

STUDIO DELLA PRODUZIONE PRIMARIA DELLE ACQUE MARINE TOSCANE

Luigi LAZZARA (*), Christian MARCHESE (*), Fabio MASELLI (**),
Luca MASSI (***), Caterina NUCCIO (***), Maurizio PIERI (****),
Carolina SANTINI (*), Valentino SORANI (*****)

(*) Università di Firenze – Dipartimento Biologia Evoluzionistica “Leo Pardi”,
Via Romana, 17, 50125 Firenze, Italy, luigi.lazzara@unifi.it

(**) CNR – Istituto di Biometeorologia (IBIMET)

(***) Università di Firenze – Laboratorio di Ecologia, Dipartimento di Biologia Vegetale
(****) Consorzio LaMMA

(*****) Universidad Autónoma del Estado de Morelos - Departamento de Ecología, Mexico

Riassunto

Il fitoplancton costituisce il principale produttore primario di materia organica in mare e la concentrazione di clorofilla-*a* rappresenta un indice riconosciuto dell'abbondanza di biomassa fitoplanctonica, necessariamente correlata con il carbonio organico contenuto e prodotto (Produzione Primaria). Le stime di produzione primaria (PP) tramite modelli di simulazione hanno trovato in queste ultime decadi l'ausilio di immagini satellitari che forniscono informazioni spazialmente e temporalmente distribuite riguardo alla concentrazione di clorofilla-*a* ed altri importanti parametri biofisici marini: temperatura superficiale del mare (SST), radiazione fotosintetica (PAR), ecc..

Scopo di questa ricerca è quello di creare una procedura per ricavare mappe di PP per l'area marina antistante la costa della regione Toscana. Per le acque marine toscane è stato messo a punto un modello semianalitico del colore del mare e sottoposto ad una prima fase di validazione. L'inversione del modello fornisce le concentrazioni di clorofilla, sedimenti in sospensione e sostanza gialla, a partire dai dati di radianza misurati dal sensore MODIS Aqua. Per il calcolo della produzione primaria pelagica la procedura presentata utilizza queste stime satellitari ed altre informazioni all'interno di un modello semianalitico di tipo bio-ottico risolto in lunghezza d'onda e in profondità. In questa fase iniziale del progetto sono state ottenute mappe di PP che rappresentano il prototipo del prodotto finale calibrato per le acque in studio.

Abstract

Phytoplankton is the main primary producer of organic matter in the sea. Chlorophyll concentration represents a standard index of phytoplankton biomass abundance, and therefore of organic carbon contained and produced (Primary Production). In the last decades the estimation of Primary Production (PP) through simulation models has found the support of satellite images that provide spatial and temporarily distributed information about the concentration of chlorophyll and other major marine bio-physical parameters: sea surface temperature (SST), photosynthetic radiation (PAR), etc..

The present work aims at developing a procedure for obtaining PP maps of the sea area in front of the Tuscany region. A semi-analytical model of the Tuscany marine waters is used to estimate the concentration of chlorophyll, suspended sediments and yellow substance, from the measured MODIS Aqua radiances. The pelagic primary production is then assessed by using these satellite estimates and other information within a bio-optical semianalytical model resolved in wavelength and depth. In this preliminary phase some PP maps have been obtained, that represent the end product prototype, specifically calibrated for the study waters.

Introduzione

La produzione primaria marina (PP), ovvero la quantità di carbonio organico per unità di tempo e superficie attraverso la fotosintesi algale, gioca un ruolo chiave nel ciclo del carbonio del Mar Mediterraneo (Nardello et al., 2003). Da alcuni anni sono stati pubblicati ampi studi di monitoraggio stagionale e interannuale della produzione primaria pelagica mediterranea impiegando immagini sinottiche giornaliere acquisite da sensori satellitari dedicati allo studio del colore del mare e della temperatura superficiale marina (Bosc et al., 2004; Colella, Santoleri, 2008). In questi lavori, a scala di bacino, sono stati ottenuti miglioramenti nella stima di produzione primaria pelagica rispetto ai corrispettivi prodotti globali standard, grazie a calibrazioni locali a mare dei dati satellitari.

La fitomassa pelagica nel Mediterraneo, infatti, è mediamente sovrastimata nei prodotti standard forniti dalla NASA tramite il sensore MODIS. Per questa ragione, tale fitomassa va quantificata in modo appropriato a scala di bacino, con calibrazioni di dati, trattati tramite metodologie empiriche o modelli semianalitici, al fine di ottenere stime più realistiche della produzione primaria marina.

