

Utilizzo di immagini ottiche ad alta risoluzione spaziale per lo studio delle caratteristiche del fondale in acque costiere poco profonde

Erica Matta, Martina Aiello, Mariano Bresciani, Marco Gianinetto, Claudia Giardino

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 studio s'inserisce nell'ambito del progetto bandiera RITMARE (Ricerca Italiana per il MARE), finanziato dal MIUR e coordinato dal CNR per il quinquennio 2012-2016. Obiettivi di tale progetto sono la protezione, l'uso sostenibile e lo studio della risorsa marina nella sua totalità. Il lavoro presentato si riferisce allo studio delle fascia costiera compresa tra 0 e 10 m di profondità, al fine di avere informazioni utili per la sua gestione. L'area di studio è localizzata nella parte settentrionale del Golfo di Oristano (Sardegna). L'integrazione di dati satellitari e osservazioni *in-situ* ha permesso la produzione di mappe relative alla batimetria ed alla copertura vegetativa (principalmente *Posidonia oceanica*) del fondale lungo l'area costiera meridionale della penisola del Sinis. Un'immagine RapidEye, acquisita in data 24/09/2013, con risoluzione spaziale di 5m e cinque bande spettrali nell'intervallo 400-900nm è stata processata per rimuovere l'effetto atmosferico mediante il codice 6SV (*Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*). L'immagine è stata successivamente elaborata mediante il modello bio-ottico implementato nel software BOMBER (*Bio-Optical Model Based tool for Estimating water quality and bottom properties from Remote sensing images*), che invertendo le equazioni del trasferimento radiativo in acqua, permette di stimare le caratteristiche del fondale e la profondità delle acque a partire da valori di riflettanza. Il modello è stato parametrizzato tramite misure delle proprietà ottiche inerenti delle acque e misure delle risposte spettrali dei substrati che compongono il fondale acquisite durante la campagna di misura effettuata nel periodo 1-10/08/2013. Osservazioni relative alla tipologia di copertura del fondale e misure di profondità delle acque sono invece servite per validare i prodotti ottenuti, mostrando una buona correlazione tra valori misurati in campo e stimati dal modello ($R^2=0.84$ per la batimetria e accuratezza dell'88% per la copertura del fondale). È stato osservato un legame tra il gradiente batimetrico del fondale e la relativa copertura vegetativa: la *P. oceanica* sembra prediligere fondali con pendenze più dolci.

Abstract

*This study born in the context of the RITMARE flagship project (Ricerca Italiana per il MARE), funded by the Ministry of Education, Universities and Research and coordinated by the National Research Council of Italy for the years 2012-2016. Protection, sustainable use and study of the marine resource as a whole are among the objectives of this project. The work here presented refers to the study of coastal zones (0-10 m deep), in order to obtain useful information for its management. The study area is located in the northern part of the Gulf of Oristano (Sardinia). The integration of satellite data with in-situ observations has enabled the production of bathymetry and vegetative cover (mainly *Posidonia oceanica*) maps of the seabed along the coastal area of the southern Sinai Peninsula. One RapidEye image, acquired on 09/24/2013, with a spatial resolution of 5m and five spectral bands in the spectral range 400-900nm, has been processed for the atmospheric effects removal using the 6SV code (Second Simulation of the Satellite Signal in the*

Solar Spectrum). The image was then processed using the bio-optical model implemented in the software BOMBER (Bio-Optical Model Based tool for Estimating water quality and bottom properties from Remote sensing images). This model inverts the equations describing the radiative transfer of light in the water, allowing us to estimate water depths and bottom characteristics from reflectance values. The model was parameterized using measurements of the inherent optical properties of water and measurements of the spectral responses of the different bottom cover types, collected during one field campaign carried out in the period 1-10/08/2013. Observations of bottom cover types and water depth measurements were used to validate the obtained maps, showing a good correlation between measured and estimated values ($R^2 = 0.84$ for bathymetry map and accuracy of 88% for bottom coverage map). Relationship between the bathymetric gradient of the bottom and its vegetative cover has been observed: *P. oceanica* seems to prefer more gentle slopes to grow and expand.

