

Previsioni meteomarine e oceanografiche a supporto della sicurezza nella balneazione

Carlo Brandini^{1,2}, Bartolomeo Doronzo¹, Stefano Taddei¹, Valentina Vannucchi^{1,2}, Massimo Perna¹,
Chiara Lapucci¹, Andrea Orlandi¹, Giovanni Vitale^{1,2}

¹Consorzio LaMMA e Consiglio Nazionale delle Ricerche, Via Madonna del Piano 10, 50125 Firenze.

²GNRAC - Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero

Email: brandini@lamma.rete.toscana.it

Riassunto

Un numero crescente di servizi previsionali sono orientati a fornire informazioni sullo stato del mare con sempre maggior dettaglio: previsioni più precise a scala locale, meno incerte, valide su un orizzonte temporale più lungo che in passato, e con la capacità di fornire un maggior numero di parametri ambientali non limitato solo agli aspetti fisici (moto ondoso, correnti, temperatura, ecc.), ma anche di qualità ambientale (inquinamento di origine antropica, fioriture di specie algali pericolose ecc.). A fronte degli ormai consolidati servizi di meteorologia marina, si stanno sviluppando nuovi servizi di oceanografia operativa che sono oggi possibili anche grazie alle nuove tecnologie, quali i satelliti e l'implementazione di sistemi, di osservazione e previsione meteo-oceanografica a larga scala, che in Europa sono stati definiti tramite il programma Copernicus.

Da questi servizi a larga scala è possibile, utilizzando informazioni disponibili a livello locale, definire dei servizi a scala di dettaglio che sono molto utili per la gestione della fascia costiera, soprattutto in termini di sicurezza. Vengono qui proposte due potenziali applicazioni. La prima è l'applicazione di un modello di previsione costiera per determinare l'idrodinamica di dettaglio a scala litoranea, e che può essere usata per derivare indicazioni sul rischio da rip current direttamente in base alle condizioni meteorologiche previste. La seconda applicazione riguarda il possibile utilizzo di parametri di osservazione remota a scala costiera per la previsione delle fioriture di specie algali pericolose.

Parole chiave: previsioni meteomarine, previsioni costiere, oceanografia operativa, rip current, balneazione, fioriture algali pericolose.

Abstract

A growing number of forecasting services are aimed at providing information on the sea state with increasingly greater details. This means: more precise forecasts at a local scale, less uncertainty, forecasts valid on a longer time horizon than in the past, and with the ability to provide a greater number of environmental parameters and not limited to physical aspects (waves, currents, temperature, etc.), but also data of environmental quality (organic pollutants, blooms of dangerous algal species, etc.).

In the face of the consolidated marine meteorological services, new operational oceanography services are being developed that are now possible thanks to new technologies, such as satellites and through the implementation of new integrated observation and forecasting systems. At a large scale, these services in Europe have been defined through the Copernicus program (and particularly through the Copernicus Marine Service CMEMS).

From such large-scale services it is possible, using information available at the local level, to define more detailed local services that are very useful for coastal management, especially in terms of safety. Here we propose two potential applications. The first is the application of a coastal forecasting model to determine the hydrodynamic detail on a coastal scale, and which can be used to derive information on the risk of rip currents directly based on the

meteorological forecast . The second application concerns the possible use of earth observation parameters along the coast for the prediction of the harmful algal blooms.

Keywords: *metocean forecast, coastal forecast, operational oceanography, rip currents, bathing, harmful algal blooms.*

Premessa

La capacità di prevedere le condizioni fisiche del mare in prossimità della fascia costiera è cresciuta negli ultimi anni, grazie soprattutto allo sviluppo di sistemi previsione avanzata a loro volta basati su modelli di simulazione numerica. La richiesta di dati previsionali è d'altra parte un'esigenza di tanti operatori che ne hanno bisogno per la pianificazione delle attività costiere, incluse quelle portuali o cantieristiche, o anche a scopo ludico e ricreativo. La fruizione della costa da parte di una ampia platea di cittadini e lavoratori pone ovviamente anche problemi di sicurezza, legati alle potenziali situazioni di pericolo che possono comportare rischi per la vita umana o la salute.

Queste situazioni sono ben note, comprendono il rischio associato alla balneazione durante le mareggiate, il rischio legato alle correnti di ritorno o rip current, oppure i rischi per la salute associati all'inquinamento di origine antropica o naturale. Tuttavia la capacità effettiva di prevedere l'insorgenza di molte situazioni di potenziale pericolo, con un sufficiente anticipo e in modo affidabile, è tutt'altro che scontata.

