

Osservazione delle zone marine costiere da dati ottici multi-sensore: il caso studio della foce del Volturno

Saba Daneshgar ^(a), Erica Matta ^(b), Claudia Giardino ^(b), Mariano Bresciani ^(b), Giovanna Sona ^(a)

^(a) Politecnico di Milano Polo territoriale di Como, Via Natta 12/14, 22100 Como, Italia.

^(b) Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR-IREA, via Bassini 15, 20133 Milano, Italia, tel. 0223699296, fax 0223699300, e-mail: matta.e@irea.cnr.it.

Riassunto

Questo lavoro s'inserisce nell'ambito del progetto bandiera RITMARE (Ricerca Italiana per il MARE, 2012-2016, MIUR-CNR) che ha lo scopo di studiare, monitorare, gestire e valorizzare la risorsa marina in Italia. A tale fine il telerilevamento è parte integrante al progetto che, in questo studio, viene applicato alla fascia costiera della foce del Volturno. Lo studio si avvale dell'utilizzo di immagini satellitari (RapidEye (2013) e Landsat-8 OLI (2014)) e aviotrasportate (MIVIS (2011)). A supporto dell'analisi delle immagini sono state acquisite misure *in-situ* di riflettanza e di concentrazione dei seguenti parametri: clorofilla-a (Chl-a), sedimenti totali sospesi (TSM) e sostanza organica colorata disciolta (CDOM) durante una campagna svoltasi in agosto 2014. I dati telerilevati, geocodificati e co-registrati, sono stati pre-elaborati per correggere gli effetti radiometrici ed atmosferici. Le immagini sono state successivamente elaborate per classificare le acque marino-costiere secondo diversi gradi di complessità ottica e per produrre mappe di concentrazione di Chl-a, TSM e CDOM. In particolare, per la generazione delle mappe è stato applicato un approccio semi-empirico basato su analisi di correlazione dei dati *in-situ*; in particolare tra valori spettrali di riflettanza (es. rapporti di banda) e le corrispondenti misure di concentrazione di Chl-a, TSM e CDOM. I risultati mostrano un gradiente crescente di complessità ottica delle acque spostandosi dalle zone pelagiche verso le aree costiere. In queste aree l'analisi del dato OLI ha mostrato una variabilità spaziale di Chl-a, TSM e CDOM imputabile ai regimi idrologici del fiume Volturno.

Abstract

This work is framed within the flag project RITMARE (Italian Research for the SEA, from 2012 to 2016, MIUR-CNR) which aim is to study, monitor, manage and give importance to the marine resource in Italy. Remote sensing is an integral part of the project and in this study it is applied to the coastal area of the Volturno river mouth. The study makes use of three images acquired by satellite and airborne sensors. In particular, the following scenes were processed: RapidEye (2013), Landsat-8 OLI (2014) and MIVIS (2011). In-situ measures of water reflectance and water components' concentration: chlorophyll-a (Chl-a), total suspended sediment (TSM) and colored dissolved organic matter (CDOM), were collected during a field campaign held in August 2014. Remote sensing data were geocoded, co-registered and pre-processed in order to correct radiometric and atmospheric effects. The images were then processed to classify coastal marine waters according to different degrees of optical complexity and to produce maps of Chl-a, TSM and CDOM concentration. In particular, a semi-empirical approach based on correlation analysis between in-situ reflectance data (eg. band ratios) and the relative measures of Chl-a, TSM and CDOM concentrations, was applied for the retrieval of water component concentrations' maps. The results show an increasing gradient of optical complexity moving from the pelagic zone to the

coastal areas. In these areas the analysis of OLI data show a spatial variability of Chl-a, TSM and CDOM probably due to the hydrological regimes of the Volturno River.