Introduzione

Il lavoro presentato è stato sviluppato all'interno del progetto bandiera RITMARE (Ricerca ITALiana per il MARE), finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca e diretto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). È un progetto ampio ed articolato, che riguarda il mare nei suoi diversi aspetti, considerandolo come risorsa naturale, economica, turistica, fonte di biodiversità. Nel periodo di attività del progetto (2012-2016) uno degli obiettivi è quello di aumentare le conoscenze dei processi biologici e morfologici che hanno luogo negli ambienti marini (sia di mare aperto che in aree costiere) per una migliore comprensione delle dinamiche ambientali e per la conseguente gestione dell'ambiente marino in un'ottica sostenibile. In particolare, lo studio oggetto di questo articolo è inserito nel sottoprogetto relativo alla pianificazione degli ambienti marini costieri. Questi sono ambienti di transizione tra terra e mare, caratterizzati da grande dinamicità spazio-temporale, nei quali si sviluppano ecosistemi naturali fragili, minacciati sia da cause antropiche (es. sversamenti agricoli ed industriali, attività di pesca, turismo) che da cause naturali (es. cambiamenti climatici). Uno degli ecosistemi marini costieri tipici del mar Mediterraneo è costituito da praterie di *Posidonia Oceanica*, una fanerogama acquatica endemica, identificata come buon bio-indicatore dalla Direttiva Europea "Water Framework Directive" (Dir. 2000/60/EC) per la sua estrema sensibilità alla modificazione delle condizioni ambientali. Oltre alle sue specifiche esigenze di crescita e sviluppo (acque trasparenti e basso idrodinamismo) la *P. Oceanica* svolge anche una serie di funzioni ecologiche estremamente importanti in ambito costiero, come la stabilizzazione dei sedimenti, lo smorzamento delle onde, la fissazione di carbonio e la filtrazione di particelle sospese (Ondiviela et al., 2014). Inoltre, le praterie di *P. oceanica* costituiscono nutrimento e protezione per molte specie animali acquatiche (Orth et al., 2006). Il telerilevamento ottico può costituire un funzionale strumento d'indagine per lo studio delle aree costiere, dal momento che i sensori satellitari sono in grado di registrare la radiazione uscente dalle superfici acquatiche. Quando la profondità della colonna d'acqua non è elevata e la trasparenza delle acque è tale da rendere visibile il fondale, si parla di *optically shallow waters*. In questi casi la radiazione elettromagnetica registrata al sensore è in grado di fornire informazioni riguardo alle caratteristiche del fondale oltre a quelle relative alla superficie acquatica. Sensori con un pixel al suolo di pochi metri (es. WorldView-2, RapidEye) e un'adeguata sensibilità radiometrica (un elevato rapporto segnale-rumore) sono considerati più idonei per rappresentare la variabilità spaziale degli ambienti costieri. In questo lavoro si presentano alcuni risultati relativi all'attività svolta all'interno del Golfo di Oristano (una delle aree test del progetto RITMARE). L'obiettivo è la produzione di mappe di batimetria e di copertura vegetativa del fondale utilizzando immagini remote ad alta risoluzione spaziale. I prodotti sono stati ottenuti implementando un modello bio-ottico in grado di derivare valori di batimetria e informazioni relative alla copertura del fondale a partire da dati telerilevati, previa adeguata calibrazione del modello tramite misure *in-situ*. Parte dei dati raccolti in campo sono stati utilizzati per validare i prodotti finali.