In questo studio viene schematizzata la fase iniziale di un progetto, finanziato da Ente Cassa di Risparmio di Firenze, che ha come tappa iniziale, l'elaborazione di mappe di produzione primaria pelagica giornaliera delle acque marine prospicienti la regione Toscana e, come punto d'arrivo, il calcolo regionale dei flussi di carbonio tra atmosfera e mare e tra zona eufotica ed acque profonde.

I dati di *input* del modello di produttività sono forniti da immagini MODIS giornaliere (per i costituenti marini otticamente attivi e la temperatura superficiale del mare) e da dati di radiazione fotosintetica (PAR) misurata da alcuni radiometri vicini alla linea di costa che delimita l'area di studio.

Per il ruolo fondamentale giocato dalla PAR nell'innescare e nella regolazione delle funzioni autotrofe delle popolazioni pelagiche, misure frequenti di radiazione discendente migliorano sensibilmente la stima della produzione primaria giornaliera.

In questo lavoro si utilizza un modello semianalitico di colore del mare sviluppato per le acque in studio ed applicato a dati MODIS Aqua (Maselli et al., 2008). Mediante una procedura di inversione del modello, calibrato con dati di verità a mare ricavati da una campagna di campionamenti eseguita nel 2003 e validati da misure a mare raccolte tra il 2004 e il 2006, si ottiene la distribuzione di clorofilla, presente nelle acque superficiali nell'area di studio.

Le mappe settimanali ottenute dall'elaborazione regionale dei dati, sono state anche confrontate con le stime standard di clorofilla, su otto giorni, distribuite dalla NASA e basate sull'algoritmo OC3M definito da O'Reilly et al., (2000). Quindi, mediante il modello di produzione primaria sono state prodotte alcune mappe giornaliere di PP nelle acque marine toscane.

Area di studio

L'area di studio comprende il settore orientale del Mar Ligure, a Nord, e la porzione settentrionale del Mar Tirreno, a Sud (Figura 1).

I rilievi a mare sono stati prevalentemente raccolti in una fascia compresa fra la punta settentrionale della Corsica ed il promontorio di Piombino sulla costa toscana. L'area di studio rappresenta una zona di transizione fra i due bacini (Ligure e Tirreno) che differiscono soprattutto per alcuni aspetti climatici e batimetrici.

Le correnti marine che determinano lo scambio delle acque fra i due bacini sono generalmente dirette verso il Mar Ligure, specialmente in inverno ed in primavera. Alcuni studi svolti nell'area antistante la Toscana mostrano le principali caratteristiche del ciclo annuale della biomassa fitoplanctonica (Lenzi Grillini e Lazzara, 1980; Innamorati et al., 1995).

Gli autori descrivono un ciclo con due massimi di fioritura algale, uno maggiore in primavera ed uno minore in autunno, così come spesso risulta anche dai dati satellitari pubblicati (Morel e André, 1991; Bricaud et al., 2002; Bosc et al., 2004). Solitamente intorno ad Aprile, una vasta fioritura algale si sviluppa nelle acque oceaniche del Mar Ligure occidentale, influenzando anche tutta la parte settentrionale dell'area di studio.

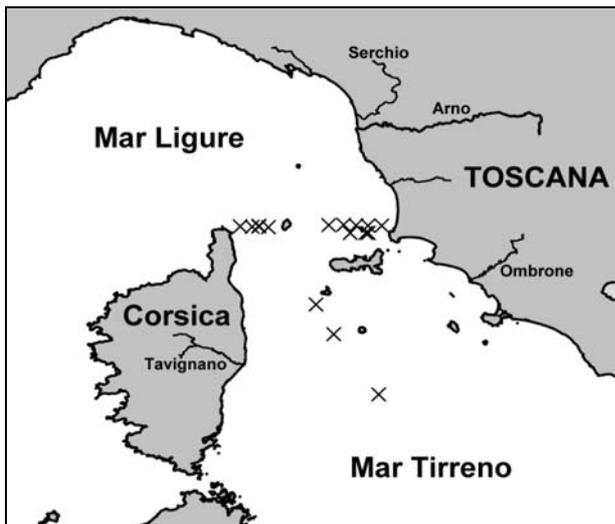


Figura 1 – Area di studio con indicate le stazioni di campionamento di clorofilla-*a*.