Introduzione

Le tecniche di telerilevamento sono strumenti utili per lo studio delle caratteristiche del mare e per l'osservazione dei fenomeni che interessano le acque marino-costiere. La visione sinottica e il tempo di rivisitazione di sensori satellitari e aviotrasportati sono proprietà utili per monitorare l'evoluzione e le dinamiche temporali e spaziali dei processi marini, di solito molto variabili nel tempo e nello spazio. L'elaborazione di immagini remote (acquisite da satellite o da sensori aerei) permette di osservare e studiare il colore dell'acqua, il quale può variare in funzione della presenza di materiale in sospensione e/o disciolto. Caratteristiche specifiche dei sensori come ad esempio la loro risoluzione spaziale, li rende adatti a differenti scopi: dall'osservazione di dettaglio (es. variazioni della linea di costa nel tempo) allo studio di fenomeni a scala minore (es. l'estensione e la variazione dei plumes fluviali). Il lavoro qui presentato è stato sviluppato nell'ambito del progetto bandiera "RITMARE" (Ricerca ITALiana per il MARE), un progetto quinquennale finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) e organizzato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Tale progetto si propone di applicare ciò che emerge dal Libro blu (Commissione Europea, COM2007/575 del 10 ottobre 2007), nel quale si sottolinea la rilevanza delle acque marine e costiere come importanti rotte commerciali, essenziali regolatori climatici, preziosa fonte di pesce, energia e materiali, oltre alla loro reputazione di luoghi residenziali e di ricreazione. Al fine di garantirne la disponibilità e la qualità negli anni futuri sono quindi necessari una conoscenza approfondita dei fenomeni che regolano questi ambienti e un'attenta programmazione di utilizzo di tale risorsa. Per perseguire tale obiettivo diverse aree d'azione sono state sviluppate all'interno del Progetto, tra le quali la "Pianificazione dello spazio marittimo costiero". In quest'ambito il telerilevamento può fornire un valido contributo nell'osservazione delle dinamiche d'interazione tra acque dolci interne e acque marine profonde, interazioni che hanno luogo lungo la fascia costiera. Una delle aree test del Progetto è stata individuata nella zona costiera che comprende la foce del fiume Volturno ed è oggetto del lavoro qui presentato. Grazie all'effettuazione di una campagna di misure e all'analisi di tre immagini acquisite da diversi sensori (sia satellitari che aviotrasportati) nell'intervallo temporale compreso tra il 2011 e il 2014, le acque sono state classificate in base alle loro proprietà di riflessione secondo un gradiente che varia da acque otticamente complesse (più strettamente legate agli interscambi terra-mare) ad acque otticamente più semplici (acque pelagiche). Altro scopo del lavoro è stato quello di rappresentare la variabilità spaziale dei principali componenti otticamente attivi delle acque, quali clorofilla-a (Chl-a), sedimenti totali sospesi (TSM) e sostanza organica colorata disciolta (CDOM), all'interno delle acque classificate come complesse.

Area di studio

L'area di studio (Figura 1) si estende lungo la costa tirrenica, dalla città di Mondragone (a Nord) al Lago di Patria (a sud), e contiene al suo interno la foce del fiume Volturno. Il fiume Volturno, con una lunghezza di 175 km e un bacino di 5550 km² è il fiume principale dell'Italia centro-meridionale. È il sesto fiume più grande d'Italia, e l'undicesimo più lungo, con una portata media di circa 80 m³/s. Il fiume Volturno sfocia nel Mar Tirreno a Castel Volturno, formando una foce larga circa 500 metri, circondata da una vasta area pianeggiante altamente popolata. La popolazione e le attività antropiche che insistono lungo il suo cammino contribuiscono ad immettere nelle acque del fiume diverse fonti di contaminazione microbiologica e chimica, quali scarti della produzione agricola e scarichi industriali (Isidori et al., 2004). Inoltre, il lungo percorso del fiume e il volume d'acqua trasportato mobilitano una notevole quantità di sedimenti che rendono le acque tipicamente torbide, scaricando quindi in mare significativi carichi di sedimenti sospesi e sostanze disciolte. Nell'area sono presenti anche alcune riserve naturali per la conservazione delle zone umide e della pineta mediterranea, quali la Zona a Protezione Speciale "Variconi" e la Riserva Naturale Regionale

“Foce Volturno – Costa di Licola”. Le zone umide costituiscono habitat importanti per le rotte migratorie di diverse specie di uccelli, alcuni dei quali a rischio di estinzione ed inclusi nelle liste delle specie protette dalla Comunità Europea. Geomorfologicamente la costa risulta formata da spiagge sabbiose, costituite da depositi alluvionali risalenti al Quaternario, che degradano dolcemente. Alternati alle spiagge si trovano tratti di costa occupati da strutture antropiche atte a proteggere la popolazione che abita e lavora al limitare della costa e che è in continua espansione (De Pippo et al., 2008). Nonostante la presenza di strutture di contenimento l’area costiera in esame è naturalmente soggetta a fenomeni di erosione, esondazione, franamento, sismicità e vulcanismo, oltre alle modificazioni imputate ad azioni antropiche.

