Il sistema satellitare polare Landsat 8 oli per il monitoraggio del mar piccolo di Taranto

Borfecchia F. (*), De Cecco L. (*), Petrocelli A. (***), Cecere E. (***),
Portacci G. (***), Caroppo C. (***), Cibic T. (****), Micheli C. (**), Pignatelli V. (**)

(*) ENEA SSPT-PROTER-OAC (Observation and Analysis of Earth and Climate)
Remote Sensing & GIS Group, tel. +39 6 3048 6042, fax: +39 6 3048 6042,
e-mail: flavio.borfecchia@enea.it; via Anguillarese, 301 Rome-Italy
(**) ENEA DTE-BBC-BBE Renewables Energies, Biomass and Bio-Energies Laboratory
C.R. Casaccia – via Anguillarese, 301 Rome-Italy
(***) Istituto per l'Ambiente Marino Costiero (IAMC) – CNR, via Roma 3, 74123 Taranto, Italy
(****) OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale), Sezione di Ricerca Oceanografia (OCE),
Via Piccard 54, 34151 Trieste Italy, Tel. +39 040 2249740, Fax +39 040 2249770

Abstract
The multispectral data provided by the older TM5 and ETM Landsat polar sensors, despite their suitable ground resolution weren't widely applied for mapping the submerged vegetation and phytoplankton in the coastal and internal optically complexes shallow waters (typically case II waters), due mainly to their low SNR (Signal to noise Ratio) and consequent poor radiometric resolution (8 bit/pixel) which often didn't allow to obtain the required sensitivity. In the summer 2013 the new Landsat 8 NASA polar satellite carrying on board the OLI (Operational Land Imager) sensor was launched. This sensor respect to the previous ones of the Landsat family has improved acquisition bands in the visible, NIR, SWIR, TIR ranges and radiometry that offer a more reliable opportunity for operative monitoring of coastal shallow waters and ecosystems previously unavailable. In addition to the optical (RGB, NIR, SWIR, TIR) OLI spectral bands repositioning to improve their SNR, the new "coastal" deep blue channel was introduced to provide a more effective and systematic ocean color retrieving capability at higher spatial resolution in coastal and inland waters, typically recognized as case II waters. Therefore in order to preliminarily test the capabilities of the new OLI sensor for coastal monitoring, some multispectral images recorded in 2013 and 2014 on the lagoon of the Mar Piccolo of Taranto (Southern Italy) were exploited. This water body is characterized by significant pressures and impacts due to human activities such as aquaculture and the related fishing activities as well as the presence of industrial, military and major urban settlements with related load of nutrients and pollution. The frequent presence of algal blooms with significant production of biomass in the site is greatly interesting for the field-testing of integrated techniques of "bioremediation" and innovative biofuels production. The abilities and strategies of algae to recycle nutrients offer an attractive opportunity for the subsequent application of their biomass in the production of fuels in the context of bio-energy production through ecologically friendly and cost-effective solutions and value-added and innovative products.
The images were processed to remove atmospheric noise using the "image based" estimate of AOD (Aerosol Optical Depth) and "adjacency effects", and used for the extraction of a first set of punctual values of reflectance to be associated with a number of sea truth measurements of various biophysical parameters compatible with the satellite overpasses. Various statistical regressive models were then implemented and tested satisfactorily for the estimation of relative distributions to various types of phytoplankton present at various depths. Subsequently the OLI preprocessed data were exploited for assessing the distributions of some algal species (*Caulerpa prolifera, Hypnea Cornuta*) that have recently spread here because of climate change and environmental degradation.

Additional preliminary tests conducted to take into account the effect of the water column using the bio-optical modeling approach made available by the open source software WASI4, provided interesting preliminaries results currently undergoing further refinements.

Introduzione

I sistemi satellitari di telerilevamento multispettrale passivo operativi a risoluzione spaziale intermedia (SeaWiFS, MODIS, MERIS, ..), utilizzati principalmente per il rilevamento del colore dell'oceano a livello globale, forniscono dati per la mappatura sistematica di parametri biofisici fondamentali come SST (Sea Surface Temperature) e concentrazione di CHL (clorofilla) e sedimenti, sulla base di algoritmi ben consolidati (Dierssen , 2009). Nonostante la loro comprovata utilità per il monitoraggio operativo marino delle zone di mare aperto, a causa di esigenze di scala spaziale più stringenti nella zona d'interfaccia "land-sea" e della maggiore complessità ottica delle acque costiere, questo tipo di dati telerilevati con risoluzione spaziale da 250 m. al Km., purtroppo risulta meno utilizzabile per la stima delle distribuzioni delle concentrazioni dei vari costituenti otticamente attivi dei bassi fondali ed il monitoraggio degli ecosistemi vegetali costieri in termini di discriminazione, estensione ed altri parametri biofisici specifici. In questo contesto i metodi maggiormente diffusi sono basati su rilievi aerospaziali maggiormente efficaci in termini di risoluzione spaziale più adatti a fornire un supporto per un monitoraggio operativo solitamente in sinergia con le misurazioni di verità mare utilizzate per la calibrazione. Tali rilievi multispettrali sono effettuati tramite varie tecniche di osservazione (EO) della Terra attualmente disponibili utilizzanti sensori HR (5-50 m.) e VHR (<m-5 m.) (alta ed altissima risoluzione spaziale) sia satellitari (Pasqualini et al. 2005, Borfecchia et al. 2013 a) che aerei (Borfecchia et al 2013 b) con risoluzioni da alcune decine di m sino a quella submetrica (QuickBird, WorldView 2, Dedalus ATM,…). Tali sistemi però operano su richiesta ed in modo non sistematico, con aree riprese dell'ordine di 10X10 Km, più adatte ad un monitoraggio locale limitato. In tale contesto, nell'estate 2013 è stato messo in orbita dalla NASA il nuovo satellite polare Landsat 8 che trasporta a bordo il sensore OLI (Operational Terra Imager), di nuova generazione che, come i precedenti della famiglia Landsat, acquisisce sistematicamente con periodo di circa 20 gg. immagini multispettrali di porzioni di circa 180X180 km della superficie terreste. Questo sensore rispetto a quelli precedenti della stessa famiglia oltre all'aumento nelle bande di acquisizione nel visibile e TIR, presenta miglioramenti nella loro radiometria che offrono una maggiore capacità per il monitoraggio operativo degli ecosistemi costieri in precedenza non disponibile. Oltre alle usuali bande spettrali (RGB, NIR, SWIR, TIR) opportunamente riconfigurate per migliorare il loro SNR (Tabella 1), è stato introdotto un nuovo canale di acquisizione "coastal", per migliorare le sue capacità di cattura dei segnali relativi al "ocean color" nell'intervallo di frequenze più alte a ridosso del blu (deep blue), alla risoluzione spaziale di 30 m. maggiormente proficua specialmente nelle acque costiere e interne, spesso otticamente complesse (case II waters).