Area di studio

Il Golfo di Oristano è un'insenatura del mar di Sardegna che si estende per 150km² a sud-ovest dell'omonima città. Il golfo è delimitato a nord da capo S. Marco e a sud da capo Frasca, due prolungamenti di terraferma che racchiudono al loro interno le acque del golfo, lasciando una zona di interscambio con il mare lunga 10km in direzione nord-sud. Capo S. Marco costituisce la parte più meridionale della penisola del Sinis, una penisola formatasi per accumulo di sedimenti alluvionali che hanno collegato la terraferma ad alcuni isolotti nella zona a nord-ovest e sud-ovest della penisola stessa. La profondità media del golfo è di 15m e il fondale è popolato per la maggior parte da praterie di *P. oceanica* (De Falco et al., 2008). Un sistema di lagune si sviluppa attorno al golfo, costituendo siti di importanza comunitaria (Dir. n.92/43/CEE), nei quali le attività umane sono limitate e controllate da uno specifico iter di approvazione. L'area di studio di questo lavoro (Figura 1) si trova nella parte settentrionale del golfo, ed è ristretta alle acque costiere che circondano capo S. Marco, comprendendo sia acque che si affacciano verso il mare aperto (a ovest), sia acque di golfo (ad est).

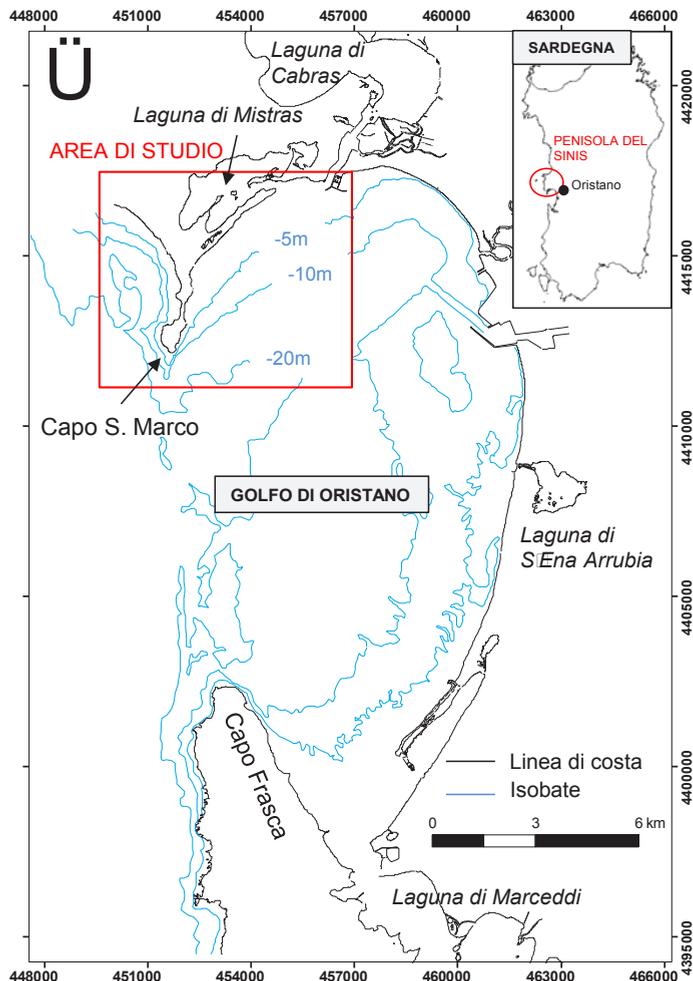


Figura 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio (De Falco et al. 2008, modificata).