Un numero crescente di utenti accede a informazioni provenienti da servizi di previsione che comprendono oggi la previsione meteorologica tradizionale, le previsioni meteomarine e, in alcuni casi, anche la previsione di alcuni parametri specifici dello stato e della qualità delle acque marine quali correnti, temperatura del mare o, quando disponibili, le concentrazioni di contaminanti di origine antropica o naturale. Queste informazioni, pubblicate in forma di bollettini dedicati, mappe, tabelle, meteogrammi, sono utilizzate per informare e, se necessario, anche allertare la popolazione, evidenziando situazioni di potenziale pericolo.

Nonostante l'affidabilità di queste previsioni sia migliorata negli ultimi anni, grazie al miglioramento di alcune componenti essenziali dei sistemi previsionali, quali i progressi nella modellistica, nelle risorse di calcolo a disposizione o nei dati di osservazione forniti dagli strumenti di rilevamento quali ad esempio i satelliti, esistono molti elementi di incertezza associati alle previsioni. Se si può sapere con un certo preavviso che una mareggiata interesserà un tratto costiero, che impatto avrà questa mareggiata in un dato paraggio e quali sono potenziali pericoli associati? Oppure, in una data situazione meteo, con che probabilità si può avere un temporale o il potenziale alluvionamento in una certa area costiera? In quali situazioni si può verificare l'insorgere di rip current e con quale attendibilità siamo in grado di prevederle? In quali situazioni si manifesteranno condizioni favorevoli all'inquinamento microbiologico delle acque di balneazione o allo sviluppo di fioriture algali pericolose? Per quanto si stiano facendo grossi progressi per fornire previsioni più puntuali e precise, è fondamentale riconoscere che una parte importante di questa incertezza è intrinseca, ovvero legata all'incertezza stessa della previsione.

I sistemi meteorologici ed oceanografici sono infatti difficili da prevedere, hanno una complessità caratteristica per cui è stata riconosciuta dalla scienza la loro natura caotica. Questa espressione assume oggi un significato scientifico ed una connotazione ben precisa: in pratica, la conoscenza di un sistema meteorologico dipende fortemente dalla conoscenza più precisa possibile dello stato iniziale del sistema, e anche una piccola deviazione da questo stato, dopo un certo periodo di tempo, tende ad allargarsi. Di conseguenza, due stati iniziali quasi simili, possono, nella successiva previsione numerica, portare a due situazioni completamente differenti, nel giro di ore o giorni. Questa caratteristica dei sistemi complessi si chiama "dipendenza dalle condizioni iniziali", e rappresenta una delle principali fonti d'incertezza (peraltro non l'unica) di un sistema di previsione.

Un'altra componente di questa incertezza è dovuta alla non completa conoscenza del modo con cui sulla costa si manifestano le conseguenze di sistemi meteorologici su ampia scala.

È infatti difficile prevedere l'evoluzione dinamica di un ambiente complesso in cui non bisogna solo tenere conto delle interazioni fra oceano e atmosfera, già di per sé difficili da trattare, ma anche delle interazioni di questi due componenti con la terra solida. Questo tipo d'incertezza può essere ridotta tramite l'applicazione di metodi e modelli più performanti per risolvere l'idrodinamica costiera. A scala costiera o litoranea è inoltre fondamentale la conoscenza della morfologia e delle caratteristiche del fondale, di cui non sempre si hanno a disposizione dati recenti e accurati.

Infine, ci sono effetti legati all'evoluzione del clima, che in una fase di cambiamento globale, possono essere associati all'incertezza sull'intensità con cui si manifestano alcuni fenomeni estremi.

La sequenza di eventi alluvionali che hanno colpito le coste del Mediterraneo Nord-Occidentale negli ultimi anni è particolarmente impressionante ed è dovuta a molti fattori che in parte comprendono le caratteristiche specifiche della costa stessa, in parte sono dovute anche ai fenomeni di cambiamento globale, quali l'innalzamento della temperatura media del mare o i cambiamenti dei regimi di circolazione.

Previsione di moto ondoso nella fascia costiera

I primi modelli di previsione dello Stato del mare risalgono agli anni 40, quando proprio nell'organizzare le operazioni di sbarco in Normandia, gli americani si avvalsero del contributo fornito dai modelli di previsione sviluppati da scienziati quali Sverdrup e Munk.

Quindi proprio all'interno di una gigantesca operazione per salvare più vite umane possibili, furono elaborati molti dei principi di modellazione che sono stati poi ripresi nei decenni successivi stimolando lo sviluppo di modelli previsionali che, a partire dalla conoscenza del vento, simulano i meccanismi attraverso cui il vento trasferisce la propria energia al mare nella forma di onde di superficie. I modelli oggi utilizzati risolvono le equazioni di bilancio dell'energia del moto ondoso che a loro volta includono i processi attraverso cui le onde sono generate, propagate nello spazio anche per lunghe distanze, le interazioni tra le onde stesse, e la dissipazione dell'energia del moto ondoso sia in mare aperto sia lungo la costa. Infatti, la fonte principale di dissipazione del moto ondoso sono proprio le coste dove gran parte dell'energia delle onde viene dissipata per interazione con i bassi fondali e in parte assorbita dai litorali.