In Italia, nonostante molte zone e bassi fondali costieri presentino indizi di degrado dovuti alle crescenti pressioni antropiche ed agli effetti dei cambiamenti climatici, su di essi spesso a causa della carenza di risorse non si opera con metodi di monitoraggio a scale spazio-temporali efficaci conseguentemente la vegetazione acquatica e molti habitat costieri sono poco mappati (Micheli et al., 2010), spesso le mappe già esistenti hanno una risoluzione spaziale insoddisfacente e/o le informazioni sono poco aggiornate. In questo contesto quindi l'utilizzo delle tecniche di telerilevamento aerospaziale più recenti in modo integrato con quelle di rilevo in sito consolidate rappresenta una soluzione maggiormente vantaggiosa ed efficace in grado di dare un contributo determinante a supporto della gestione sostenibile degli ambienti costieri dei bassi fondali sui quali risulta d'interesse testare preliminarmente le potenzialità e le migliorate funzionalità di questi sistemi satellitari di ultima generazione anche per supportare la valutazione efficace delle potenzialità d'impiego delle biomasse acquatiche ai fini energetici.

Materiali e metodi

Area d'interesse, dati EO e "sea truth"

L'obiettivo principale del presente lavoro è stato quello di valutare preliminarmente le nuove funzionalità del sensore Landsat 8 OLI per il monitoraggio estensivo dei bassi fondali in particolare della laguna del Mar Piccolo di Taranto (fig 1) dove diversi fattori di impatto derivanti principalmente dalla concentrazione delle attività di origine antropica possono dar luogo a concentrazione di inquinanti, sostanze nutrienti e sedimenti provenienti dalle aree circostanti, con riduzione della trasparenza dell'acqua e sviluppo algale notevole e di specie potenzialmente dannose (Caroppo et al. 2015) per le attività di turismo ed acquacoltura. Il bacino del Mar Piccolo è un'importante area lagunare chiusa di circa 21 Km^2 che confina con il versante nord della zona urbanizzata del comune di Taranto, in Puglia ed è collegata al mar Ionio tramite un'altra laguna più