Materiali e metodi

In Agosto 2013 è stata condotta una campagna di misure al fine di caratterizzare otticamente la colonna d'acqua e il fondale dell'area di studio. Sono state investigate cinquanta stazioni, distribuite in modo tale da rappresentare la colonna d'acqua in diverse situazioni di profondità e descrivere adeguatamente la variabilità del fondale. Per quanto riguarda la colonna d'acqua sono state misurate le relative Proprietà Ottiche Apparenti (AOP) ed Inerenti (IOP); le prime dipendenti sia dal mezzo acquatico che dal campo di luce e dalla geometria di ripresa, le seconde legate solo alla composizione della colonna d'acqua. Tra le AOP sono state misurate la riflettanza al di sopra della superficie acquatica (Rrs - spettroradiometro di campo WISP-3) e l'Irradianza discendente lungo la colonna (Ed - sensore PAR LiCOR Li-190). In aggiunta, misure di trasparenza della colonna d'acqua sono state effettuate con Secchi disk. Tra le IOP sono stati misurati assorbimento e *back-scattering* delle componenti otticamente attive (OAC) presenti nella colonna d'acqua, ovvero materiale organico ed inorganico sospeso (TSM), clorofilla-a (CHL-a) e sostanza organica colorata disciolta (CDOM). Le concentrazioni delle tre OAC sono state misurate in superficie (entro il primo metro di profondità) e lungo alcuni profili verticali per CHL-a e CDOM; in questo caso utilizzando il fluorimetro Cyclope-7. Per derivare assorbimenti e concentrazioni delle OAC sono stati raccolti campioni di acqua, successivamente filtrati con filtri Whatman GF/F, diametro 35mm. Il materiale trattenuto sul filtro è stato analizzato in laboratorio per derivare gli assorbimenti del particolato sospeso in acqua (Strömbeck e Pierson, 2001) e del materiale disciolto (CDOM, Babin et al., 2003). Per la concentrazione di CHL-a si è seguito il protocollo di misura ISO 10260-E (1992). Le concentrazioni di TSM son state derivate tramite metodo gravimetrico (Strömbeck e Pierson, 2001). Il *back-scattering* è stato misurato utilizzando lo strumento Hydroscat-6 (Maffione e Dana, 1997). Le diverse tipologie di copertura del fondale sono state campionate e parte del materiale è stato portato a riva per misurarne le caratteristiche spettrali utilizzando lo spettroradiometro di campo WISP-3. Osservazioni dirette hanno permesso di stimare la composizione del fondale in ogni stazione effettuata in *optically shallow waters*.

In data 24/09/2013 è stata acquisita un'immagine RapidEye. RapidEye è una costellazione di cinque satelliti tedeschi, che orbitando attorno alla terra, permettono l'acquisizione giornaliera (off-nadir) dell'intero globo. Ogni satellite è dotato dello stesso sensore, in grado di registrare la radiazione elettromagnetica in cinque bande spettrali nell'intervallo 400-900nm. In aggiunta alle quattro classiche bande R/G/B/NIR, ne è stata definita una tra 690 e 730nm, utile per la cattura del picco di riflettanza nella regione dell'infrarosso vicino tipico della CHL-a. Il sensore RapidEye ha una risoluzione spaziale di 5m, un buon compromesso per poter rappresentare la variabilità spaziale nelle zone costiere e per poter registrare un segnale abbastanza elevato da una superficie così poco riflettente come quella acquatica (tipicamente la riflessione dell'acqua pura è pari al 5% della luce incidente, Kirk 2010). L'immagine satellitare è stata dapprima corretta radiometricamente, applicando specifici coefficienti di calibrazione. In seguito, un codice di trasferimento radiativo (6S, *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*, Vermote et al., 1997) è stato applicato all'immagine per derivarne valori di riflettanza. Il codice 6S è stato parametrizzato utilizzando il profilo atmosferico *Midlatitude Summer* e il modello di aerosol *Maritime*. I valori di spessore ottico (AOD) sono stati derivati dai prodotti MODIS (MOD04). L'immagine in riflettanze è stata infine elaborata con il tool BOMBER (*add-on* di ENVI, Giardino et al., 2012), il quale implementa un modello bio-ottico in grado di produrre mappe di batimetria e percentuale relativa di diversi tipi di substrato (per un massimo di 3 substrati). Il modello è stato calibrato utilizzando le misure *in-situ* (per una descrizione più approfondita vedere Matta et al., 2014) relative alle proprietà ottiche specifiche dell'area di studio e alle firme spettrali caratteristiche delle diverse tipologie di copertura del fondale. Sono state scelte due tipologie per rappresentare il fondale privo di vegetazione (uno più riflettente ed uno meno riflettente) ed una tipologia per la prateria di *P. oceanica*. Le percentuali relative dei tre tipi di substrato forniti come output dal modello sono stati raggruppati in un'unica percentuale di copertura vegetativa del fondale (da 0%=fondale non