I modelli di previsione del moto ondoso sono tra i modelli meno incerti tra quelli utilizzati nel campo della geofluidodinamica e, in generale, la principale fonte di errore questi modelli è costituita proprio dalla inaccuratezza nella previsione del vento.

Esistono oggi molti servizi di previsione meteomarina attivi nel Mediterraneo, che forniscono prodotti quali bollettini e mappe.

È molto importante che i modelli di previsione del moto ondoso utilizzino una forzante atmosferica (ovvero, dati di previsione del vento) di buona qualità.

Nel far questo, vengono utilizzati, a monte, modelli di previsione meteorologica ad area limitata (Limited Area Models o LAM) che, a loro volta hanno bisogno di opportune condizioni iniziali e di condizioni al contorno. Questi dati a loro volta provengono da modelli a scala globale, quali il modello globale GFS (Global Forecasting System) del principale servizio americano fornito dal NOAA, o il modello globale dell'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) che rappresenta il più importante ed affidabile riferimento per le previsioni meteorologiche in Europa.

Il Consorzio LaMMA fornisce da oltre 15 anni un servizio meteomarina, per la previsione dello stato del mare. Il canale principale attraverso cui vengono fornite le informazioni è il sito web del LaMMA www.lamma.rete.toscana.it. Attualmente le previsioni meteomarine del LaMMA hanno una risoluzione di circa 10 km su un'area ampia estesa a tutto il Mediterraneo, e fino a 3 km nell'area del Mediterraneo Nord-Occidentale (Mar Ligure e Nord Tirreno).

La previsione del moto ondoso è realizzata utilizzando il modello WW3 (WaveWatch III), un modello sviluppato a partire dalla fine degli anni '90. In altri centri di previsione meteo sono utilizzati anche altri modelli quali WAM (il primo) e SWAN, quest'ultimo modello nato soprattutto per risolvere le scale costiere. Come forzante meteo, vengono utilizzati i modelli WRF di previsione atmosferica (con risoluzione fino a 3 km) o anche i modelli sviluppati in Italia quali BOLAM e MOLOCH. In Figura 1 è riportata, come esempio, una delle mappe fornite dal LaMMA e riferita al 25 Agosto 2018. Le cronache riportano, in quelle ore, la morte di un uomo nei pressi di San Vincenzo, in condizioni proibitive per la balneazione a causa della forza del mare e delle intense correnti generate dalle onde. In questa circostanza, come in molte altre simili, le previsioni forniscono correttamente il quadro generale relativo allo stato dell'atmosfera e del mare, e certamente non è intervenendo sul miglioramento della capacità previsionale che si può pensare di ridurre questo tipo di rischio, quanto piuttosto sulla consapevolezza dei pericoli.

La qualità di una buona previsione meteomarina si può misurare soprattutto in termini di affidabilità, ovvero della capacità di prevedere un dato fenomeno, quali l'intensità e gli effetti di una mareggiata su un dato tratto costiero, con un sufficiente anticipo (non meno di 3-5 giorni).