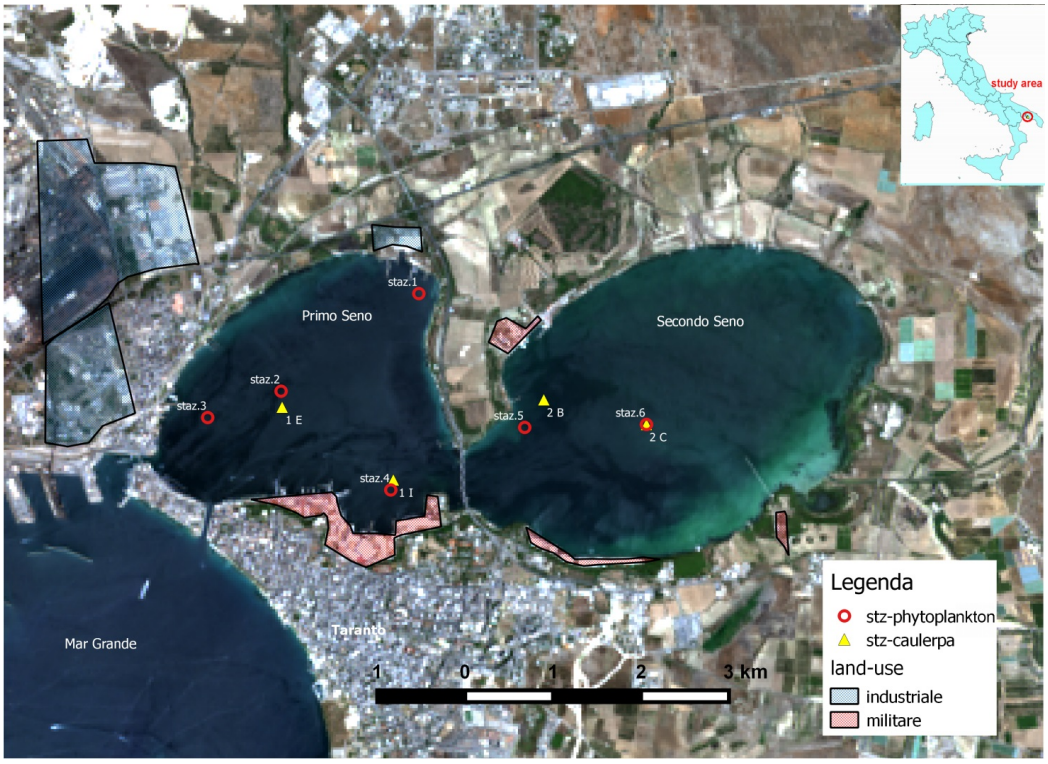

Figura 1 - Immagine "true color" dell'area del Mar Piccolo di Taranto ripresa dal sensore OLI del Landsat 8 il 20-06-2013. In sovrapposizione sono riportate le stazioni di misura del fitoplancton(cerchi rossi) e della copertura della macro-alga Caulerpa (triangoli gialli).

grande (Mar Grande di Taranto). Essa è divisa in due lobi dal primo dei quali (Primo Seno) si dipartono due canali di collegamento al Mar Grande di cui uno navigabile che fornisce il maggior contributo di volume d'acqua del ridotto scambio di questo corpo idrico che presenta variazioni di

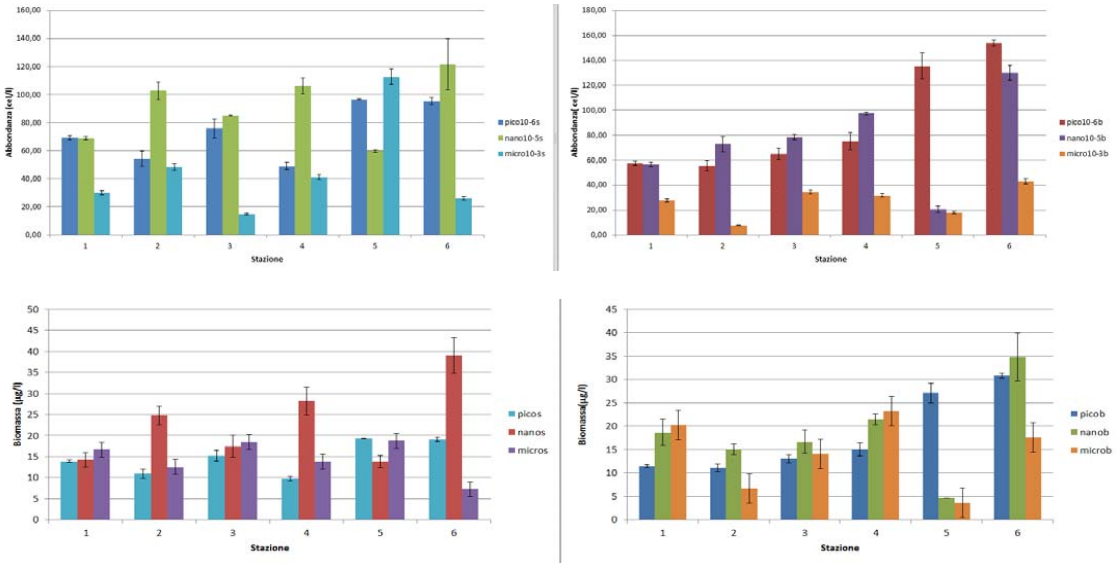

Figura 2 - Rilievi in sito effettuati in corrispondenza delle 6 stazioni riportate in figura 1, relativi ad abbondanza (cellule/l) in superficie (alto-sinistra) ed a 50 cm di profondità (alto-destra). In basso sono riportati i valori di biomassa in µg/l. I moltiplicatori di scala per le 3 classi dimensionali di plancton (pico, nano, micro) sono rispettivamente: 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-3}.

MERIS			Landsat 7 ETM+				Landsat 8 OLI				
Band	λ_{cent} (nm.)	FWHM	Band	λ_{cent} (nm.)	FWHM	SNR	Band	λ_{cent} (nm.)	FWHM	SNR	
1	412,69	9,94									
2	442,56	9,95					1	443	20	130	Coastal / Aerosol
3	489,88	9,96	1	485	70	40	2	482,5	65	130	Blue
4	509,82	9,96									
5	559,69	9,97	2	560	80	41	3	562,5	75	100	Green
6	619,6	9,98									
7	664,57	9,99	3	660	60	28	4	655	50	90	Red
8	680,82	7,49									
9	708,33	9,99									
10	753,37	7,5									
12	778,41	15,01									
13	864,88	20,05	4	835	130	35	5	865	40	90	NIR
							6	1375	30		Cirrus
			5	1650	200	36	7	1610	100	100	SWIR1
			7	2220	260	29	8	2220	200	100	SWIR2
			6	11450	2100		9	10895	59		TIR1
							10	12005	101		TIR2

Tabella 1 - Caratteristiche delle bande spettrali di acquisizione dei vari sensori utilizzati per applicazioni di monitoraggio costiero e marino tramite telerilevamento satellitare.