vegetato a 100%=fondale completamente coperto da vegetazione). I risultati finali sono stati validati grazie alle misure *in-situ* di profondità (Cyclope-7) e di composizione del fondale (osservazioni dirette). È stato possibile utilizzare tali misure, anche se non contemporanee all'acquisizione dell'immagine telerilevata, poiché l'intervallo temporale non è così ampio da poter causare significative variazioni delle condizioni di copertura del fondale: entrambe le date ricadono nella stessa stagione vegetativa della *P. oceanica*. Il fondale è stato classificato visivamente in vegetato, misto e non vegetato; a queste classi corrispondono percentuali di copertura vegetativa derivate dal modello bio-ottico >66%, tra 66% e 33%, e <33% rispettivamente.

Risultati

In Figura 2 è mostrata la mappa batimetrica derivata dall'elaborazione dell'immagine RapidEye.

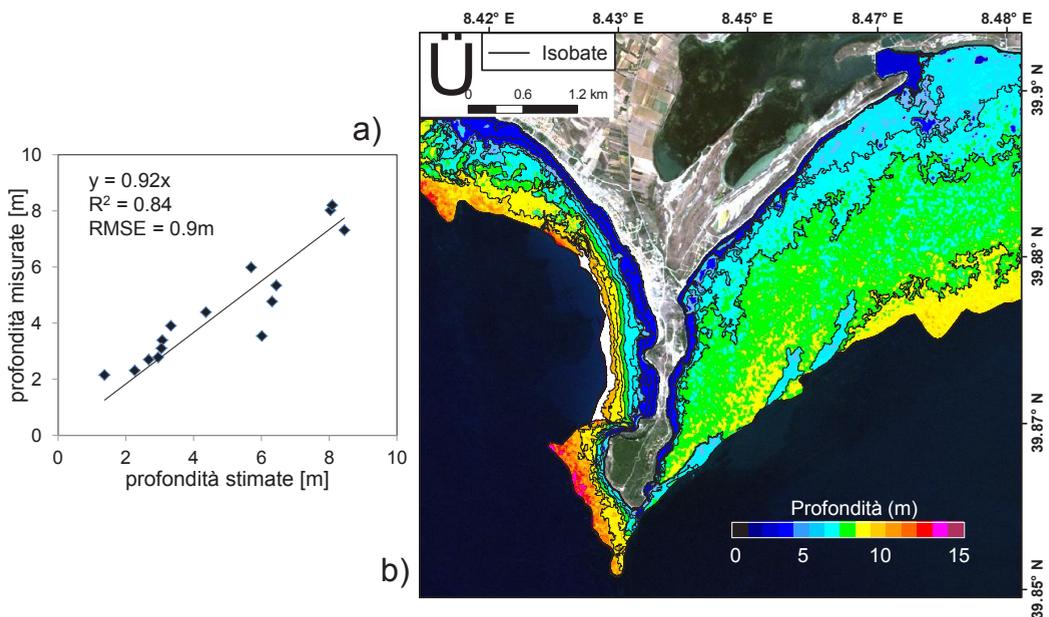


Figura 2 □a) regressione tra profondità stimate dal tool BOMBER e misurate *in-situ*; b) mappa batimetrica derivata dall'immagine RapidEye.

Si può notare come il fondale risulti morfologicamente differente sui due lati di capo S. Marco. Ad ovest il fondale degrada rapidamente, come evidenziato anche dalle isobate molto ravvicinate, mentre ad est, internamente al golfo, la morfologia è più dolce, con isobate ben distanziate. Questa zona con pendenze meno accentuate, è considerata la paleovalle del fiume Tirso durante l'ultima glaciazione (Carboni et al., 1989). La mappa di batimetria è stata validata confrontando le profondità misurate in campo con quelle stimate dal modello bio-ottico nelle corrispondenti stazioni di misura. La regressione mostra un R^2 pari a 0.89 e un $RMSE=0.9m$ (Figura 2a).