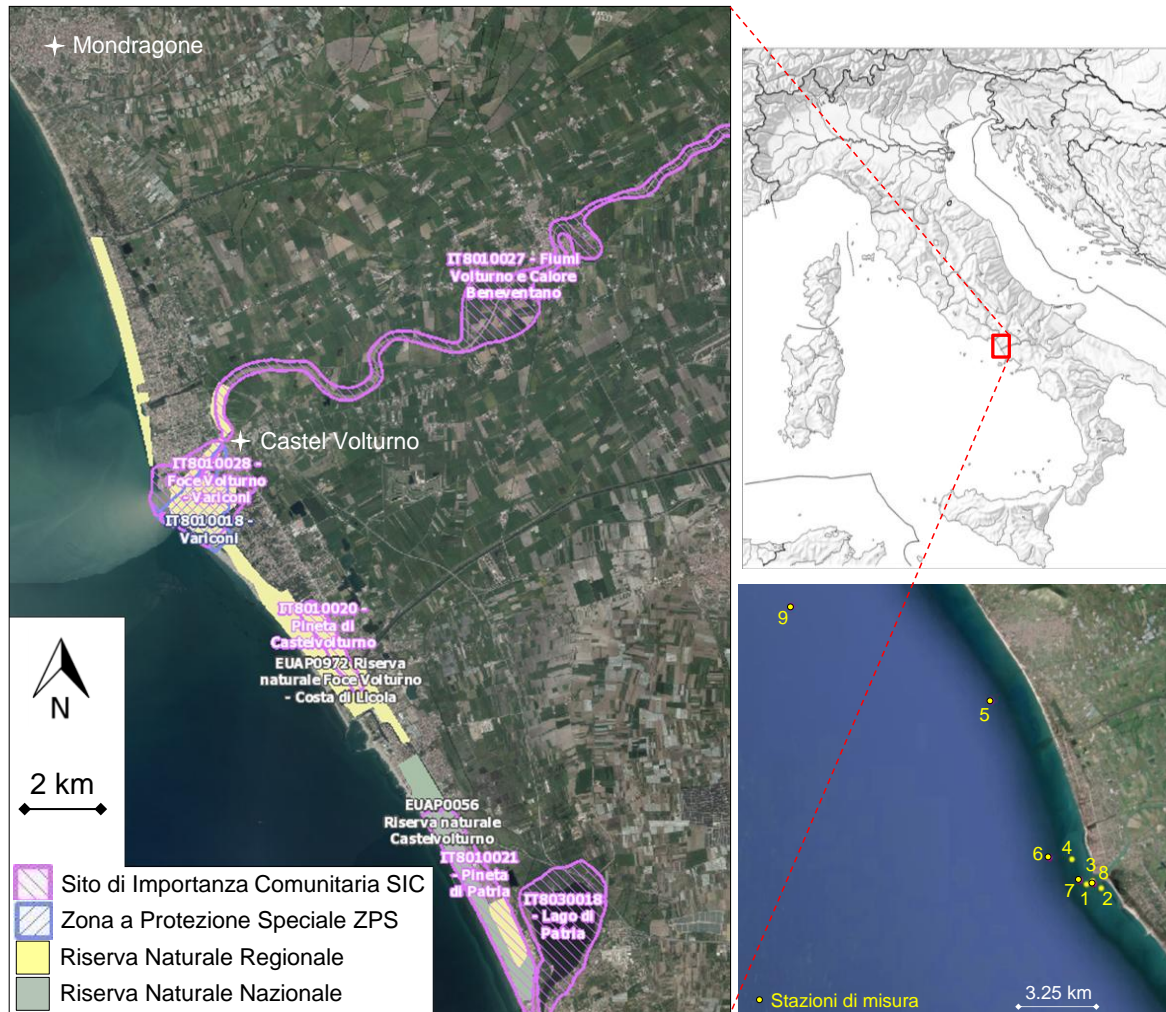


Figura 1 – Rappresentazione dell’area di studio (geo portale Ministero dell’Ambiente). In basso a destra localizzazione delle stazioni di misura investigate durante la campagna

Materiali e metodi

Durante la prima settimana di Agosto 2014 è stata condotta una campagna di misure nelle acque antistanti la foce del Volturno. Sono state effettuate misure radiometriche (riflettanza uscente dalla colonna d’acqua [Rrs]), in associazione a misure di trasparenza delle acque e di concentrazione delle principali componenti otticamente attive (Chl-a, TSM e CDOM) in nove stazioni, distribuite a diversa distanza dalla foce, in modo da caratterizzare il cambiamento delle proprietà ottiche delle acque dalla costa al mare più profondo (Figura 1). Per le misure radiometriche è stato utilizzato lo spettroradiometro di campo *Spectral Evolution SR-3500*, per le misure di trasparenza il disco di

Secchi, mentre per derivare le concentrazioni delle componenti acquatiche sono stati prelevati e filtrati campioni d'acqua successivamente analizzati in laboratorio (Giardino et al., 2014).