livello dovute alla marea dell'ordine di 30-40 cm. Le batimetrie arrivano a profondità massime di 13 è 8 m. rispettivamente per il Primo e Secondo Seno, che presentano altresì degli apporti di acqua dolce dovuti sia a sorgenti anche sottomarine (Citri) sia a piccoli torrenti che drenano le aree agricole e non, del bacino. Su quest'ultimo si concentrano un notevole numero di attività antropiche che aggiungono altri fattori d'impatto dovuti alla vicinanza di insediamenti residenziali, industriali e militari a quelli che insistono direttamente sul corpo idrico come l'acquacoltura dei mitili, lacantieristica e la pesca. Nonostante negli ultimi anni siano stati messi a punto metodi maggiormente efficaci a supporto della gestione sostenibile di questo bacino, esso continua a presentare delle fragilità che richiedono un monitoraggio continuo ed efficace a supporto della salvaguardia della funzionalità dei suoi importanti servizi ecosistemiciIn questo contesto, le metodologie sviluppate sono state finalizzate inizialmente alla mappatura sull'intero bacino di alcune specie algali aliene, in particolare di *Caulerpa prolifera* (Cibic et al., 2015), una macroalga verde, e *Hypnea Cornuta,* macroalga rossa e specie aliena (Petrocelli et al, 2015), che si sono recentemente qui diffuse e necessitano di un monitoraggio estensivo di controllo.
Successivamente si è passati alla valutazione delle distribuzioni delle concentrazioni di varie tipologie di fitoplancton nella colonna d'acqua sulla base delle risposte spettrali rilevate dal sensore OLI e calibrate con dati di verità a mare acquisiti nel 2013 da parte del IAMC. Quest'ultimi sono stati rilevati nell'estate 2013 su 6 stazioni distribuite rispettivamente 4 nel primo seno e 2 nel secondo, come riportato in figura 1. Essi hanno riguardato misure di abbondanza e biomassa per le tre classi dimensionali tipiche (pico, nano, micro) con l'aggiunta della concentrazione di chl-a e pigmenti, il tutto ripetuto in superficie ed a profondità di 50 cm. Contemporaneamente alle misure di fitoplancton sono state acquisite le coperture percentuali della *Caulerpa p*., rinvenuta in 3 delle 4 stazioni distribuite sui due seni. La stima della distribuzione dell'*Hypnea C.* è stata effettuata sulla base di dati satellitari e misure in sito acquisiti nel 2014.

Elaborazione e modelling

Per testare preliminarmente le capacità del Landsat 8 OLI per la mappatura delle specie algali aliene sui bassi fondali e della distribuzione di fitoplancton nella colonna d'acqua del Mar Piccolo, sono state acquisite 2 frames acquisite dal Landsat 8 OLI rispettivamente nel giugno 2013 e nell'agosto 2014, compatibili con i rilievi in sito rispettivamente relativi al fitoplancton ed all'Hypnea precedentemente descritti. E' stata quindi applicata una correzione atmosferica standard al fine di rimuovere gli effetti atmosferici dai rilievi TOA (Top Of Atmosphere) al sensore che in generale sono equivalenti al segnale utile

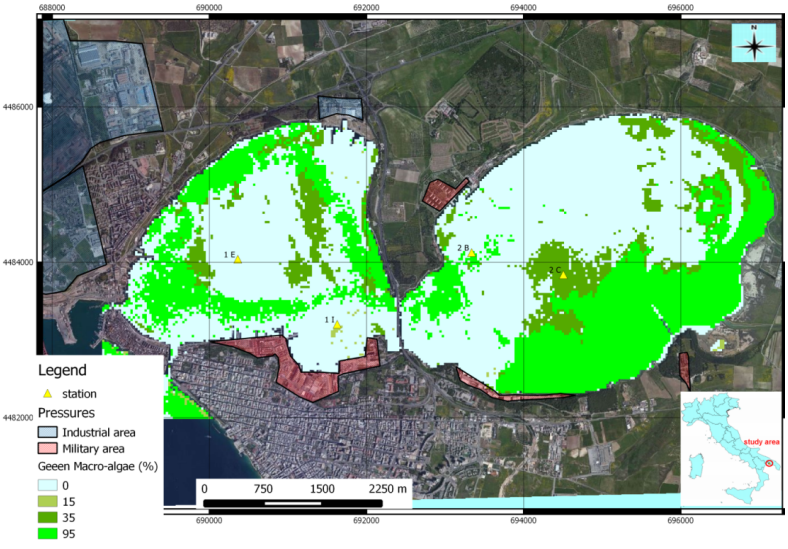

Figura 3 - Distribuzione della Caulerpa nel Mar Piccolo di Taranto ottenuta da rilievi satellitari Landsat 8 OLI del giugno 2013.

proveniente dalla superficie dell'acqua sotto forma di radianza (Water Leaving Radiance). Quest'ultimo comprende sia il contributo dei componenti otticamente attivi nella colonna d'acqua includenti principalmente oltre al fitoplancton anche sedimenti (TSM) e CDOM (Coloured Dissolved Organic Matter) che quello relativo alla copertura del basso fondale che può provenire da seagrass, macroalghe e substrati bentici vari. La correzione radiometrica delle frames acquisite per gli effetti atmosferici è stata effettuata attraverso un approccio "image based" utilizzando il codice ATCOR integrato all'interno del package commerciale Erdas-Imagine. L'approccio "image based" sfrutta le informazioni specifiche contenute nella stessa immagine multispettrale da correggere e non richiede ulteriori misure in situ sul campo simultanee al passaggio satellitare, inoltre, essendo di agevole applicazione risulta adatto per il nostro uso operativo. Questo ci ha permesso di tener conto degli effetti perturbativi atmosferici sulla base del valore medio di AOD (Aerosol Optical Depth) derivato dalla stessa immagine, tenendo conto anche dell'effetto di adiacenza che potrebbe essere molto importante per il monitoraggio efficace dei bassi fondali costieri all'interfaccia terra-mare a causa della possibile contaminazione dai valori di riflessione superiore da parte delle zone contigue di terra.

