

MOMAR: un progetto di monitoraggio delle acque marino-costiere tra il Mar Ligure e il Tirreno Nord-Occidentale.

B. Gozzini (*,**), C. Brandini (*,**), A. Ortolani (*,**), F. Maselli (*), C. Lapucci (*,**),
S. Melani (*,**), S. Couldray (***), N. Ganzin (***), A. Orlandi (*,**), M. Pieri (*),
M. Fattorini (*)

(*) IBIMET-CNR Via Madonna del Piano 10, 50019 – Sesto Fiorentino (FI). Tel. 055 44830, Fax 055 444083
e-mail gozzini@lamma.rete.toscana.it

(**) Consorzio LAMMA, Via Madonna del Piano 10, 50019 – Sesto Fiorentino (FI)

(***) IFREMER – Centre de Méditerranée, Toulon (FR)

Riassunto

Il monitoraggio operativo del mare si basa, oggi in maniera crescente, sull'integrazione di metodologie di osservazione remota con la modellistica oceanografica. In quest'ottica è stato realizzato, nel contesto del progetto europeo transfrontaliero MoMar, un sistema di monitoraggio delle acque nell'area marina di fronte alla Toscana (tra il mar Ligure e il Tirreno Settentrionale), che prevede sia attività di osservazione che l'utilizzo di modellistica a scala regionale. Le catene operative, che trattano i dati satellitari e li rendono disponibili alle altre applicazioni, forniscono attualmente i parametri di temperatura superficiale del mare e concentrazione di clorofilla. Quest'ultima è essenziale nella valutazione della qualità dell'acqua, delle sue caratteristiche trofiche, oltre ad essere un tracciante per l'idrodinamica. Sono inoltre descritti lo sviluppo del modello idrodinamico ROMS configurato a scala regionale, e le campagne osservative utilizzate per la calibrazione/verifica dei modelli e delle osservazioni remote.

Abstract

The main components of a marine monitoring system for the area between the Ligurian and the Northern Tyrrhenian Seas are shortly described. The system integrates observations and ocean models at a regional scale. The operational chain dealing with satellite data is mainly concentrated on the parameters of sea surface temperature and chlorophyll concentration. The latter is particularly important in the evaluation of water quality and trophic characteristics, besides being a tracer for the hydrodynamics. The development of the hydrodynamic model ROMS configured for the regional Tuscan sea is described, together with observational campaigns whose data are used for calibration and verification of models and remote observations.

Introduzione

Tradizionalmente il monitoraggio marino è stato svolto utilizzando dati rilevati *in situ*. I limiti di questo approccio sono ben noti, e comprendono la rappresentatività spaziale e temporale dei dati e i costi elevati dei rilievi in mare. Le misure *in-situ*, pur restando una fonte insostituibile di informazioni, e in ogni caso la più affidabile, devono essere completate dall'utilizzo integrato delle altre fonti di informazione disponibili, le principali delle quali sono la modellistica e il telerilevamento. Queste metodologie appaiono infatti oggi intrinsecamente collegate tra loro, nel senso che ognuna di esse trae il massimo beneficio dalla conoscenza congiunta delle altre. Così le misure satellitari hanno bisogno di essere completate, come informazione spazio-temporale, dai risultati della modellistica, e necessitano di dati *in situ* per la calibrazione e la validazione dei prodotti. A loro volta le misure *in situ* possono essere spazializzate attraverso l'uso congiunto delle

altre due metodologie, ma anche più opportunamente programmate in base alla variabilità spazio-temporale dei parametri da analizzare valutata dalla modellistica (nell'ottica di massimizzare le informazioni e di ridurre i costi di misura). Infine i modelli numerici richiedono un uso intensivo sia delle immagini satellitari che delle misure *in situ* per la calibrazione e la verifica dei modelli, ma anche per l'assimilazione dinamica dei parametri misurati in modo continuo.

La stima dei valori dei parametri oceanografici e ambientali alle scale marino-costiere, che sono centrali per gli obiettivi che il monitoraggio si propone, richiede uno sforzo notevole per l'acquisizione di dati a risoluzione sufficiente per la descrizione di dinamiche di dettaglio (quali ad esempio le strutture di circolazione costiera e in prossimità delle foci fluviali, pennacchi, upwelling, ecc.). Il limite degli attuali prodotti disponibili per la cosiddetta oceanografia operativa, che sono definiti su larga scala, è quello di non avere ancora un dettaglio sufficiente per la descrizione di queste dinamiche, che necessariamente richiedono una conoscenza "locale", pienamente realizzabile solo tramite studi specifici che comprendano la raccolta dei dati di maggior interesse, la pianificazione delle misure, la definizione degli obiettivi e dei principali problemi.

