seguente equazione:

$$L_i = L_{si} + a \cdot r \cdot e^{(-2K_i z)} \quad [2]$$

dove a è una costante, r la riflettanza del fondo e z la profondità.

Non è però possibile seguire tale approccio poiché nell'equazione ci sono troppe quantità incognite e precisamente: il valore della costante a , il coefficiente di attenuazione per ogni banda e la profondità dell'acqua per ogni pixel.

Il metodo studiato da Lyzenga non richiede il calcolo reale di questi parametri ma aggira l'ostacolo usando informazioni provenienti da più bande.

Il modulo implementato in ENVI ricalca l'approccio suggerito da Lyzenga (Lyzenga, 1978–1981) per la generazione di un indice invariante rispetto alla profondità.

L'immagine utilizzata nella sperimentazione (la medesima del caso sun glint) è stata atmosfericamente corretta, quindi sottoposta a una procedura che si sviluppa in tre fasi:

1. linearizzazione della relazione tra profondità e radianza;
2. calcolo del coefficiente di attenuazione tra coppie di bande;
3. generazione dell'indice (del tipo di fondale) invariante rispetto alla profondità.

Lanciato il modulo, all'operatore viene richiesto di selezionare sull'immagine multispettrale¹, i cui canali siano stati preventivamente uniti, due campioni di uno stesso substrato a differenti profondità. Poiché gli effetti della profondità sulla radianza sono stati linearizzati applicando l'operatore logaritmo ed il substrato è costante, i valori dei pixel per ogni banda varieranno linearmente con la profondità disponendosi quindi secondo una retta. La pendenza di questa rappresenta la quantità relativa dell'attenuazione in ogni banda, ossia il rapporto dei coefficienti di attenuazione tra le bande rappresenta l'asse dei valori di radianza per una determinata tipologia di fondale.

Considerando un fondale di tipologia diversa dal primo si ottiene una linea simile alla precedente ma poiché il secondo tipo di fondale non avrà la stessa riflettanza del primo, la nuova linea sarà disposta o sopra o sotto la precedente. Il gradiente di ogni linea dovrebbe essere identico, poiché il rapporto dei coefficienti di attenuazione k_i/k_j dipende solo dalla lunghezza d'onda delle bande e dalla limpidezza dell'acqua.

¹ Il pacchetto è stato costruito considerando i soli canali del visibile Rosso, Verde e Blu. Non è stato considerato il canale dell'Infrarosso vicino vista la scarsa capacità di questo alla penetrazione in acqua.

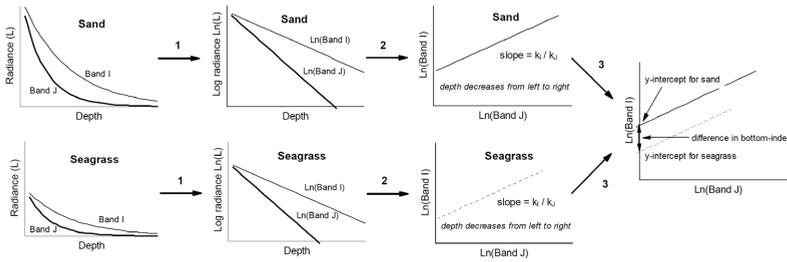


Figura 2 – Costruzione dell'indice invariante rispetto alla profondità²

L'indice del tipo di fondale può essere ottenuto estrapolando l'intercetta di ogni retta; l'asse y diventa quindi un asse della tipologia di fondale (Figura 2).

Ovviamente non tutti i valori dei pixel per un dato fondale si dispongono perfettamente su una linea retta; ciò a causa delle naturali variazioni nella riflettanza del fondale, chiazze di torbidità dell'acqua e rumore del sensore. Tuttavia, il rapporto k_i/k_j tra i coefficienti di attenuazione può essere assegnato ai pixel dell'immagine connettendo ciascuno di essi all'asse y mediante una linea immaginaria di gradiente k_i/k_j .

L'approccio analitico seguito per l'implementazione del modulo in IDL è basato sull'equazione parametrica della retta $y = mx + q$

dove m è il gradiente della regressione di y su x e q l'intercetta.

Esplicitando rispetto all'intercetta:

$$q = y - m \cdot x$$

ossia

$$depth\text{-}invariant\ index_{ij} = \ln(L_i) - \left[\left(\frac{K_i}{K_j} \right) \cdot \ln(L_j) \right] \quad [3]$$

dove

L_i e L_j rappresentano la radianza dei pixel rispettivamente in banda i e j

K_i e K_j i coefficienti di attenuazione per le bande i e j.

Il modulo calcola per ogni coppia di bande spettrali un'immagine indice invariante rispetto alla profondità e fornisce in output un'immagine combinazione delle tre profondità invarianti (combinazione a due delle tre bande di Ikonos). Le bande invarianti rispetto alla profondità possono essere utilizzate per analisi visive in luogo delle bande originali. Il risultato ottenuto è mostrato nella Figura 3. A sinistra l'immagine originale, a destra quella ottenuta a seguito della correzione.