Le immagini multispettrali del 2013 cosi pre-elaborate sono state quindi utilizzate per stimare la distribuzione della Caulerpa sulla base dei rispettivi rilievi indicati in figura 1. Considerando che nelle 4 stazioni erano state rilevate 4 differenti livelli di copertura percentuale (0, 15, 35, 95) della macroalga, è stato impiegato un algoritmo di classificazione supervised addestrato con i dati spettrali relativi alle 4 locazioni per ottenere la mappa di distribuzione in 4 classi riportata in figura 3, che risulta in buon accordo con i rilievi in sito e le serie storiche relative agli anni precedenti. Per quanto attiene *l'Hypnea C.*, con metodologia analoga è stata ottenuta una mappa di distribuzione con una sola classe (presenza/assenza) relativa alla tematica d'interesse in accordo con i relativi dati puntuali di calibrazione in sito del 2014 che rilevavano esclusivamente la presenza della specie algale (senza alcuna misura di densità/copertura) solo nel secondo seno.

Sul rapporto delle risposte spettrali nei canali del blu e verde, rispettivamente intorno ai 440 e 550 nanometri, sono basati i tipi più comuni di algoritmi semi-empirici più comunemente utilizzati (OC3, OC4,…) per la stima della distribuzione della clorofilla Chl-a dai rilievi satellitari del colore dell'oceano a scala globale (SeaWifs, MODIS, MERIS, …), tenendo conto che la maggior parte dell'assorbimento della radianza solare del fitoplancton avviene all'interno di questa porzione dello spettro visibile. Tuttavia, l'uso esclusivo di queste lunghezze

	Coefficiente	*Errore Std.*	*rapporto t*	*p-value*
const	2.60E+03	8.39E+05	309.691	0.02055
b_{12}	-2.70E+03	8.84E+05	-305.293	0.02085
b_{13}	2.24E+03	7.35E+05	304.172	0.02092
b_{34}	2.70E+05	4.30E+05	62.750	0.10061
b_{23}	-2.13E+03	7.09E+05	-300.003	0.02121
Media var. dipendente	2290833		SQM var. dipendente	9767363
Somma quadr. residui	2.24E-01		E.S. della regressione	0.47317
R^2	0.999531		R^2_{adj}	0.997653
F(4, 1)	5.323.859		P-value(F)	0.032492

Tabella 2 - Parametri ottenuti per il modello regressivo di distribuzione superficiale della biomassa del nano-plancton.

d'onda visibili risulta essere meno affidabile nelle acque costiere otticamente complesse, dove il rapporto delle riflettanze nelle bande blu-verde spesso risulta meno sensibile ai cambiamenti di concentrazione della Chl-a a causa della presenza rilevante di CDOM e TSM che possono richiedere l'uso integrato di altre bande spettrali situate nel rosso (620-700 nm) e NIR (> 700 nm) (Blondeau-Patissier et al., 2014) per una stima maggiormente efficace. Tenendo conto di questi aspetti e considerando comunque la maggior ampiezza (FWHM) delle bande spettrali Landsat 8 rispetto ai sensori su citati che le rendono meno sensibili, oltre al rapporto blu-verde (b23) delle risposte spettrali derivate dalle immagini pre-processate, sono stati considerati quelli includenti sia la nuova banda "coastal" per valutarne lo specifico contributo, che quelle nel rosso e NIR. In particolare sono stati utilizzati i vari rilievi relativi al fitoplancton effettuati nel 2013 per testare la capacità predittiva dei vari canali del sensore OLI sotto forma dei seguenti 5 rapporti di bande con riferimento alla tabella 1: $b_{12}=b_1/b_2$, $b_{13}=b_1/b_3$, $b_{23}=b_2/b_3$, $b_{34}=b_3/b_4$, $b_{45}=b_4/b_5$, dove i primi 2 utilizzano il nuovo canale "coastal", il terzo è relativo alla su citata relazione blu-verde, i due finali utilizzano i canali rosso e NIR, da sfruttare per maggiormente in acque costiere. Con i valori di queste grandezze in forma di 5 variabili indipendenti opportunamente estratte dalle immagini multispettrali pre-elaborate, sono stati implementati vari modelli regressivi multivariati utilizzando i dati puntuali rilevati in sito di cui alcuni esempi e caratteristiche più significativi sono di seguito riportati. La tabella 2 riporta i vari parametri stimati per il modello regressivo multivariato della distribuzione superficiale di biomassa del nano-plancton in funzione delle variabili spettrali suddette derivate dai rilievi satellitari utilizzando i dati in sito delle 6 stazioni di misura.

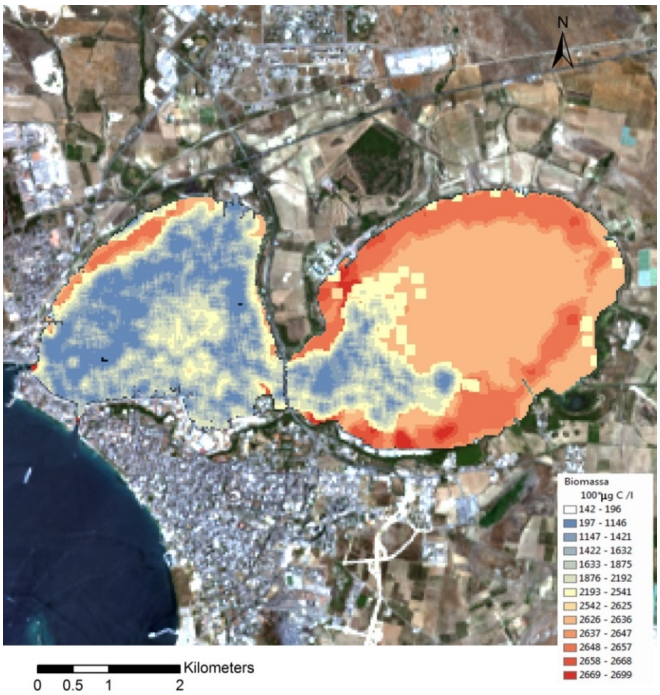

Figura 4 - Distribuzione di biomassa del nano-plancton elaborata tramite dati satellitari Landsat 8 OLI calibrati con rilievi in sito.