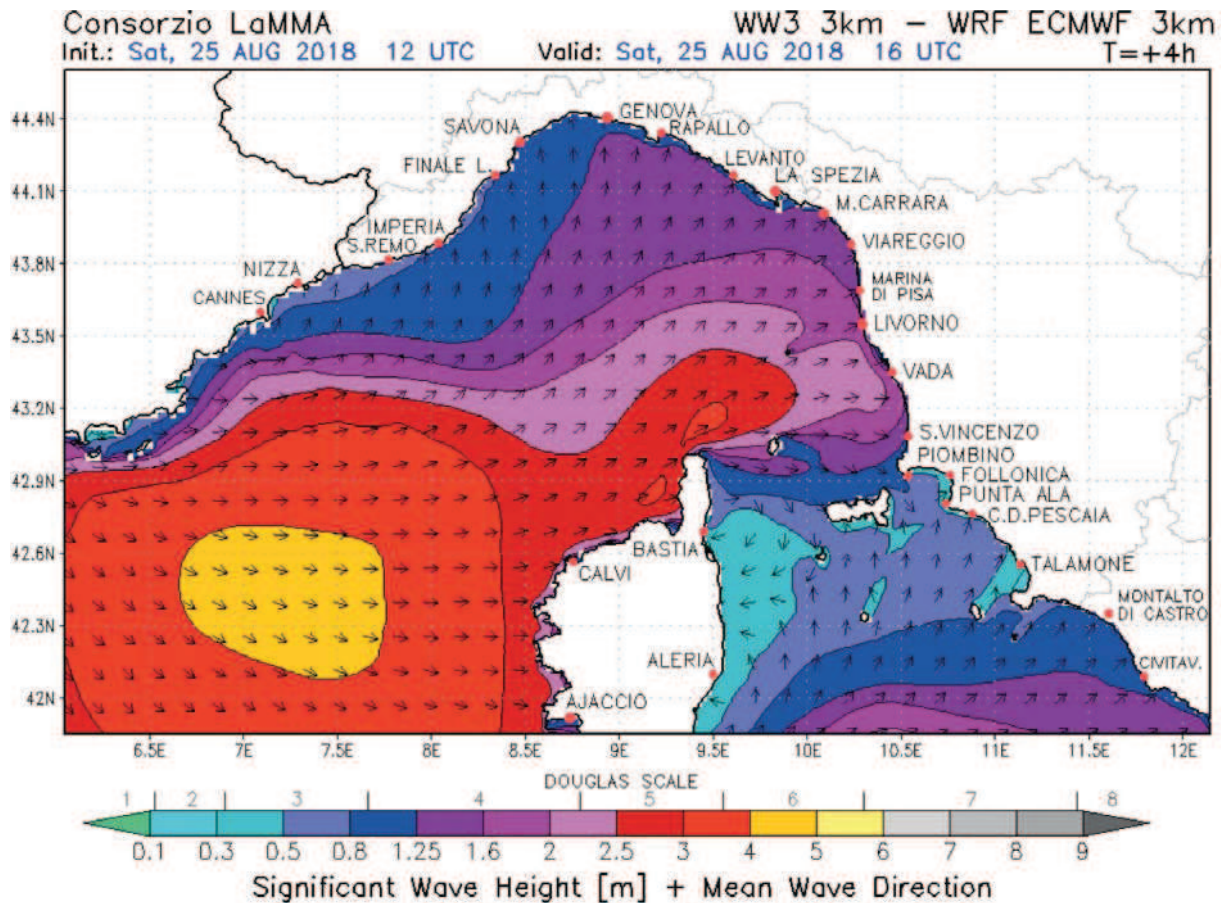


Figura 1. Esempio di mappa di previsione del moto ondoso prodotta dal Consorzio LaMMA, valida per le ore 16 UTC del 25 Agosto 2018.

Parlando di sicurezza, è anche importante il dettaglio con cui viene fornita la previsione: a scala locale, vicino alla costa avvengono infatti molti processi fondamentali, quali rifrazione, frangimento, diffrazione, riflessione delle onde o la trasmissione dovuta alla presenza di ostacoli, ad esempio barriere. Questi fenomeni di solito non sono risolti da parte dei modelli di previsione meteomarina ed è quindi necessario, quando si vuole arrivare ad un livello di dettaglio molto spinto, utilizzare dei modelli appositi che girano in cascata ai modelli di propagazione delle onde a larga scala. Modelli di questo tipo sono utilizzati per valutare, ad esempio, l'impatto delle mareggiate sulla costa, ma anche l'insorgere di specifiche condizioni idrodinamiche che regolano appunto l'insorgere di rip current.

Sistemi di previsione idrodinamica delle acque costiere e delle situazioni di potenziale pericolo: possibilità e limiti

La maggior parte dei fenomeni idrodinamici d'interesse nelle acque costiere sono caratterizzati dall'interazione tra forzanti atmosferiche e oceanografiche quali vento, pressione atmosferica, marea, e l'azione del moto ondoso a scala litoranea, in particolare all'interno della zona dei frangenti (surf zone).

Per modellare queste interazioni è necessario utilizzare modelli di simulazione accoppiata onda-correnti. In pratica le onde, in acque litoranee, trasferiscono una parte dell'energia alle correnti a scala litoranea che possono avere sia componenti dirette in senso parallelo alla linea di riva (la classica corrente long-shore), sia ortogonalmente a questa (componente cross-shore).

È noto come, in alcune situazioni, si possano formare correnti di ritorno, o di risacca, o rip current, che hanno prevalentemente componenti in senso cross-shore, e possono essere estremamente pericolose. Si tratta di correnti a getto che si originano surf zone e possono manifestarsi in diversi tipi di spiaggia durante diverse

condizioni di moto ondoso e di marea. Tali correnti si estendono tipicamente dalla riva verso il largo, oltre la riva dei frangenti, e presentano due regimi idrodinamici:

1. regime interno alla surf zone, dove il flusso della corrente è mascherato dalle onde frangenti. In questa fascia la rip current può essere identificata come una “zona d’ombra” associata a onde non frangenti sopra varchi profondi, caratterizzata da una sorta di increspatura schiumosa e da un diverso colore dell’acqua (sulle tonalità del marrone) dovute al trasporto in sospensione dei sedimenti;
2. regime esterno della surf zone, dove il getto si diffonde all’interno di una zona di ricircolo.