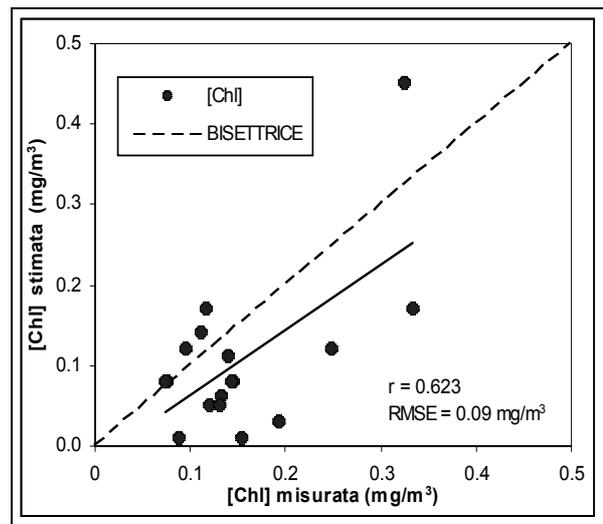


Figura 2 – Diagramma di dispersione dei valori di concentrazione di clorofilla-*a* misurati e quelli stimati dalla procedura descritta

Misure in mare di clorofilla (CHL)

I dati di concentrazione di clorofilla-*a*, raccolti in 17 stazioni di campionamento delle acque superficiali di largo tra maggio 2004 ed ottobre 2006, hanno permesso di validare il modello di stima delle concentrazioni dei costituenti marini a partire dalle riflettanze ottenute da dati satellitari MODIS Aqua contemporanei ai campionamenti nelle acque di largo. La misura della clorofilla è stata realizzata per via spettrofluorimetrica, come descritto in Lazzara et al., (1990) e modifiche successive (Lazzara et al., 1997).

Stime di CHL e SST da dati MODIS

Per la validazione del modello ottico, 4 immagini MODIS Aqua, di livello 2, simultanee ai 4 giorni di campionamento in mare sono state scaricate dal sito Ocean Color della NASA (oceancolor.gsfc.nasa.gov). Le immagini con risoluzione spaziale di 1 km circa contengono le radianze normalizzate (nLw) in 6 bande dello spettro del visibile. Le immagini sono state corrette geometricamente usando le informazioni geografiche contenute nei file hdf distribuiti dalla NASA. Partendo dalla radianza normalizzata (nLw), un prodotto standard dei dati MODIS, e dividendo per l'irradianza solare misurata al top dell'atmosfera relativa alle 6 bande spettrali del sensore MODIS Aqua si sono ricavate le riflettanze misurate da satellite. Infine, sono state estratte 17 firme spettrali dai pixel corrispondenti alle stazioni di campionamento.

Per ottenere la produzione primaria pelagica giornaliera dal modello qui proposto, sono state scaricate 7 immagini MODIS giornaliere nell'intervallo settimanale che contiene come quarto giorno della settimana quello di campionamento ed i dati di radianza normalizzata sono stati processati fino a ottenere le concentrazioni dei parametri ottici attivi, fra cui la clorofilla-*a*, tramite il modello ottico regionale. Le immagini delle concentrazioni dei costituenti marini ottenute sono state mascherate per la terra e la presenza di copertura nuvolosa utilizzando la flag OCEAN contenuta nei file hdf. Successivamente le 7 immagini sono state mediate per la presenza cospicua di pixel flaggati a causa di copertura nuvolosa e poi sottoposte ad un filtro cosmetico per eliminare le brusche variazioni di concentrazione dovute principalmente alla presenza di nuvole. Infine i prodotti finali sono stati degradati ad una maglia di 4 km circa.

Le riflettanze misurate da satellite sono state utilizzate per ottenere le concentrazioni [CHL], [SS] e [YS] tramite una procedura d'inversione di un modello semianalitico del colore del mare (Carder, 2003; Maselli et al., 2008). L'inversione è stata ottenuta utilizzando una tecnica di minimizzazione dell'errore tra misure di riflettanza e stime simulate dal modello. Il criterio di minimizzazione si

avvale di un algoritmo basato sul calcolo del coseno dell'angolo spettrale tra i vettori delle riflettanze stimate e di quelle simulate (*Spectral Angle Mapping*). Tale algoritmo è insensibile alle variazioni di ampiezza delle riflettanze misurate, che possono derivare da diversi fattori di disturbo (correzioni radiometriche ed atmosferiche non accurate, variabilità spaziale delle caratteristiche ottiche dei costituenti marini, ecc.).