Qui si rileva innanzitutto l'alta correlazione tra variabili spettrali e misure di biomassa planctonica in sito (R^2_{adj}= 0.997) unita anche ad una significatività rilevante del modello (P-value(F)= 0.032). Considerando i 5 rapporti spettrali sotto forma di variabili indipendenti del modello da valutare e la limitazione dovuta all'approccio regressivo che consente di considerarne 4 per volta a causa della disponibilità di sole 6 misure (6 stazioni) per la variabile dipendente, esse sono state valutate in 2 step sostituendo la variabile meno significativa con quella non considerata inizialmente nel modello finale. In tale modo oltre ad i coefficienti per ciascuna delle variabili spettrali indipendenti nel modello lineare (colonna coefficiente) e relativi errori, l'approccio regressivo fornisce tramite la statistica t i parametri (p-value) relativi al livello di significatività (inverso) di ciascuna variabile nel

modello finale. In tal modo si nota che le due variabili maggiormente significative per la stima della biomassa planctonica risultano rispettivamente b_{12} e b_{13} entrambe costituite dalla risposta spettrale "coastal" ma con contributi opposti (segno diverso nei coefficienti) nel modello finale. Il rapporto blu-verde b_{23}, in questo caso presenta un'importanza minore per la stima della biomassa planctonica.

	S			B		
	pico	nano	micro	pico	nano	micro
R^2_{adj}	0,873	0,996	0,933	0,998	0,471	0,391
P-value	0,236	0,038	0,172	0,022	0,47	0,502
V1	b_{12}	b_{45}	b_{12}	b_{34}	b_{13}	b_{23}
V2	b_{13}	b_{12}	b_{13}	b_{12}	b_{23}	b_{13}
V3	b_{23}	b_{13}	b_{23}	b_{13}	b_{12}	b_{12}

Tabella 4 - Risultati dei modelli regressivi per la variabile dipendente abbondanza (cel/l).

	S			B		
	pico	nano	micro	pico	nano	micro
R^2_{adj}	0,873	0,997	0,933	0,998	0,432	0,391
P-value	0,236	0,032	0,172	0,022	0,486	0,502
V1	b_{12}	b_{12}	b_{12}	b_{34}	b_{23}	b_{23}
V2	b_{13}	b_{13}	b_{13}	b_{12}	b_{13}	b_{13}
V3	b_{23}	b_{23}	b_{23}	b_{13}	b_{12}	b_{12}

Tabella 5 - Risultati dei modelli regressivi per la variabile dipendente biomassa(μg/l).

La mappa di distribuzione superficiale della biomassa del nano-plancton elaborata in base al modello stimato è mostrata in figura 4. Come si vede i massimi nella distribuzione si concentrano nel secondo seno in accordo anche con le misure puntuali di calibrazione. I risultati ottenuti dalle stime dei modelli regressivi relativi alle altre grandezze planctoniche oggetto della campagna di misura condotta nel 2013 sono sintetizzati nelle seguenti tabelle 4, 5 e 6. Per l'abbondanza e la biomassa (tab. 4,5), esse riportano per distribuzioni superficiali (S) ed in profondità(B) e per le 3 classi dimensionali, i relativi coefficenti di correlazione e significatività del modello unitamente alle prime tre variabili indipendenti del modello in ordine di significatività decrescente. Lo stesso criterio è stato seguito per riportare i risultati relativi alla distribuzione della clorofilla e dei pigmenti nella tabella 6. Per le distribuzioni superficiali si rileva come i coefficienti di correlazione corretti R^2_{adj} risultato tutti significativamente alti da 0,747 per Chl a 0,997 per biomassa del nano-plancton, mentre i livelli di significatività presentano una dispersione maggiore. Le variabili indipendenti formate da rapporti includenti la banda 1, "coastal" (b_{12}, b_{13}) risultano maggiormente significative per le distribuzioni superficiali di abbondanza e biomassa mentre quella corrispondente all'usuale rapporto blu-verde (b_{23}) è preminente per la clorofilla ed i pigmenti. Le stime in profondità per il pico-plancton e la Chl si mantengono significative con un'alta correlazione mentre per le altre grandezze si rileva una diminuzione di R^2_{adj} e del P-value(F) in relazione all'aumento di profondità.

Queste elaborazioni sono state effettuate utilizzando le immagini multispettrali Landsat 8 OLI preventivamente corrette per gli effetti di rumore atmosferici ma trascurando quelli di torbidità della colonna d'acqua nel caso della mappatura delle specie algali aliene, mentre per la stima delle distribuzioni delle variabili planctoniche della colonna d'acqua sono stati trascurati gli effetti di riflessione da parte dei fondali sottostanti.