Le rip current hanno velocità intermittenti che possono rapidamente crescere a causa di larghi gruppi d’onda in arrivo o instabilità nella circolazione vicino a riva, con velocità fino ad alcuni metri al secondo. Esistono vari tipi di rip current che si manifestano in corrispondenza di vari tipi di costa. Un’ottima rassegna è fornita dall’eccellente lavoro di Dalrymple et al. (2011).

La maggior parte delle rip current ha un controllo morfologico (legato cioè alla presenza di conformazioni batimetriche, forme di fondo, o anche strutture costiere sommerse), e sono forzate dalla rifrazione e dal frangimento delle onde sopra una batimetria irregolare. Il caso forse più comune è dato dalla presenza di barre litoranee, parallele o sub-parallele alla linea di riva, in cui è inciso un varco più profondo (denominato rip channel), in cui s’incanalano le correnti di ritorno. Sono frequentemente generate quando la direzione delle onde incidenti è prossima alla perpendicolare alla linea di riva e comunemente osservate su spiagge con pendenza relativamente dolce dove la surf-zone è più larga. Su spiagge ripide le correnti di rip sono meno intense perché il frangimento avviene in prossimità della riva e la surf-zone è molto ridotta. Tuttavia, sono state anche osservate situazioni di rip current in regime transiente che possono essere causate da fenomeni più complessi, quali ad esempio meccanismi d’instabilità idrodinamica (shear instabilities) d’intense correnti long-shore. Le correnti di rip possono infine generarsi in seguito all’interazione tra correnti e strutture. Questo caso comprende:

- a. la presenza di barriere emerse e sommerse lungo la riva, che possono essere sormontate dalle onde, con conseguente innalzamento del livello del mare dietro la barriera e generazione di correnti di ritorno ai lati della stessa;
- b. la presenza di pennelli che interrompono la corrente longshore, che viene così deviata verso il largo;
- c. la combinazione di strutture parallele e trasversali, che formano celle di circolazione particolarmente pericolose;
- d. nelle pocket beach, in corrispondenza degli estremi della spiaggia.

I modelli idrodinamici, e in particolare i modelli di simulazione accoppiata onda-corrente, sono in grado di rappresentare molte delle tipologie di rip current precedentemente descritte, e in particolare la fenomenologia più diffusa, ovvero quando le rip current hanno un controllo morfologico.

In questo caso lo schema classico di interazione onda-corrente prevede che le onde, frangendo in modo non uniforme sopra le barre o le strutture sommerse e i varchi, siano causa di un intenso gradiente delle componenti di spinta del moto ondoso (il cosiddetto radiation stress), e questo può indurre la formazione delle correnti di ritorno. Questi concetti sono stati introdotti da Longuet-Higgins e Stewart (1962) e, nonostante oggi siano state sviluppate anche altre formulazioni, sono la base per descrivere in maniera sufficientemente esaustiva la dinamica di molti dei principali fenomeni idrodinamici della fascia costiera, tra cui proprio le rip current. Come passo successivo, si tratta di capire qual è la capacità non genericamente di un modello, ma di un sistema previsionale operativo, di prevedere le condizioni che caratterizzano l’insorgere di situazioni di potenziale pericolo. Per quanto le rip current rappresentino un rischio difficilmente valutabile sulla base di modelli operativi a scala locale, sono stati realizzati sistemi di previsione basati su indicatori di tipo semaforico, associati a diversi livelli di rischio.

Sulla base di questi indicatori, ad esempio, il sito americano del National Weather Service (<https://www.weather.gov/>) fornisce una previsione operativa del rischio associato a questo fenomeno, attribuendo, in base alle condizioni meteorologiche previste nelle diverse zone in cui è implementato il servizio, diversi livelli di rischio, divisi in tre categorie: basso, medio, e alto.