Figura 3 – Water column correction: confronto tra l'immagine originale (a sinistra) e quella processata (a destra).

² Edmond P. G et al, (2000), Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management, UNESCO Publishing, Paris

La classificazione

Le sperimentazioni fin qui condotte nell'applicazione del modello di Jupp per l'estrazione dell'informazione batimetrica da immagini satellitari hanno suggerito la necessità di "isolare" i differenti tipi di fondale. Il tentativo è infatti quello di rendere la risposta al sensore rappresentativa della sola profondità. Allo scopo quindi di verificare l'efficacia delle correzioni ottenute con i moduli implementati, l'immagine Ikonos utilizzata per la sperimentazione è stata sottoposta ad operazioni di classificazione. In questa fase si è voluta valutare la "naturale" propensione dei valori di radianza dei pixel corretti nel disporsi in classi verosimilmente rappresentative di quelle reali. A tale scopo è stato scelto come classificatore l'*unsupervised K-means*. In Figura 4 è possibile osservare il risultato ottenuto. A sinistra la classificazione eseguita sull'immagine originale; a destra il risultato ottenuto sull'immagine preventivamente sottoposta alle due correzioni *sun glint* e *water column correction*. In entrambi i casi si è posto $K=3$. Mentre sull'immagine originale il classificatore non riesce a discriminare alcuna classe, sull'immagine pre-processata individua le tre richieste isolando in particolar modo quella rappresentativa della sabbia (nell'immagine in blu).

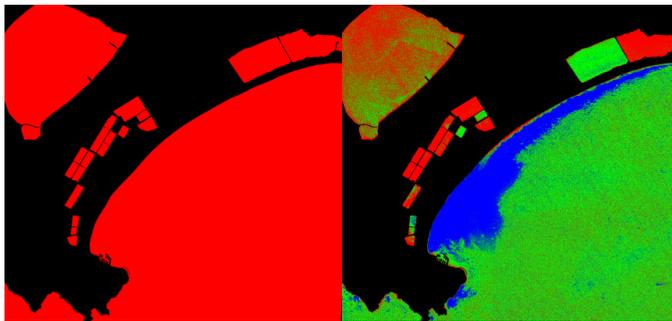


Figura 4 – Risultato della classificazione sull'immagine originale e processata.

Conclusioni

Sebbene la mancanza di dati sulla verità a terra non ha consentito in questa fase valutazioni in merito all'accuratezza della classificazione (è proposito degli autori proseguire la ricerca anche in tal senso), il risultato conseguito fa ben sperare rispetto alla possibilità di ottenere risultati migliori di quelli già conseguiti applicando il modello di Jupp ad immagini non classificate. Inoltre, la corretta definizione della classe sabbia consentirebbe nel contempo l'individuazione dell'attacco del fronte della posidonia. L'analisi multi temporale di tale fronte sarebbe di particolare ausilio negli studi dell'erosione costiera. I moduli implementati realizzano quindi un strumento che, unitamente a quello precedentemente inserito in ENVI per il calcolo della batimetria, permette il trattamento del dato in acqua consentendo considerazioni della dinamica costiera su serie storiche.

La presente ricerca è cofinanziata della Regione Autonoma della Sardegna con fondi a valere sul PO Sardegna FSE 2007-2013 sulla L.R.7/2007 "Promozione della ricerca scientifica e dell'innovazione tecnologica in Sardegna"

Bibliografia

- FLAASH Module Users Guide: Using ENVI FLAASH (2009)
 Hedley, et al (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow water benthos, International Journal of Remote Sensing, 10,2107-2112
 Deidda M, Sanna G. (2006). Determinazione dell'informazione batimetrica da immagini satellitari per il monitoraggio delle variazioni costiere. Convegno SIFET "Le nuove frontiere della rappresentazione 3D", Castellaneta Marina - TARANTO
 UNESCO-Bilko (2005), <http://www.noc.soton.ac.uk/bilko/>
 Mobley, C. D. (2004), Light and water, Academic Press
 Mishra D et al.(2004), Bathymetric Mapping Using IKONOS Multispectral Data, GIScience and Remote Sensing, 41, N.4, 301 - 321

Hochberg et al (2003), Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 1724-1729

Edmond P. G et al, (2000), Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management, UNESCO Publishing, Paris

Jupp, D.L.B.(1988), Background and extensions to Depth of Penetration Zone (DOP) Mapping in Shallow Coastal Waters, Proceedings, Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone, Queensland, IV, 2.1-2.9

Lyzenga, D.R. (1981), Remote Sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data, International Journal of Remote Sensing, 2, 71-82

Lyzenga, D.R. (1978), Passive Remote Sensing techniques for mapping water depth and bottom features, Applied Optics, 17,tics,T