	Chl		Ph	
	S	B	S	B
R^2_{adj}	0,747	0,997	0,997	0,305
P-value	0,331	0,032	0,033	0,533
V1	b_{23}	b_{23}	b_{23}	b_{23}
V2	b_{13}	b_{45}	b_{13}	b_{13}
V3	b_{45}	b_{13}	b_{45}	b_{45}

Tabella 6 - Risultati dei modelli regressivi per le variabili Chl e pigmenti (Ph).

In questo contesto anche se vari approcci sono stati introdotti per depurare il segnale utile di riflettanza proveniente dalle seagrass , macroalghe e dalle altre coperture dei fondali marini tenendo conto dell'attenuazione dalla colonna d'acqua (Mumby et al., 1998,

Borfecchia et al., 2013 a) sovrastante in modo semi-empirico, una modellazione bio-ottica completa su base fisica permette di considerare simultaneamente in modo più appropriato entrambi i contributi al segnale uscente (WLR) dalla superficie acquatica (Albert et al. 2006). In tale contesto il codice WASI-2D (Gegè, 2014) è stato implementato per estrarre le informazioni relative alle proprietà ottiche del corpo idrico ed eventualmente ai fondali sottostanti a partire dai segnali di radianza iper-multispettrale WLR (Water Leaving Radiance), uscente dalla superficie acquatica assimilabili a quelli delle immagini multispettrali corrette atmosfericamente. Il codice permette di recuperare la distribuzione della concentrazione dei principali componenti dell'acqua otticamente attivi (fitoplancton, CDOM e sedimenti in sospensione) ed una serie di altri parametri che influenzano il segnale WLR anche in acque poco profonde. In particolare sono stimate la profondità dell'acqua e la percentuale di copertura dei vari tipi di fondo come sabbia, macrofite, sedimento e substrati vari. L'analisi dei dati è basata su un'inversione flessibile di modelli bio-ottici consolidati (Albert & Gege, 2006) sulla base di risposte spettrali tipiche delle componenti considerate in particolare fino a 6 classi di fitoplancton e vari tipi di materiale in sospensione spettralmente diversi. La riflettanza del fondale viene trattata come miscela di 6 tipi di substrato i cui spettri di riflettanza sono memorizzati in una banca dati che copre la gamma spettrale da 350 nm a intervalli di 1000 nm . Questo database contiene tutti gli spettri di riflettanza utilizzati nel codice e può essere aggiornato per rappresentare adeguatamente le proprietà ottiche reali dei vari costituenti otticamente attivi delle acque costiere, i vari tipi di fondale, seagrass e macroalghe della zona da monitorare. Nel nostro caso i dati Landsat 8 OLI atmosfericamente corretti della zona costiera di interesse sono stati adeguatamente riformattati prima di essere forniti in ingresso al codice WASI-2D, quindi si è proceduto con la procedura di calibrazione interattiva utilizzando i sottoinsiemi di pixel in corrispondenza delle stazioni di campionamento. Per migliorare la convergenza in fase d'inversione sono stati introdotti vari vincoli per gli intervalli di concentrazione dei componenti otticamente attivi definiti sulla base delle misure rilevate in sito. Gli spettri utilizzati per le diverse coperture di fondale in aggiunta a quelle di sabbia e sedimenti comprendono anche quelli di alcune macrofite verdi tipiche delle acque interne (Characontraria, Potamogeton perfoliatus), che sono stati sfruttati per la valutazione preliminare dell'utilizzo dei dati multispettrali Landsat 8 OLI in questo approccio bio-ottico. Esempi dei primi risultati ottenuti sulla base degli spettri contenuti nel database originale del codice sono riportati nelle figure 5 e 6 che mostrano rispettivamente le distribuzioni stimate contemporaneamente di fitoplancton e macrofite del fondale.

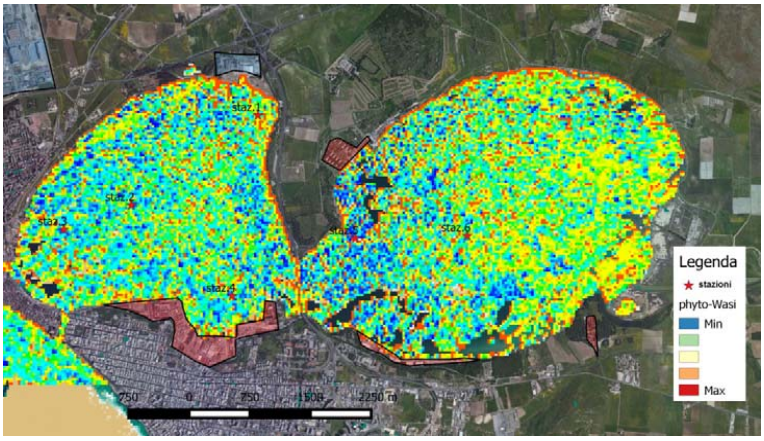

Figura 5 - Distribuzione di fitoplancton sul Mar Piccolo di Taranto ottenuta da dati Landsat 8 OLI del giugno 2013 tramite il codice WASI-2D.