Il monitoraggio a scala regionale richiede un approccio integrato, ovvero la realizzazione di un sistema di osservazione e previsione nella forma di un processo dinamico, multidisciplinare, interattivo e collaborativo tra le diverse regioni. La creazione di uno strumento di monitoraggio condiviso tra quattro regioni marittime (Toscana, Corsica, Sardegna e Liguria) è il principale obiettivo del progetto europeo di cooperazione transfrontaliera MoMar (sistema integrato per il MONitoraggio e il controllo dell'ambiente MARino - www.mo-mar.net), il cui capofila è la Regione Toscana.

In questo lavoro viene illustrato brevemente il contributo scientifico del LAMMA, Consorzio tra Regione e CNR, al progetto MoMar, in termini di costruzione di un sistema di monitoraggio integrato basato sulle osservazioni (remote e *in situ*) e sulla modellistica.

Gli strumenti

L'osservazione remota della superficie del mare è oggi un ingrediente essenziale nella costituzione di sistemi di monitoraggio marino. I problemi intrinseci legati all'uso dei singoli satelliti (tempo di rivisitazione, risoluzione) sono parzialmente superabili tramite l'uso congiunto di dati da più piattaforme. In particolare, l'uso dei satelliti geostazionari fornisce una stima, pur a medio-bassa risoluzione, della variabilità spaziale e temporale dei parametri di interesse oceanografico (in questo caso, la temperatura superficiale del mare o SST), mentre alcuni satelliti polari non consentono di valutare correttamente la dinamica temporale ma permettono una stima della variabilità spaziale a risoluzione ben più elevata. Per disporre di strumenti di valutazione operativi dei parametri di superficie (in particolare per quelli otticamente attivi), occorre inoltre distinguere due esigenze:

1. valutare il valore effettivo dei parametri misurati, con l'obiettivo di fornire stime, dirette o indirette, quantitativamente corrette, di grandezze importanti a livello biogeochimico (quali il fitoplancton, lo zooplancton, la produttività primaria ecc.),
2. valutare la dinamica temporale dei processi oceanografici e biogeochimici nell'area di interesse, al fine di migliorare la comprensione di questi processi a scala regionale e costiera e di costituire le basi per la realizzazione di un modello previsionale operativo.

La realizzazione del primo obiettivo passa attraverso l'utilizzo di algoritmi, opportunamente calibrati, che forniscono stime accurate dei valori puntuali su un'area, mentre la realizzazione del secondo si accompagna strettamente alle esigenze della modellistica, dato che permette la stima della variabilità spaziale e temporale delle strutture di circolazione oceanografica e marino costiera, dell'interazione con gli apporti fluviali, ecc. Nell'ambito del progetto il lavoro sulle singole componenti del sistema di monitoraggio è pertanto svolto nell'ottica di massimizzare il contributo dei singoli metodi utilizzati, che nel seguito vengono brevemente dettagliati:

Telerilevamento da satellite

Il telerilevamento del colore del mare è basato sullo studio delle proprietà di riflessione dei principali costituenti otticamente attivi dell'acqua di mare: fitoplancton (PH), la cui concentrazione è generalmente stimata tramite la clorofilla-a (CHL), particolato non-algale (NAP), che, nelle acque costiere, è per lo più rappresentato da sedimenti in sospensione (SS); sostanza organica disciolta colorata (CDOM), anche chiamata sostanza gialla (YS). Nelle acque poco profonde anche le proprietà ottiche dei fondali e del benthos possono svolgere un ruolo importante.

Nella stima della concentrazione di clorofilla-a (il pigmento fotosintetico principale del fitoplancton), vari algoritmi semi-analitici globali del colore sono stati proposti ed applicati con discreto successo. Le prestazioni dei metodi di stima basata su questi algoritmi sono generalmente buone per le acque oceaniche profonde (caso 1), le cui proprietà ottiche sono determinate principalmente dal fitoplancton, ma sono peggiori nelle acque otticamente complesse (caso 2), dove le concentrazioni di sedimenti e sostanza gialla sono normalmente significative e indipendenti dal fitoplancton.

La base di molti algoritmi esistenti per la stima delle clorofilla-a è l'algoritmo OC3, sviluppato dalla NASA. L'algoritmo è valido a livello globale per le acque di caso 1. La clorofilla-a di superficie così stimata corrisponde sostanzialmente al contenuto medio di clorofilla all'interno dello strato superficiale, definito dalla prima profondità ottica.