La mappa di copertura vegetativa è riportata in Figura 3: anche in questo caso è osservabile una differenziazione tra l'area interna al golfo e quella che si affaccia sul mare aperto. La prima è coperta da una densa prateria di *P. oceanica*, mentre la seconda è quasi totalmente priva di vegetazione. Le possibili cause di tali differenze possono essere imputate a diversi fattori morfologici ed idrodinamici: la pendenza del fondale, più marcata lungo il lato occidentale di capo S. Marco, può rendere più difficile la colonizzazione di questa pianta. Inoltre, questa è una zona

maggiormente esposta ai venti e alle correnti marine. L'elevato idrodinamismo non favorisce la crescita di *P. oceanica*, ma facilita il suo sradicamento e spiaggiamento lungo le coste; accumuli di materiale vegetativo sono stati osservati in questa zona durante la campagna di misura. L'area ad est di capo S. Marco gode, invece, della sua protezione dai venti, tra i quali il più comune risulta essere il Maestrale, che soffia da nord-ovest. Le acque qui hanno anche tempi di residenza relativamente maggiori rispetto ad altre porzioni del golfo (Cucco et al., 2006), creando condizioni più idonee alla proliferazione della *P. oceanica*.

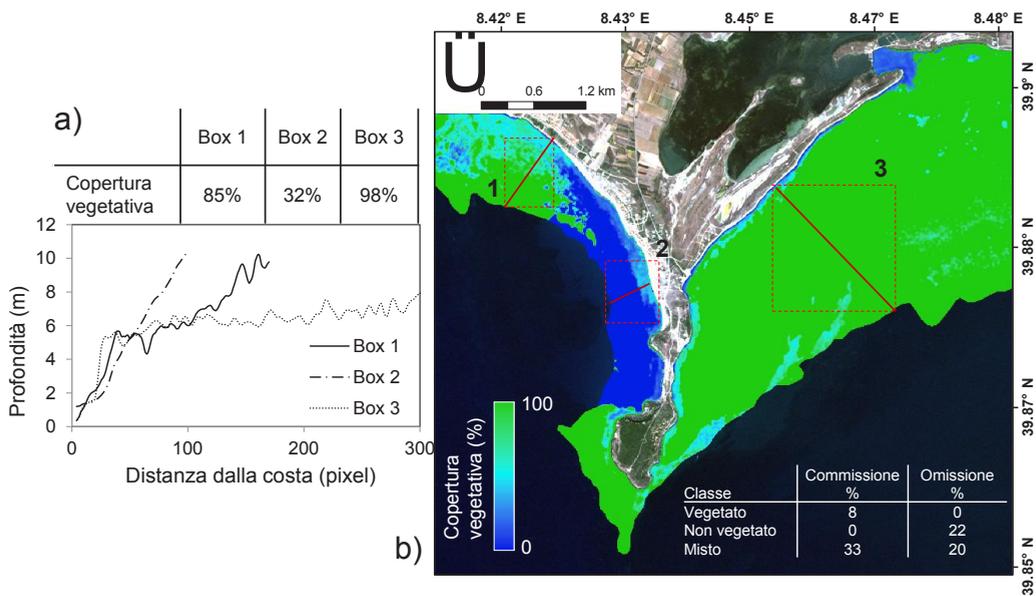


Figura 3 □a) profili batimetrici e corrispondente copertura vegetativa misurata nei tre box evidenziati in figura 3b; b) mappa di copertura vegetativa derivata dall'immagine RapidEye con relativi errori di commissione ed omissione.

La zona prospiciente il porto turistico (estremo nord-est della mappa) presenta zone con vegetazione più rada: la presenza dell'area portuale e della connessione con le lagune di Cabras e Mistras possono influire sulla qualità dell'acqua in questa zona, deteriorandola e causando una riduzione della presenza di *P. oceanica*. Nella laguna di Mistras, in particolare, sono attestate attività di acquacoltura. La validazione della mappa di copertura ha dato come risultati un'accuratezza globale dell'88% ed errori di omissione/commissione espressi in Figura 3b. Una possibile relazione tra copertura vegetativa e morfologia del fondale (in termini di pendenza) è stata indagata confrontando i valori di copertura in tre diverse aree (evidenziate dai box tratteggiati in Figura 3b) ed estraendo il corrispondente profilo batimetrico (Figura 3a e transetti in Figura 3b). Si può notare come all'aumentare della pendenza del fondale la copertura vegetativa tenda a diminuire, a supportare l'ipotesi che la morfologia del fondale sia uno dei fattori che influenzano la colonizzazione della *P. oceanica*.