Risultati e conclusioni

Come si vede i prodotti tematici preliminari ottenuti tramite inversione bio-ottica, sebbene notevolmente rumorosi specialmente per il fitoplancton, sembrano essere in sufficiente accordo sia

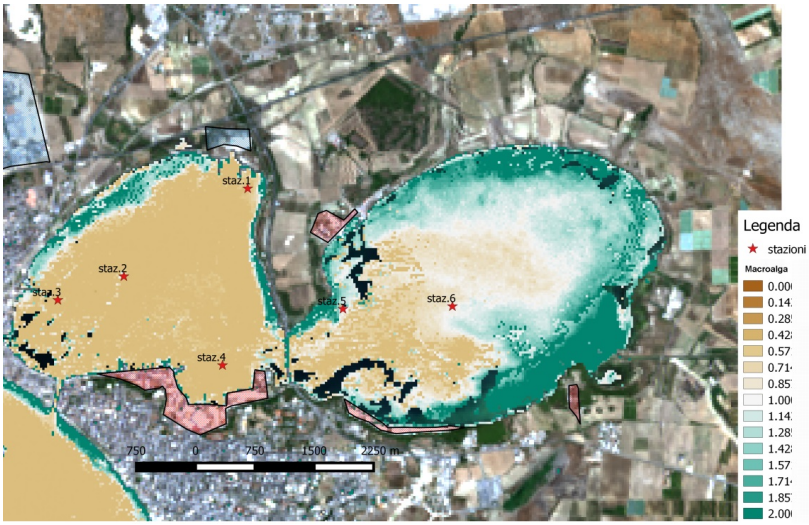

Figura 6 - Distribuzione di macrofite sui fondali del Mar Piccolo di Taranto ottenuta da dati Landsat 8 OLI del giugno 2013 tramite il codice WASI-2D.

con quelli precedenti derivati per mezzo dell' analisi e modellazione statistica sia con quelli di verità a mare.
Questi risultati preliminari dimostrano che i miglioramenti del nuovo sensore OLI possono permettere una maggiore efficacia complessiva nelle sue applicazioni marine e per la caratterizzazione dei bassi fondali. L'introduzione della nuova banda "coastal", in particolare si rileva vantaggiosa per il monitoraggio delle caratteristiche del fitoplancton che gioca un ruolo rilevante nella produttività fotosintetica e stoccaggio di carbonio. In prospettiva si pensa di migliorare i risultati ottenuti con una personalizzazione del database del sistema WASI-2D sulla base degli spettri tipici degli specifici elementi (substrati, macrofite, macroalghe, fitoplancton,…) che intervengono nella modellazione bio-ottica da acquisire opportunamente nell'area d'interesse, tramite apposite campagne di misura.

Bibliografia

Albert A., Gege P., 2006. Inversion of irradiance and remote sensing reflectance in shallow water between 400 and 800 nm for calculation of water and bottom properties. Applied Optics, 45: 2331-2343.

Borfecchia Flavio, De Cecco Luigi, Martini Sandro, Ceriola Giulio, Bollanos Stelios, Vlachopoulos George, Valiante Luigi M., Belmonte Alessandro, Micheli Carla, 2013 a. Posidonia oceanica genetic and biometry mapping through HR satellite spectral vegetation indices and sea truth calibration. International Journal of Remote Sensing, 34 (13): 4680, 4701.

Borfecchia, F.; Micheli, C.; Carli F.; De Martis S.C.; Gnisci V.; Piermattei V.; Belmonte A.; De Cecco L.; Martini S.; Marcelli M. Mapping spatial patterns of Posidonia oceanica meadows by means of Daedalus ATM airborne sensor in the coastal area of Civitavecchia (Central Tyrrhenian Sea, Italy). Remote Sens. 2013 b, 5(10), 4877-4899.

Blondeau-Patissier D., Gower F.R. J., Dekker G. A., Phinn R. S., Brando E. V., 2014. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. Progress in Oceanography 123 (2014) 123–144.

Caroppo C., Cerino F., Auriemma R., Cibic T. 2015. Phytoplankton dynamics with a special emphasis on harmful algal blooms in the Mar Piccolo of Taranto (Ionian Sea, Italy). Environ Sci Pollut Res. DOI: 10.1007/s11356-015-5000.

Cibic T., Bongiorni L., Borfecchia F., Di Leo A., Franzo A., Giandomenico S., Karuza A., Micheli C., Rogelja M., Spada L., Del Negro P., 2015. Ecosystem functioning approach applied to a large contaminated coastal site: the study case of the Mar Piccolo of Taranto (Ionian Sea). Environ Sci Pollut. Res. DOI 10.1007/s11356-015-4997-2.

Dierssen M. H., 2009. Perspectives on empirical approaches for ocean color remote sensing of chlorophyll in a changing climate. PNAS Perspective. Edited by David M. Karl, University of Hawaii, Honolulu, HI, and approved August 24, 2010.

Gege P., 2014. WASI-2D:A software tool for regionally optimized analysis of imaging spectrometer data from deep and shallow waters. Computer & Geosciences, 62: 208-215.

Micheli C. , Borfecchia F. , . De Cecco L, Martini S., Ceriola G. , Bollanos S. , Vlachopoulos G. , Valiante L. M. , Fresi E., Campbell G., 2010. Seagrass monitoring by remote sensing in the context of biodiversity conservation. Rapp. Comm. int. Mer Médit., 39.

Mumby P. J., Clark C. D., Green E. P., Edwards A. J., 1998. Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs. Int. j. remote sensing, 19, 1, pp. 203 210.

Pasqualini V., Pergent-Martini C., Pergent G., Agreil M., Skoufas G., Sourbes L., Tsirika A.,2005. Use of SPOT 5 for mapping seagrasses: An application to Posidonia oceanica. Remote Sensing of Environment, 94: 39–45.

Petrocelli A., Cecere E., Portacci G., Micheli C., De Cecco L., Martini S., Borfecchia F. , 2015. Preliminary Mapping of the alien seaweed Hypnea Cornuta (Rhodophyta, Gigartinales) in the Mar Piccolo of Taranto (Southern Italy, Mediterranean Sea). 46° SIBM Comgress, Rome 2015.