Il Mar Mediterraneo rappresenta uno dei casi significativi in cui è stata evidenziata la necessità di migliorare gli algoritmi per il telerilevamento del colore del mare. Questa necessità è stata confermata da recenti investigazioni nel mare della Toscana, dove si è dimostrato come i prodotti MODIS standard tendano a sovrastimare la concentrazione di clorofilla e sostanza gialla, mentre sottostimino la concentrazione di solidi sospesi (Maselli et al., 2009). Nel progetto vengono presi in esame altri algoritmi, ovvero:

1. MedOC3 (Santoleri et al., 2008), algoritmo bio-ottico empirico, elaborazione dell'algoritmo OC3 ricalibrata su misure di clorofilla del Mediterraneo;
2. OC5 (Gohin et al., 2002), che deriva anch'esso dall'algoritmo globale OC3, ma valido sia per acque di caso 1 che di caso 2, e per dati satellitari sia MODIS che MERIS, calibrato però su misure di clorofilla relative al Canale della Manica.

A questi verrà affiancato anche il confronto con i prodotti standard di clorofilla forniti da ESA relativamente ai dati MERIS per le acque di Caso 1 e 2.

All'interno del progetto la parte di elaborazione dei dati MERIS è principalmente a carico di IFREMER, mentre i dati MODIS di livello 2 vengono raccolti, analizzati e archiviati dal LAMMA. L'elaborazione viene eseguita utilizzando il SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS). L'algoritmo MedOC3 viene già operativamente applicato e il campo clorofilla è rimappato a 1 km di risoluzione spaziale sull'intera area del Mediterraneo (un dettaglio è illustrato in Figura 1). Medie di 8 giorni sono disponibili sul sito web <http://www.lamma.rete.toscana.it/ita/teleril/mare/index.html>.

Alcune elaborazioni di test sono già state realizzate anche con OC5 sugli stessi prodotti MODIS.

Alcuni dei problemi che affliggono le stime ottenibili dalle immagini satellitari dei costituenti otticamente attivi, dovute a inaccuratezza nelle correzioni radiometriche e atmosferiche apportate alle immagini stesse, introducono infatti notevoli variazioni in ampiezza dei valori di riflettanza misurati. Per migliorare la stima dei costituenti otticamente attivi nell'area in esame, una parte del gruppo di lavoro (Maselli et al., 2009) ha contribuito a sviluppare e testare un nuovo algoritmo. Il nuovo algoritmo è stato calibrato sulle acque costiere toscane ed applicato ad immagini MODIS delle piattaforme Terra e Aqua. È in corso d'opera l'estensione di tale algoritmo a tutte le acque di interesse del progetto.

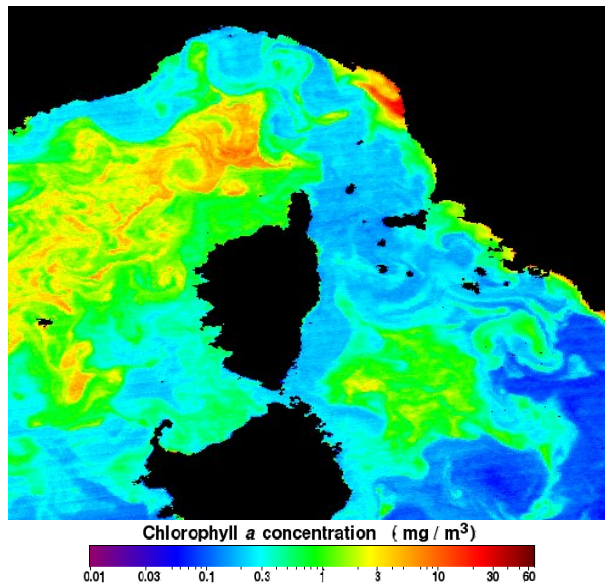


Figura 1 – Concentrazione di clorofilla-a nell'area Ligure, Nord-Tirreno d'interesse del progetto MOMAR, ottenuta dai dati MODIS elaborati con l'algoritmo MedOC3, dove si evidenziano la presenza delle fioriture algali e la scala delle strutture idrodinamiche (17 Marzo 2009).

Infine è ormai acquisita, presso il LAMMA, una serie di procedure per la determinazione della temperatura superficiale del mare (SST) tramite Meteosat (MSG), che permette di completare e ampliare le informazioni sulla SST provenienti dai satelliti polari (ad es. AVHRR). Le procedure di acquisizione della SST in tempo quasi reale, operative presso il LAMMA (Melani et al., 2007), si basano su un algoritmo che utilizza una tecnica di tipo *split-window* non lineare nei canali dell'infrarosso termico, centrati a 11.0 e 12.0 μ m. Il calcolo viene effettuato, nell'area mediterranea, su base oraria, e i risultati sono disponibili presso il sito web del LAMMA (http://www.lamma.rete.toscana.it/previ/eng/sst_msg.html).