Un'immagine acquisita da un sensore aereo (MIVIS, 2011) e due immagini satellitari (RapidEye, 2013 e OLI, 2014) sono state elaborate in questo lavoro. Le principali caratteristiche spaziali e spettrali dei diversi sensori sono mostrate in Figura 2.

Sensore	Data di acquisizione	Grandezza del pixel (m)	Numero di bande nell'intervallo spettrale 400-900nm
MIVIS	26/07/2011	3	20
RapidEye	11/08/2013	5	5
OLI	09/09/2014	30	5

Figura 2 – Caratteristiche spaziali e spettrali dei sensori considerati

Tutte le immagini hanno subito lo stesso processo di pre-elaborazione: conversione del segnale acquisito dal sensore in unità fisiche tramite l'applicazione di coefficienti sensore-specifici (calibrazione radiometrica) e proiezione delle immagini nello stesso sistema di riferimento (WGS84) e di coordinate cartografiche (UTM, Zona 33 Nord) (geocodifica), quando non già eseguito dalle compagnie di distribuzione delle immagini. Per poter confrontare correttamente le immagini acquisite in tempi diversi, è stata effettuata una procedura di co-registrazione. Tale procedura è stata compiuta tramite un confronto immagine-immagine (*tool* di ENVI 'Image-to-Image') che ha permesso di migliorare la loro sovrapposizione e corrispondenza *pixel-to-pixel*. Per rimuovere gli effetti atmosferici, è stata applicata una correzione atmosferica delle immagini utilizzando il codice di trasferimento radiativo 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*, Vermote et al., 2006). Come parametri di input sono stati scelti un profilo atmosferico "Midlatitude Summer", un modello di aerosol "Maritime" e valori di spessore ottico (AOD) derivati da dati MODIS (prodotti MOD08). La correzione atmosferica è stata validata confrontando firme di riflettanza misurate sia su superfici acquatiche (acque profonde) che su superfici terrestri (superfici invariante es. strade, edifici).

Su tutte le immagini, opportunamente filtrate per eliminare il rumore residuo (Wettle et al., 2004), è stata applicata una classificazione guidata ('Minimum Distance' di ENVI), utilizzando come *training set* alcune firme radiometriche di campo rappresentative del crescente livello di complessità ottica delle acque. Come risultato sono state ottenute mappe di complessità delle acque, che sono state suddivise in cinque classi.

L'immagine OLI, più vicina all'esecuzione della campagna di misure e caratterizzata da un minore errore residuo dell'immagine (verificato secondo la metodologia proposta da Wettle et al., 2004) è stata scelta per caratterizzare con maggior dettaglio le acque definite complesse dal processo di classificazione. Tre algoritmi semi-empirici, basati su diversi valori spettrali, sono stati applicati all'immagine per mappare la concentrazione delle componenti otticamente attive (Chl-a, TSM e CDOM) nelle acque complesse. Per la stima della Chl-a è stato selezionato il rapporto tra le bande verde e blu (R_{rsG} e R_{rsB}), valore tipicamente utilizzato in ambiente marino (O'Reilly et al., 2000) e basato sul picco di riflessione del fitoplancton nella regione spettrale del verde. Per stimare la concentrazione di CDOM è stato invece scelto il rapporto tra le bande infrarosso vicino (R_{rsNIR}) e blu (R_{rsB}). Il CDOM, infatti, è caratterizzato da un forte assorbimento nella regione del blu, mentre non ha alcun effetto nella regione dell'infrarosso vicino (Kutser et al., 2005). Infine, per la stima della concentrazione di TSM si sono considerate tutte le bande dello spettro VIS-NIR ($meanRrs$), dal momento che la riflessione della luce nella regione del visibile e vicino infrarosso aumenta proporzionalmente alla quantità di materiale in sospensione (Ruddick et al 2012). I pixel misti o influenzati dalla presenza della riflessione del fondale sono stati opportunamente mascherati tramite applicazione di specifici *buffer* alla linea di costa.

Risultati

La Figura 3 mostra gli spettri di riflettanza misurati nelle nove stazioni di misura (Figura 1). Le stazioni 5 e 9 si distinguono dalle altre per una riflessione relativa maggiore della luce nella regione spettrale del blu/verde (400-550nm) e per un assorbimento predominante a maggiori lunghezze d'onda (oltre i 600nm). Tali firme risultano rappresentative di acque poco complesse otticamente, dal momento che hanno un comportamento spettrale tipico delle acque povere di materiale sospeso e/o disciolto.