In questo lavoro la procedura utilizzata per il calcolo delle concentrazioni dei parametri marini ed in particolare della clorofilla consente di identificare, a livello di ciascun pixel dell'immagine, il tipo di acqua (di largo o costiero) attribuendo opportuni intervalli di variazione dei parametri marini da stimare. Infatti, se le acque sono di caso 1, come quelle rappresentate dai campioni utilizzati in questo lavoro, mostrano bassi valori di clorofilla ed ancor più bassi valori di assorbimento di sostanza gialla e di sedimenti in sospensione. Viceversa, nelle acque di tipo costiero od in prossimità delle bocche fluviali si hanno concentrazioni dei costituenti marini molto più elevate (acque di caso 2).

Al fine di eseguire un confronto fra le concentrazioni di clorofilla-*a* ottenute dal modello ottico regionale ed i corrispondenti prodotti standard OC3M di livello 3, settimanali, con risoluzione di 4 km, anche questi ultimi sono stati scaricati dal sito Ocean Color per il periodo di studio.

Le immagini di livello 2 corrispondenti alla temperatura superficiale marina SST sono state elaborate fino a ottenere i valori settimanali di temperatura a una maglia di 4 km e confrontati con le immagini standard SST di 8 giorni, di livello 3 e con risoluzione di 4 km di lato.

Dati di radiazione fotosintetica (PAR)

La radiazione fotosintetica (PAR) è stata ottenuta da misure di radiazione solare globale. I dati di radiazione solare sono acquisiti, ogni 15 minuti dalle ore 00:00 alle ore 24:00, da 3 stazioni meteorologiche (Livorno, Piombino e Grosseto), archiviati in un database gestito dal LaMMA. La spazializzazione dei valori di PAR nell'area di studio è stata eseguita identificando le aree di influenza di ogni stazione meteo sulla base dei poligoni di Voronoi, mediante l'uso di un software GIS in commercio e di un algoritmo basato sull'inverso della distanza.

Calcolo della produzione primaria (PP)

Per valutare la produzione primaria pelagica giornaliera è stato utilizzato il modello semianalitico di Morel (1991). Il modello, che viene qui impiegato per la stima da dati satellitari della produzione primaria giornaliera ($\text{gC m}^{-2} \text{g}^{-1}$) lungo la colonna d'acqua fino alla profondità eufotica, rientra nella categoria dei *Wavelength Resolved Models* (WRMs). Unendo al modello di produzione di Morel, un modello atmosferico (Tanré et al., 1979) ed uno bio-ottico (Morel, 1988) si ottiene la stima della radiazione fotosintetica sulla superficie del mare e la sua attenuazione lungo la colonna d'acqua e, con una parametrizzazione dei principali processi fisiologici, si esegue il calcolo della produzione primaria partendo dalla distribuzione di biomassa algale. I principali *input* telerilevati utilizzati dal modello sono la concentrazione di clorofilla superficiale [CHL] e la temperatura superficiale del mare (SST), parametri ottenuti da dati MODIS. La temperatura superficiale del mare (SST), utilizzata insieme a profili di temperatura climatologici MODB (*Mediterranean Oceanic Data Base*) fornisce il profilo di temperatura nello strato eufotico.

La PAR, parametro essenziale per la stima della produzione primaria, essendo ricavata da misure *in situ* di radiazione solare globale non risente di eventuali errori legati alla applicazione di correzioni atmosferiche non appropriate, oltre a consentire una possibile valutazione della dinamica temporale. L'applicazione del modello avviene mediante l'esecuzione del programma PPCALC scritto in Fortran 77. Questo programma che necessita di un particolare file di *input* è in grado di lavorare solo su di un singolo pixel. L'estensione del processo di calcolo della produzione primaria, dal singolo pixel all'intera area di studio, avviene grazie all'utilizzo dello script Unix PPSAT appositamente ideato e scritto per questo tipo di utilizzo. Infatti, lo script Unix PPSAT partendo dai dati di clorofilla e temperatura superficiale telerilevati e dai dati di PAR delle tre stazioni meteo