Ringraziamenti

L'attività di ricerca è stata finanziata dal progetto RITMARE (MIUR-CNR). Un ringraziamento speciale a tutti coloro che hanno fornito il loro supporto durante le attività di campagna, in particolare Giovanni de Falco ed Andrea Satta (CNR-IAMC, Oristano) e Mauro Musanti (CNR-IREA, Milano).

Bibliografia

- Babin M., Stramski D., Ferrari G. M., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N. (2003), "Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe", *Journal of Geophysical Research*, 108 (C7), 3211.
- Carboni S., Lecca L., Ferrara C. (1989), "La discordanza versiliana sulla piattaforma occidentale della Sardegna", *Bollettino Società Geologica Italiana*, 108: 503-519.
- Cucco A., Perilli A., De Falco G., Ghezzi M., Umgiesser G. (2006), "Water circulation and transport timescales in the Gulf of Oristano", *Chemistry and Ecology*, 22 (Suppl. 1): 307-331.
- De Falco G., Baroli M., Cucco A., Simeone S. (2008), "Intrabasin conditions promoting the development of a biogenic carbonate sedimentary facies associated with the seagrass *Posidonia oceanica*", *Continental Shelf Research* 28: 797-812.
- Direttiva 92/43/CEE del Consiglio delle Comunità Europee del 21 maggio 1992 relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche, 22.7.92, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, N. L 206/7.
- Direttiva 2000/60/EC del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2000, che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, L327:1-72.
- Giardino C., Candiani G., Bresciani M., Lee Z., Gagliano S., Pepe M. (2012), "BOMBER: a tool for estimating water quality and bottom properties from remote sensing images", *Computer and Geoscience*, 45: 313-318.
- ISO 10260-E (1992). Water quality measurement of biochemical parameters spectrophotometric determination of chlorophyll-a concentration Geneva, Switzerland: ISO (E).
- Kirk J. T. O. (2010), *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* Third edition, Cambridge university press, New York, pp. 662.
- Maffione R. A., Dana D.R. (1997) "Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters", *Applied Optics*, 36: 6057-6067.
- Matta E., Aiello A., Bresciani M., Musanti M., Gianinetto M., Satta A., De Falco G., Giardino C., "Satellite observations and in situ measurements for mapping bathymetry, sea bottom types and water quality in the gulf of Oristano (Sardinia, Italy)", *atti del V Simposio Internazionale Il Monitoraggio Costiero Mediterraneo: problematiche e tecniche di misura* □ 17-18-19 giugno 2014, Livorno.
- Ondiviela B., Losada I. J., Lara J. L., Maza M., Galván C., Bouma T. J., van Belzen J. (2014), "The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate", *Coastal Engineering*, 87: 158-168.
- Orth R.J., Carruthers T.J.B., Dennison W.C., Duarte C.M., Fourqurean J.W., Heck JR. K.L., Hughes A.R., Kendrick G.A., Kenworthy W.J., Olyarnik S., Short F.T., Waycott M., Williams S.L.(2006), "A Global Crisis for Seagrass Ecosystems", *BioScience*, 56 (12): 987-996.
- Strömbeck N., Pierson D. C. (2001), "The effects of variability in the inherent optical properties on estimations of chlorophyll a by remote sensing in Swedish freshwater", *Science of Total Environment*, 268: 123-137.
- Vermote E., Tanré D., Deuzé J. L., Herman M., Morcrette J. J. (1997), *Second simulation of satellite signal in the solar spectrum (6S)*, 6S User guide (v. 2) and 6S code (v. 4.1), pp. 54.