Modellistica

Nell'ottica di sviluppare un sistema di analisi e previsione per la stima delle correnti a scala regionale, è stata implementata una versione aggiornata del modello ROMS a scala regionale. ROMS (Regional Ocean Modeling System) risolve le equazioni primitive del moto a superficie libera (Shchepetkin e McWilliams, 2004) utilizzando un sistema di coordinate verticali generalizzato. Nell'implementazione del modello sono stati testati vari schemi sia per la turbolenza verticale, sia per la stima dei flussi turbolenti di superficie. Le forzanti atmosferiche sono ricavate dal modello meteorologico WRF, operativo presso il LAMMA.

L'implementazione di un modello regionale con l'ambizione di fornire dati per il monitoraggio operativo, presuppone di avere a disposizione dati di contorno continuamente aggiornati. I dati vengono forniti dal servizio operativo Previmer di IFREMER, che utilizza un modello ad alta risoluzione (1200 m) sul Mediterraneo Occidentale (MENOR), basato sul codice MARS3D sviluppato da IFREMER stesso.

Sono state sperimentate, tramite ROMS, varie configurazioni per lo studio di sensitività ai vari parametri. La configurazione prevista per l'operatività ha una risoluzione di 400 m e 30 livelli verticali, che si ritiene adeguata alla rappresentazione di dinamiche alla sub-mesoscala, che hanno un'importanza fondamentale anche per gli effetti sui flussi biogeochimici locali.

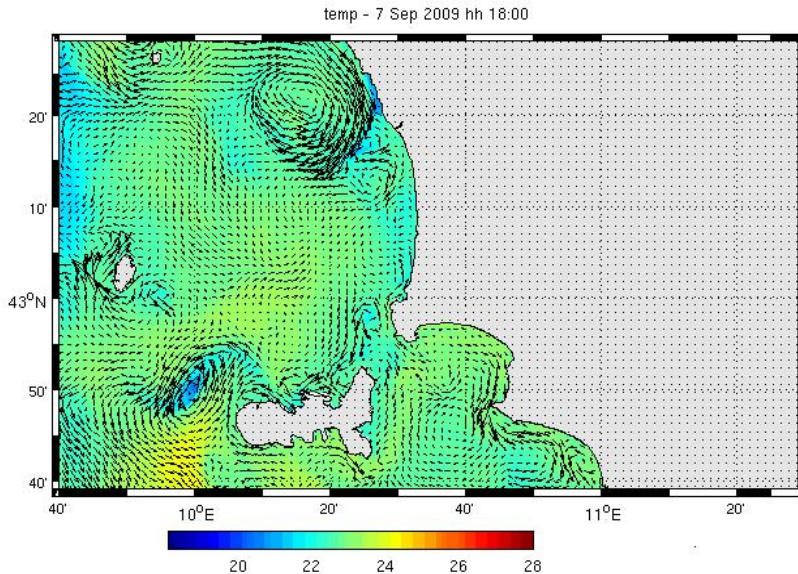


Figura 2 – Mappa di correnti e temperatura superficiale del mare (a nord dell’Elba) calcolata dal modello ROMS alla risoluzione di 400 m in cui si evidenziano la presenza di strutture di circolazione a mesoscala e sub-mesoscala.

Misure *in situ*

Specifiche campagne di misura sono state pianificate all’interno del progetto con l’obiettivo di fornire dati per la calibrazione e la verifica dei dati telerilevati e di quelli modellati. Una serie di misure utili per la caratterizzazione idrodinamica, sono state realizzate con IFREMER, ovvero:

- campagne di misura della corrente marina lungo transetti, tramite la tecnica dell’ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) trainato da un’imbarcazione;
- lancio di boe derivanti (o *drifter*) per lo studio della circolazione nell’area di interesse.

E’ stata inoltre pianificata la futura attività di misura che comprenderà sia l’esecuzione di nuove misure correntometriche, sia il lancio di nuovi *drifter*, sia ulteriori specifiche campagne oceanografiche (anche centrate su parametri di qualità dell’acqua ed eco tossicologici) da realizzare nell’ambito di MoMar.

Discussione

L’adattamento di algoritmi alle specifiche situazioni locali, massimizza la significatività dei dati provenienti dal telerilevamento, dalle misure *in situ* e dalla modellistica.