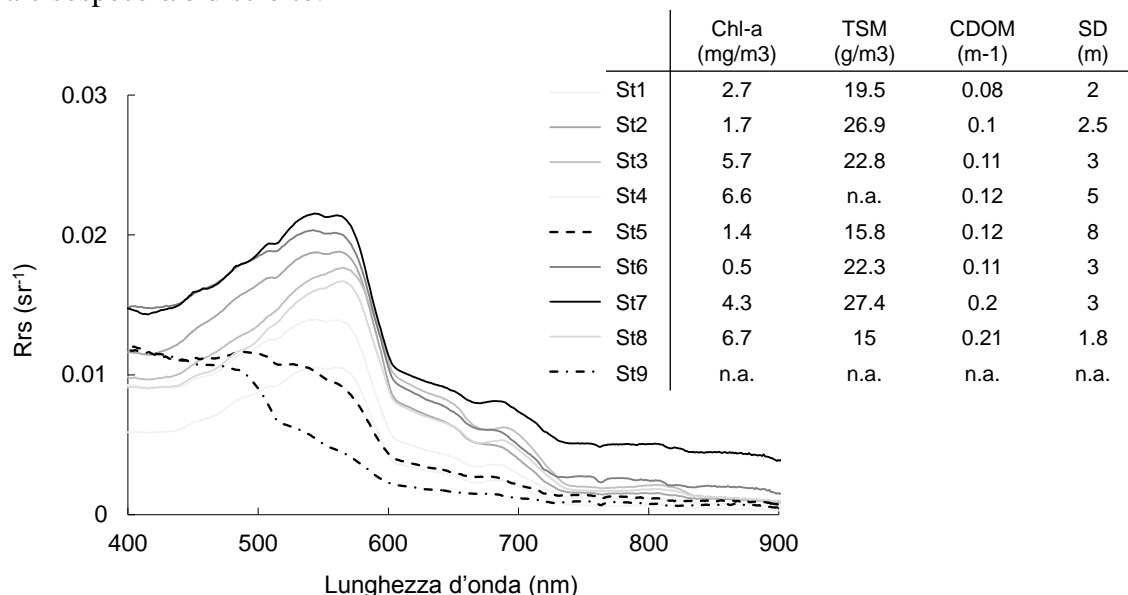


Figura 3 – Spettri di riflettanza misurati *in-situ* nelle nove stazioni indagate con relative concentrazioni delle componenti otticamente attive e valore di trasparenza (SD)

Tutte le altre stazioni, invece, mostrano un andamento spettrale diverso, con un assorbimento tra i 400-450nm, un successivo picco relativo attorno ai 550nm, un assorbimento meno marcato rispetto alle altre due stazioni oltre i 600nm e un altro picco relativo prossimo ai 700nm. Tali comportamenti spettrali sono legati alla presenza di particelle in sospensione, quali organismi fitoplanctonici, sostanze inorganiche (es. materiale terrigeno trasportato dall'acqua fluviale) e da sostanze disciolte (es. sostanza organica colorata). La concentrazione di TSM nelle stazioni indagate non è mai inferiore a 15g/m³, segno che il contributo dei solidi trasportati dalle acque fluviali è significativo anche ad una decina di km a nord della foce del fiume Volturno (St5). Chl-a e CDOM risultano, invece, più variabili, con valori medi di 3.7 mg/m³ e 0.13 m⁻¹ rispettivamente.

In Figura 4a sono confrontate le firme di riflettanza misurate *in-situ* e quelle derivate dall'immagine OLI opportunamente corretta per gli effetti atmosferici. L'andamento delle curve di riflettanza corrisponde, mentre la leggera differenza in magnitudo potrebbe essere spiegata dalla non sincronicità delle due acquisizioni *in-situ* e satellitare (34 giorni). La figura 4b, invece, è relativa ad una comune superficie invariante individuata su tutte tre le immagini, costituita da un edificio altamente riflettente. Anche in questo caso si può osservare una buona concordanza tra i valori spettrali acquisiti dai diversi sensori; in particolare, le riflettanze OLI e RapidEye sono comprese all'interno della deviazione standard delle misure MIVIS.