Per determinare il rischio a scala locale di questo fenomeno, per tipologie di aree costiere le situazioni descritte sinteticamente in precedenza, l’approccio più corretto da utilizzare deve prevedere una serie di step successivi, quali:

1. utilizzo di modelli complessi 2D (o eventualmente 3D) a scala locale, per simulare le condizioni di insorgenza di rip current per un numero statisticamente rilevante di stati di mare (vento, moto ondoso). La risoluzione dei modelli costieri dovrebbe essere piuttosto spinta (< 5-10 m) per tenere conto dei dettagli morfologici della costa e dei fondali e della presenza di strutture costiere, quali barriere e pennelli;

2. validazione dei dati sulla base di osservazioni costiere (es. ottenute tramite correntometri in aree specifiche, quali varchi tra barriere emerse; analisi di immagini ottenute tramite idonee tecniche di processamento di dati di webcam costiere ad alta frequenza; analisi di dati radar ad alta risoluzione costiera quali radar in banda X). Una volta validato il metodo, per fornire indicazioni previsionali relative al rischio, per aree regionali molto estese, è opportuno valutare l'utilizzo di metodi/modelli più semplici, basati sull'utilizzo di pochi parametri integrati (es. moto ondoso, vento, pendenza del fondale, conformazione della spiaggia, ecc.), per definire opportuni indici di rischio. Come esempio di applicazione, descriviamo una possibile implementazione di un sistema previsionale che parte dall'analisi di alcune situazioni a scala locale. Abbiamo implementato un modello di simulazione accoppiata onda-corrente in un'area costiera piuttosto ampia, compresa tra la foce del fiume Fiora e Capalbio (Figura 2). Si tratta dell'area interregionale tra Toscana e Lazio, su cui sono stati fatti alcuni studi durante la realizzazione del progetto CAMP-Italy. L'attività è stata realizzata per conto della Regione Toscana e del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Mare, in collaborazione con il Consorzio LaMMA e l'Università di Firenze.



Figura 2. Area del rilievo batimetrico.

Il modello utilizzato è il Delft3D, in particolare del modulo 3D-FLOW accoppiato con il modello di onde SWAN, particolarmente adatto per lo studio della propagazione del moto ondoso in aree costiere in presenza di fondali bassi ed irregolari. Il modello implementato, nell'area di maggior dettaglio, ha una risoluzione

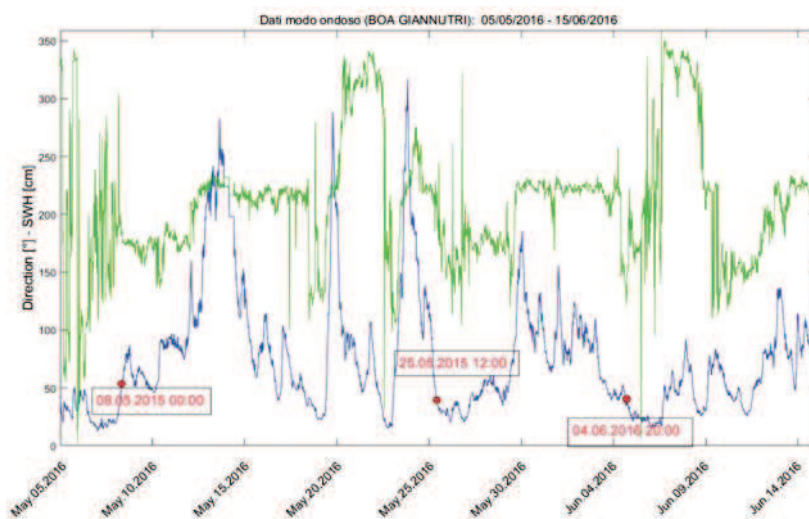


Figura 3. Moto ondoso nel periodo in esame, rilevato dalla boa ondometrica di Giannutri. Sono evidenziati gli eventi di rip currents con la data di inizio del fenomeno simulato dai modelli di simulazione.

spaziale di circa 10 m, un'estensione di circa 12 km lungo costa con un'ampiezza di circa 550 m. In questa simulazione sono stati analizzati in dettaglio alcuni fenomeni di rip current in corrispondenza di particolari situazioni di vento e moto ondoso. La simulazione è riferita ad un periodo di circa quaranta giorni (tra il 5 maggio 2016 ed il 15 giugno 2016), (Figura 3).

Nell'ambito del progetto CAMP-Italy sono stati svolti due rilievi di quest'area (spiaggia emersa e sommersa), subito prima e subito dopo il periodo studiato, e questo ha permesso di svolgere le simulazioni avendo a riferimento dati batimetrici certi. Il modello idrodinamico è stato forzato con i dati del modello meteorologico WRF operativo presso il LaMMA, con 3 km di risoluzione, e con i dati di moto ondoso del modello WW3 con risoluzione pari a 3 km sulla Costa Toscana. Dall'analisi dell'intera serie delle correnti idrodinamiche