I risultati delle elaborazioni attraverso il nuovo algoritmo di stima della clorofilla, confrontati con quelli degli algoritmi “tradizionali”, mostrano localmente, rispetto ai metodi esistenti, un miglioramento significativo nei casi in cui le variazioni di ampiezza spettrale del segnale contengono molto rumore e danno poche informazioni sulla concentrazione dei costituenti otticamente attivi (Maselli et al. 2009). Questa situazione è piuttosto comune nelle acque di Caso 1, in cui gli effetti di interazioni complesse tra i principali costituenti otticamente attivi si sommano agli effetti di inaccuratezza delle correzioni atmosferiche applicate.

Al di là delle migliorate stime quantitative ottenibili tramite il miglioramento delle procedure di calcolo, l’utilizzo di immagini di clorofilla ad alta risoluzione mostra una variabilità spaziale e temporale legata, oltre che alle dinamiche biogeochimiche specifiche, alla stessa variabilità idrodinamica, che segnala la presenza di strutture di circolazione a mesoscala e submesoscala. In questo senso l’utilizzo di immagini ottiche completa le informazioni sulle strutture idrodinamiche a

scala regionale e costiera, ottenibili principalmente attraverso i modelli oceanografici. Alla risoluzione utilizzata, il modello permette infatti la ricostruzione (e, in futuro, la previsione) della corrente marina, della temperatura e della salinità su tutta la colonna d'acqua e per tutto il dominio in esame. In Figura 2 è evidenziata una mappa di corrente e temperatura del modello, in cui si mostra la presenza di queste strutture di circolazione. Il modello soffre ancora di alcuni errori legati all'estrema sensibilità alla forzante radiativa, determinata in gran parte dalla SST. In questo senso ci si attende che l'utilizzo dei dati del satellite MSG, potendo fornire dati di evoluzione temporale di dettaglio, possa permettere di migliorare significativamente la valutazione dei flussi effettivamente scambiati tra atmosfera e mare.

Nel quadro della costruzione di una piattaforma integrata di monitoraggio è inoltre previsto il completamento del modello oceanografico tramite un modello biogeochimico basato sullo schema NPDZ (Nitrogen-Phytoplankton-Detritus-Zooplankton). Il modello permetterà di integrare, pur all'interno di uno schema necessariamente semplificato, la gran parte delle misure disponibili tramite le istituzioni regionali e le campagne di misura scientifiche previste all'interno di MoMar.

Conclusioni

Sono state descritte le componenti di un sistema, ancora prototipale, per il monitoraggio delle acque marine nel mare regionale toscano. Il sistema comprende sia componenti osservative che modelli numerici. Le osservazioni satellitari di clorofilla e SST sono state implementate e in parte sono già operative e visualizzabili presso il sito web del LAMMA. È stato implementato un modello oceanografico regionale, ad alta risoluzione, che consente già la valutazione della variabilità idrodinamica dell'area. Questo modello legge le condizioni iniziali e al contorno da un modello operativo esterno, fornito da IFREMER. Dato che i futuri modelli biogeochimici dell'area richiedono stime quantitativamente accettabili della concentrazione dei costituenti di base, un nuovo algoritmo locale di stima della clorofilla, calibrato sulle acque costiere toscane, è in corso di estensione a tutta l'area in esame. Le campagne di misura *in situ* si rivelano essenziali per la calibrazione e verifica sia delle misure satellitari, sia della modellistica idrodinamica, in una logica di massima integrazione tra tutti i dati disponibili.

Bibliografia

- Gohin, F., Druon, J. N., Lampert, L. (2002), "A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters". *Int. J. Remote Sens.* 23 (8): 1639-1661.
- Maselli F., Massi L., Pieri M., Santini C. (2009), "Spectral Angle Minimization for the Retrieval of Optically Active Seawater Constituents from MODIS Data", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75 (5): 595-605.
- Melani S., Orlandi A. Brandini C., Ortolani A. (2007), "Temperatura Superficiale del Mare da dati satellitari". In: *Clima e Cambiamenti Climatici - Le attività di ricerca del CNR*, B. Carli, G. Cavarretta, M. Colacino, and S. Fuzzi, Eds., CNR, ISBN 978-88-8080-075-0: 333-336.
- Santoleri R., Volpe G., Marullo S., Buongiorno Nardelli B. (2008), "Open waters optical remote sensing of the Mediterranean Seas", *Remote sensing of the European Seas*, Springer Netherlands: 103-116.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C. (2004), "The Regional Oceanic Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model", *Ocean Modelling*, 9: 347-404.