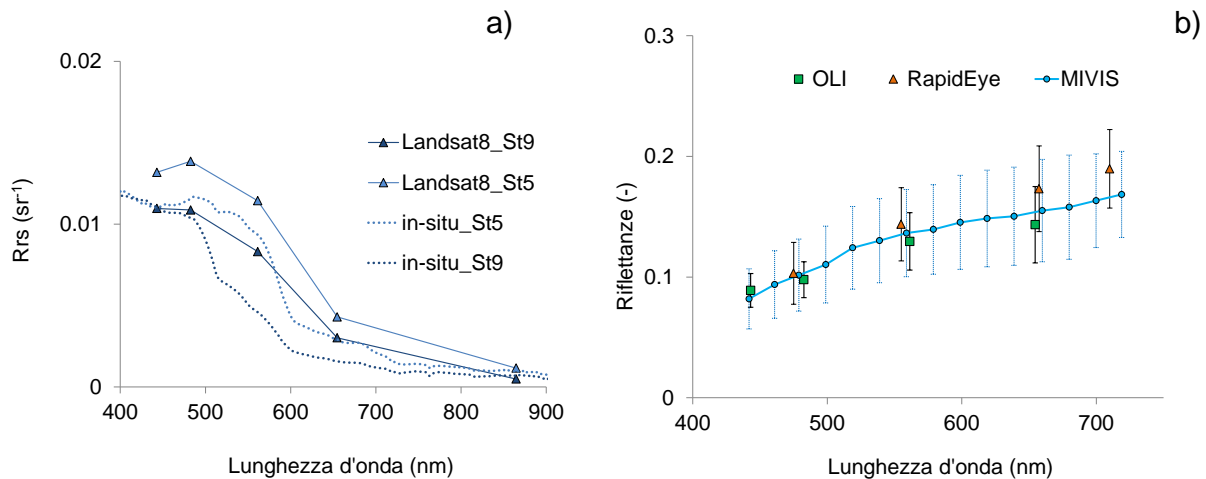


Figura 4 – a) Confronto tra firme di riflettanza misurate in-situ e da satellite (OLI) in stazioni di acqua profonda, b) confronto tra le firme di riflettanza acquisite dai tre sensori in corrispondenza della stessa superficie invariante

Il confronto tra le mappe di complessità delle acque (Figura 5) prodotte tramite classificazione, mostra una progressione simile tra le acque più interessate dalla presenza di materiale sospeso e disciolto, situate in prossimità della costa, e le acque pelagiche meno cariche di sostanze. Dalle immagini OLI e RapidEye si è potuto osservare come le acque più complesse si distribuiscano prevalentemente nella parte settentrionale rispetto alla foce del fiume Volturno, probabilmente sospinte dalle correnti marine prevalenti in questa sezione di costa tirrenica, principalmente dirette verso nord (Vetrano et al., 2004) e in corrispondenza delle altre foci fluviali presenti. La variabilità temporale evidenziata dal confronto delle tre acquisizioni è imputabile alla variazione nel tempo di parametri meteo-climatici ed idrologici (es. precipitazioni, portata dei fiumi, correnti marine) o variabili legate alle attività umane (es. scarichi agricoli o industriali).

I tre algoritmi semi-empirici per la stima delle concentrazioni di Chl-a, TSM e CDOM che hanno mostrato la correlazione maggiore con le misure di campo sono espressi in Figura 6, con i relativi valori di R^2 e RMSE e la relativa mappa generata dall'applicazione dell'algoritmo.

Le mappe in Figura 6 mostrano la variabilità spaziale della concentrazione delle tre componenti otticamente attive delle acque, in particolar modo per Chl-a e TSM. Il CDOM è molto poco variabile e sembra aumentare in prossimità del canale Agnena, come anche in prossimità della foce del fiume Volturno e nella fascia costiera a nord, in corrispondenza del torrente Savone e del fiume Garigliano (non in figura). Sia per i TSM che per il CDOM si osservano valori maggiori di concentrazione nella zona confinata dalla struttura frangiflutti, che ostacola il rimescolamento delle acque. I valori di TSM aumentano visibilmente in prossimità di tutti gli sbocchi di fiumi/canali/torrenti che si immettono nel Mar Tirreno e presentano un gradiente decrescente dalla costa verso il mare aperto. Nell'area circoscritta alle acque definite complesse i valori di TSM sono comunque significativi (non minori di 15g/m^3), sintomo di un notevole apporto di materiale sospeso trasportato in mare da scarichi fluviali e lisciviazione dei terreni, oltre a fenomeni di risospensione generati dalle acque marine. Anche la concentrazione di Chl-a è variabile spazialmente, con valori massimi molto vicino alla costa.