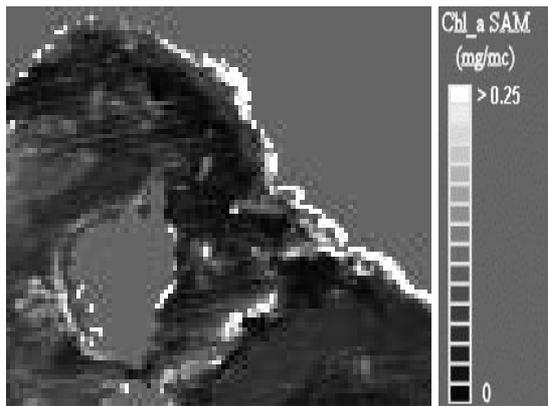


Figura 3 – Mappa CHL (settimanale) da modello ottico regionale

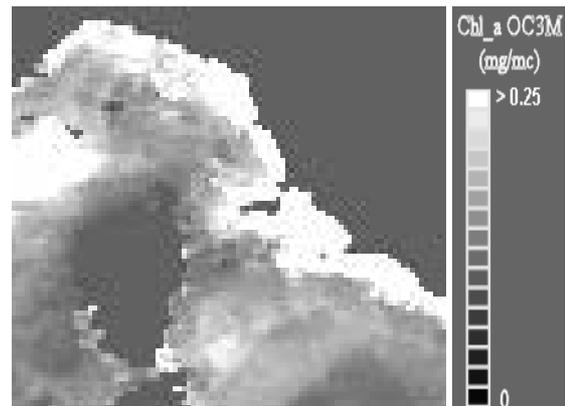


Figura 4 – Mappa CHL (8 giorni) da prodotto standard OC3M

LaMMA, utilizza reiteratamente il programma PPCALC per il calcolo della produzione primaria pelagica nell'area di studio.

Risultati e Conclusioni

Le stime di clorofilla-*a* ottenute dal modello ottico regionale sono confrontate con le corrispondenti misure raccolte a mare in Figura 2. In generale, si osserva una leggera sottostima dei valori di clorofilla ottenuti dal modello regionale per il *range* di valori misurati. Le concentrazioni medie su 8 giorni di clorofilla fornite dal modello ottico regionale e quelle ottenute dall'algoritmo OC3M sono mostrate in Figura 3 e 4. Come si può notare, le concentrazioni di clorofilla ottenute con il modello regionale, risultano quasi ovunque più basse di quelle ottenute dall'algoritmo OC3M, che è solito sovrastimare queste concentrazioni nel mare Toscano.

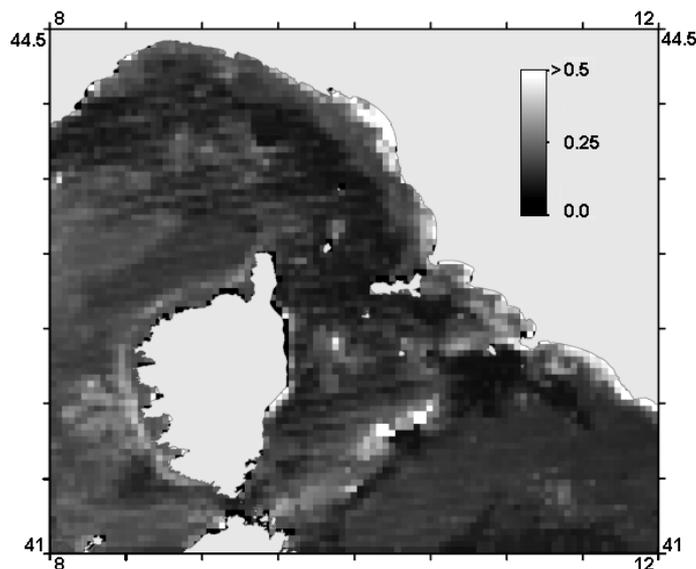


Figura 5 – Mappa di produzione primaria in $\text{gC m}^{-2} \text{g}^{-1}$ del 25-10-2006

Nella Figura 5 si riporta un esempio di mappa di produzione primaria giornaliera, prodotta dal modello qui presentato, per l'area in studio. Si osservano valori più elevati prevalentemente nelle acque neritiche continentali e a NE delle Bocche di Bonifacio. L'intera area esaminata presenta un valore medio (\pm ds) di $0.188 \text{ gCm}^{-2}\text{g}^{-1}$ (± 0.097) che, pur compatibile con recenti valori di letteratura (Bosc et al., 2004), è considerevolmente inferiore ai valori calcolati per il mese di ottobre con algoritmi standard quali VGPM ed Eppley, rispettivamente di 0.512 e $0.387 \text{ gCm}^{-2}\text{g}^{-1}$ (web.science.oregonstate.edu/ocean.productivity).