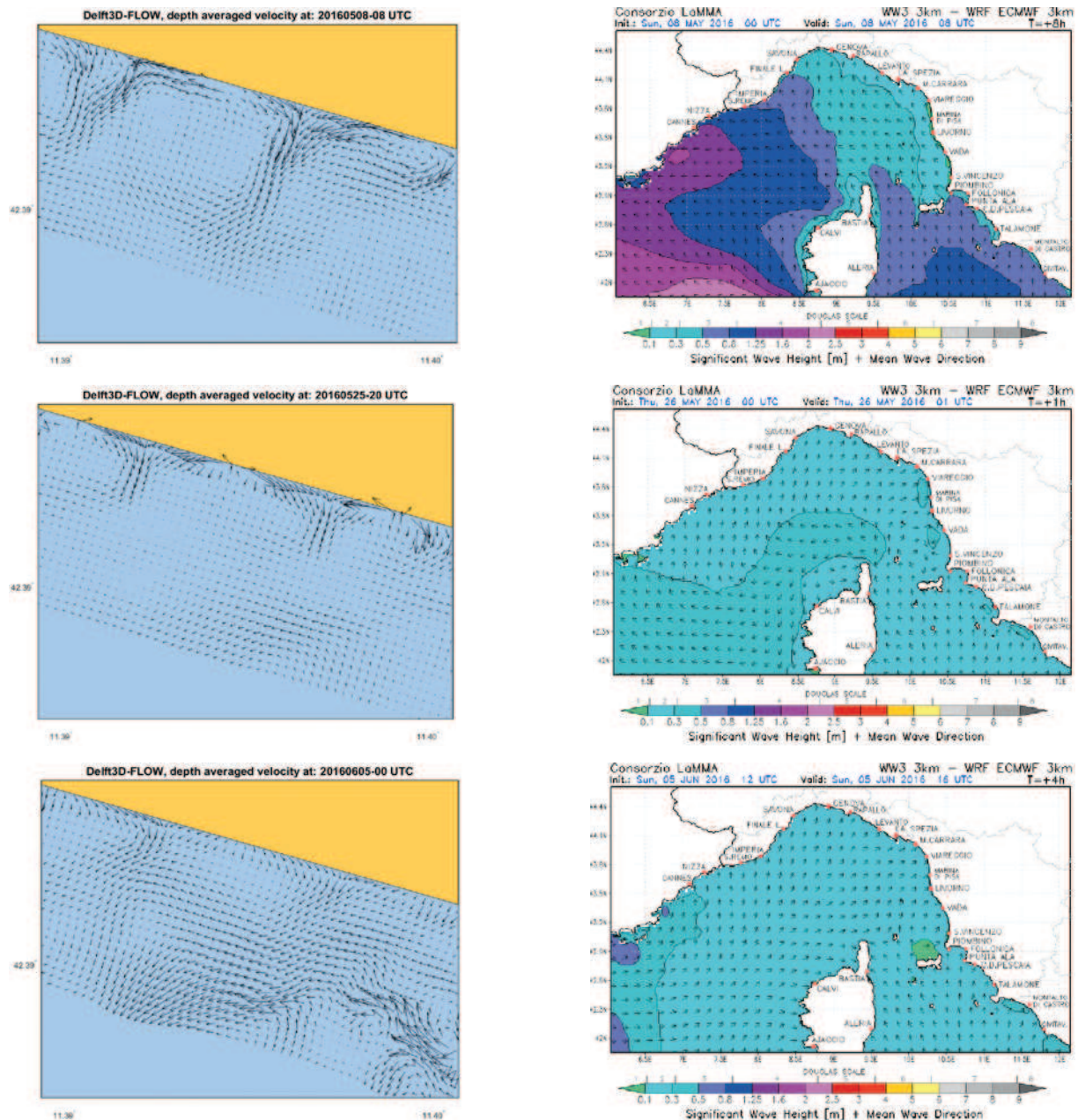


Figura 4. Eventi di rip current selezionati in prossimità di Capalbio, simulati con modello Delft3D; a fianco mappa sinottica di previsione del moto ondoso nelle ore corrispondenti.

simulate, è stato possibile estrarre le condizioni in cui si è manifestata la presenza significativa di rip current. Gli eventi in esame si sono generati in alcune situazioni ricorrenti, in particolare in presenza di situazioni non molto energetiche (altezza d'onda significativa intorno ai 50 cm) e con direzione dell'onda sensibilmente ortogonale alla linea di riva, o comunque poco inclinata (vedi Tabella 1 e Figura 4).

Tabella 1. Descrizione sintetica degli eventi. Dir min e max rappresentano le direzioni associate rispettivamente all'SWH min e max misurata dalla boa di Giannutri nell'intervallo di tempo osservato.