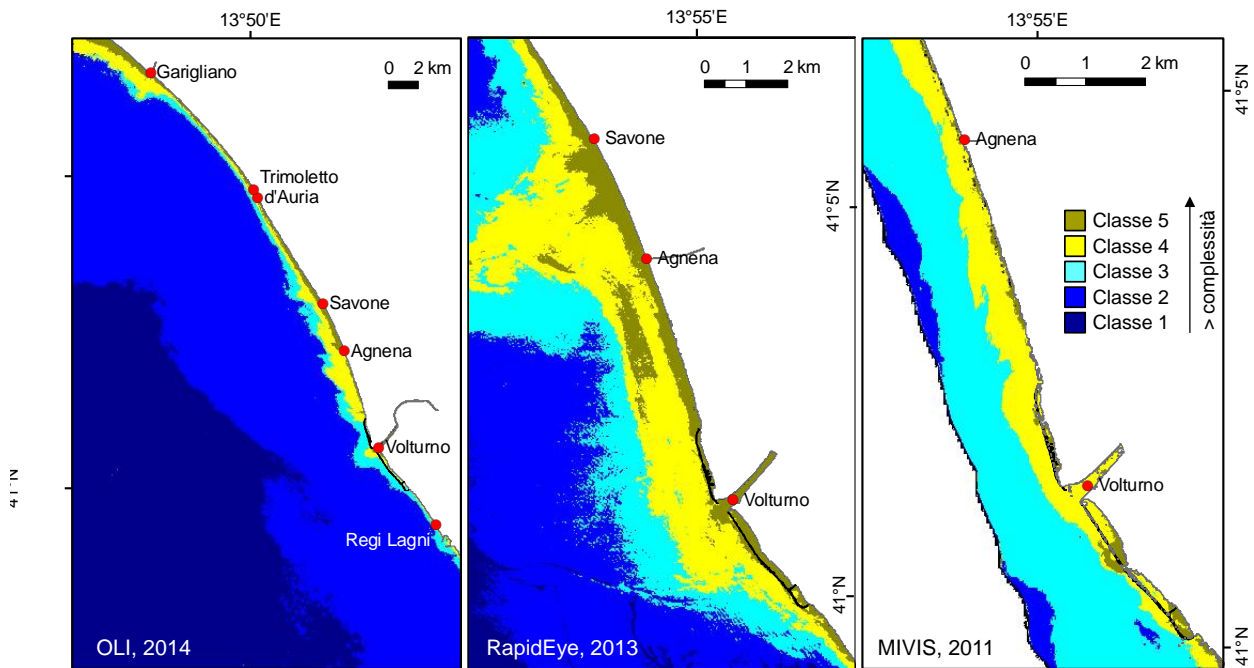


Figura 5 – Mappe di complessità delle acque per le acquisizioni satellitari (2014 e 2013) e aerea (2011). In nero una struttura frangiflutti emergente dall'acqua