Questi risultati mostrano come la metodologia presentata possa essere utilizzata per il monitoraggio operativo della produzione primaria del mare Toscano. Ulteriori ricerche sono dirette a migliorare le stime delle variabili di *input* del modello ([CHL], PAR, SST, ecc.) e a validare le simulazioni di PP tramite confronto con informazioni a mare esistenti o raccolte specificamente.

Bibliografia

- Bosc E., Bricaud A., Antoine D., (2004), "Seasonal and interannual variability in algal biomass and primary production in the Mediterranean Sea, as derived from 4 years of SeaWiFS observations", *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1005, doi:10.1029/2003GB002034.
- Bricaud A., Bosc E. and Antoine D. (2002). "Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean Basin. Intercomparison of data from various satellite sensors, and implications for primary production estimates." *Remote Sensing of Environment* 81: 163-178.
- Carder K.L., Chen F.R., Lee Z., Hawes S.K., Cannizzaro J.P., (2003), *Case 2 Chlorophyll_a, Algorithm and Case 2 Absorption Coefficient Algorithm*, ATBD (MOD 19), Version 7, College of Marine Science, University of South Florida, 140 Seventh Avenue S. St. Petersburg, Florida 33701.
- Colella S., Santoleri R., (2008), *Variabilità interannuale della produzione primaria nel Mar Mediterraneo: 8 anni di osservazioni SeaWiFS*, in *Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR*, a cura di Bruno Carli, Giuseppe Cavarretta, Michele Colacino, Sandro Fuzzi, 525-528; pubblicazione su web: Daniela Beatrice (www.dta.cnr.it).
- Innamorati M., Lazzara L., Nuccio C., Mori G., Massi L. (1995) Nutrienti biomassa e produzione fitoplanctonica nell'Alto Tirreno toscano. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. serie A*, 102 (suppl.): 137-150.
- Lazzara L., Bianchi F., Falcucci M., Hull V., Modigh M. e Ribera D'Alcalà M. (1990) Pigmenti clorofilliani. *Nova Thalassia* 11 : 207-223.
- Lazzara L., Massi L., Nuccio C., Biondi N. e Innamorati M. (1997) Phytoplankton ecology: irradiance, particles, gilvin, pigments, absorption, fluorescence, production and species density in Terra Nova Bay, Ross Sea. *Nat. Progr. Ant. Res., ROSSMIZE 93-95, Data Rep., I* : 229-279.
- Lenzi Grillini C., Lazzara L., (1980), "Ciclo annuale del fitoplancton nelle acque costiere del Parco Naturale della Maremma, II. Flora e variazioni delle comunità," *Giorn. Bot. Ital.*, 114, 5, 199–215.
- Maselli F., Massi L., Pieri M., Santini C., (2008), "Spectral Angle Minimization for the Retrieval of Optically Active Seawater Constituents from MODIS Data", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (in stampa).
- Mobley C.D., (1994), *Light and Water. Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, San Diego, USA.
- Morel A., (1988), "Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 water)", *Journal of Geophysical Research*, 93, 10749–10768.
- Morel A., (1991), "Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications", *Prog. Oceanog.*, 2, 263–306.
- Morel A. e André J.M. (1991) "Pigment distribution and primary production in the Western Mediterranean as derived and modeled from Coastal Zone Color Scanner observations." *Journal of Geophysical Research* 96(C7): 12685-12698.
- Nardello I., Marcelli M., Lazzara L., (2003), "Stime di biomassa e produzione primaria nel canale di sicilia, attraverso misure di fluorescenza in vivo della clorofilla-a", in: Casagrandi R. & Melià P. (Eds.) *Ecologia. Atti del XIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia* [online] <http://www.xiiiicongresso.societaitalianaecologia.org/articles/Nardello-184.pdf>
- O'Reilly J.E., e 21 co-autori, (2000), *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses*, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, 49 pp.
- Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., De Lefte A., (1979), "Atmospheric modelling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties", *Applied Optics*, 18, 3587–3594.