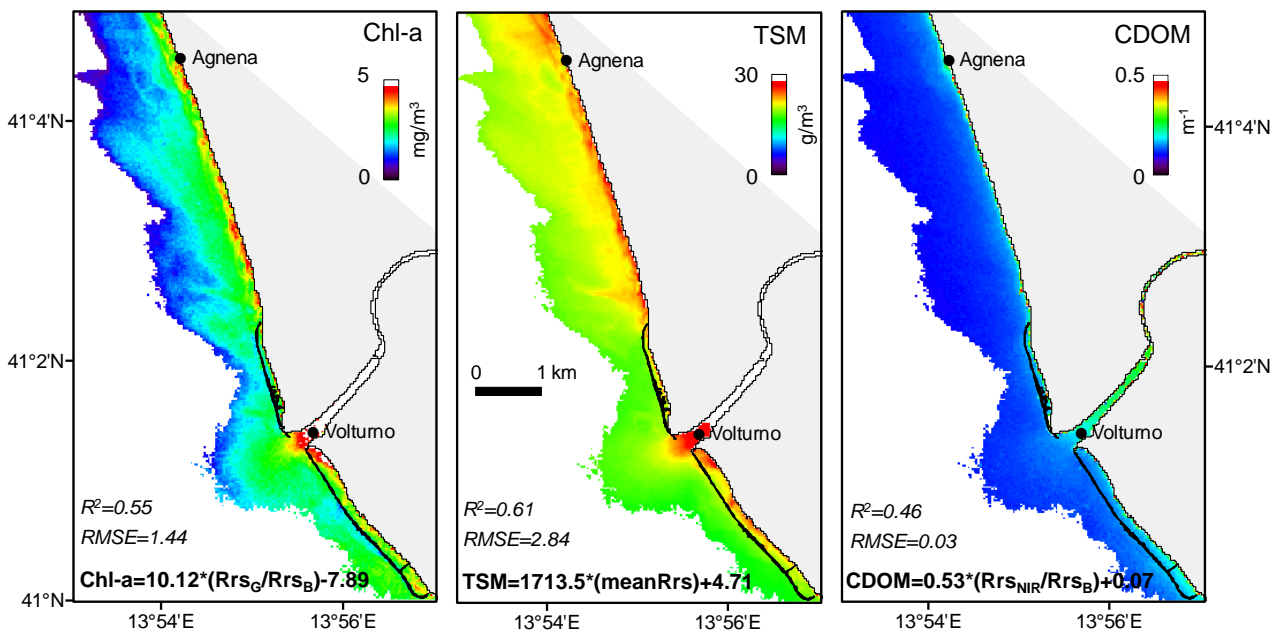


Figura 6 – Mappe di concentrazione di Chl-a, TSM e CDOM derivate da OLI. Ad ogni mappa è associato l'algoritmo di stima delle concentrazioni e i relativi valori di R^2 e RMSE. In nero una struttura frangiflutti emergente dall'acqua

Conclusioni

I risultati ottenuti dalla validazione della correzione atmosferica delle immagini dimostrano che la metodologia utilizzata è idonea. L'applicazione della stessa metodologia di analisi a diverse immagini remote acquisite in momenti differenti ha permesso di evidenziare una significativa variabilità temporale e spaziale delle acque complesse in corrispondenza della foce del fiume Volturno. Inoltre, grazie alle caratteristiche radiometriche del sensore OLI, è stato possibile estrarre informazioni relative alla concentrazione delle componenti otticamente attive che caratterizzano le acque complesse, evidenziando una maggiore presenza relativa di TSM rispetto a CDOM e Chl-a. Le attività proseguiranno con l'analisi delle variabili meteo-climatiche per una più approfondita comprensione della dinamica temporale di distribuzione delle acque complesse.

Ringraziamenti

L'attività di ricerca è stata finanziata dal progetto RITMARE (MIUR-CNR). Un ringraziamento speciale a Mauro Musanti del CNR-IREA di Milano per la preziosa attività di campo. Si desidera ringraziare la Compagnia Generale delle Riprese Aeree di Parma per l'acquisizione dell'Immagine MIVIS ed in particolare Giuseppe Pizzaferrì e Armando Cavazzini. L'immagine Rapid-Eye è stata acquisita tramite il progetto ESA AO-553 MELINOS.

Bibliografia

- De Pippo T., Donadio C., Pennetta M., Petrosino C., Terlizzi F., Valente A. (2008), "Coastal Hazard Assessment and Mapping in Northern Campania, Italy ", *Geomorphology*, 97: 451-466.
- Giardino C., Bresciani M., Cazzaniga I., Schnek K., Rieger P., Braga F., Matta E., Brando V.E., (2014). "Evaluation of Multi-Resolution satellite sensors for assessing water quality and bottom depth of Lake Garda", *Sensors*, 14(14): 24116-24131.
- Isidori M., Lavoragna M., Nardelli A., Parrella A. (2004), "Integrated Environmental Assessment of Volturno River in South Italy ", *Science of the Total Environment*, 327: 123-134.
- Kutser T., Pierson D.C., Kallio K., Reinart A., Sobek S. (2005) "Mapping lake CDOM by satellite remote sensing", *Remote Sensing of Environment*, 94: 535-540.
- O'Reilly J. et al. (2000), *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses*, Part 3, NASA Technical Memorandum 2000-206892, Volume 11.
- Ruddick K., Vanhellemont Q., Yan J., Neukermans G., Wei G., Shang S. (2012), "Variability of Suspended Particulate Matter in the Bohai Sea from the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)", *Ocean Science Journal*, 47 (3): 331-345.
- Vermote E., Tanré D., Deuzé J., Herman M., Morcrette J. (2006), *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)*, User Guide Version 3.
- Vetrano A., Napolitano E., Iacono R., Schroeder K., Gasparini G. (2010), "Tyrrhenian Sea Circulation and Water Mass Fluxes in Spring 2004: Observations and Model Results ", *Journal Of Geophysical Research*, 115, Issue C6.
- Wettle M., Brando V.E., Dekker A.G. (2004), "A Methodology for Retrieval of Environmental Noise Equivalent Spectra Applied to Four Hyperion Scenes of the Same Tropical Coral Reef ", *Remote Sensing of Environment*, 93: 188-197.