Evento [dd/mm/aaaa hh]	Durata [h]	SWH _{min} [m]	Dir _{min} [°]	SWH _{max} [m]	Dir _m [°]
08/05/2018 00 - 08/05/2018 12	12	0.5	176	0.7	178
08/05/2018 00 - 08/05/2018 12	12	0.3	170	0.4	195
04/06/2016 20 - 05/06/2016 08	12	0.4	145	0.3	196

Previsione della qualità ambientale delle acque costiere

Tra le altre situazioni di potenziale pericolo riguardanti la sicurezza balneare, specialmente negli ultimi anni, si è manifestata una crescente attenzione verso quei fenomeni ambientali che possono incidere sulla salute. Queste situazioni di pericolo dipendono da vari fattori, dipendenti dallo stato fisico, biogeochimico e di contaminazione delle acque litoranee, che richiedono perciò di essere sistematicamente monitorate. Di conseguenza, negli ultimi anni, all'interno delle pratiche di oceanografia operativa che si vanno via via consolidando, sono stati proposti dei servizi, al momento prototipali, finalizzati alla previsione del rischio associato alla qualità e allo stato ecosistemico delle acque costiere.

Per quanto riguarda la tutela delle acque di balneazione, questo aspetto è disciplinato da una direttiva europea (Bathing Directive, 2006/7/CE) e dalle normative di recepimento che per l'Italia è il D. Lgs 116/2008. La normativa si completa di alcune importanti indicazioni che derivano dall'applicazione di alcuni decreti ministeriali (DM 30/3/2010). Il problema è molto complesso, anche per questo la normativa incoraggia l'adozione di modelli di simulazione numerica per comprendere meglio gli aspetti legati agli episodi di inquinamento intenso e di breve periodo.

La principale fonte di incertezza legata alla previsione di questi fenomeni è la conoscenza delle sorgenti inquinanti di origine terrestre, che normalmente derivano da pratiche di gestione degli impianti di depurazione dell'acqua non ottimali, quali il bypass degli impianti di depurazione, oppure da scarichi abusivi. Spesso gli sforamenti dei limiti legislativi sono associati alla presenza di piogge nelle ore precedenti, tuttavia una volta che il pennacchio inquinante si trova in mare la concentrazione dei microinquinanti organici dipende in maniera sensibile anche da altri fattori, quali il ricambio delle acque, la dispersione, la temperatura del mare nella fascia litoranea.

Modelli a scala litoranea, simili a quelli descritti nel paragrafo precedente, con risoluzioni spinte, costituiscono la base su cui impostare dei modelli previsionali riguardanti la qualità delle acque costiere. In Italia, al momento, sistemi previsionali di questo tipo sono stati adottati dalla sola regione Emilia-Romagna, mentre altre regioni, quali la Liguria e la Toscana stanno facendo uno sforzo per poter dare dei criteri operativi utili alla gestione del problema. Le pratiche di gestione attualmente in uso, sono fondamentalmente basate sull'imposizione di divieti che scattano solo una volta che è stato osservato lo sfioramento dei parametri e pertanto solo a seguito di un campionamento che viene eseguito, dalle Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale (ARPA), con frequenza di circa una volta al mese, durante la stagione balneare, da Maggio a Ottobre. Questo modo di procedere ha mostrato notevoli limiti per motivi legati alla necessità di misurare la concentrazione di inquinanti microrganici tramite analisi di laboratorio. Quest'ultime richiedono non meno di 36-48 ore per essere completate, per cui è possibile che il divieto scatti quando la criticità è rientrata. Una possibile soluzione potrebbe essere data da un cambio del paradigma di gestione, stavolta basato sull'utilizzo di ordinanze preventive.

Queste ordinanze potrebbero senz'altro beneficiare dal supporto della modellistica previsionale, ad esempio utilizzando le stime relative alla dispersione dei contaminanti nella fascia. In questo senso è in corso una collaborazione tra Regione Toscana e ARPAT i cui primi risultati sono in corso di valutazione.

Un altro fenomeno di potenziale pericolo è rappresentato dal proliferare di specie algali pericolose (Harmful Algal Blooms, HABs), ovvero fioriture di microalghe che direttamente o indirettamente sono pericolose per

la salute umana e per l'ecologia di una regione. Alcune tossine prodotte da microalghe riescono a raggiungere l'uomo, tramite inalazione di aerosol e contatto, mediante organismi vettori che accumulano al loro interno le sostanze tossiche.

Le fioriture di alcune di queste alghe, come ad esempio, l'*Ostreopsis ovata* (*O. ovata*), sono molto diffuse anche lungo le coste italiane, e nell'ultima decade i bloom di quest'alga sono divenuti più frequenti, intensi e largamente distribuiti in molte aree del Mediterraneo (Vila et al., 2001; Aligizaki e Nikolaidis, 2006).

Il monitoraggio puntuale (in situ) di qualità delle acque costiere è il metodo più utilizzato per osservare i parametri indicatori di possibili fenomeni che possono essere pericolosi per la balneazione. Tuttavia, alla luce dei progressi nel campo dell'osservazione satellitare delle acque costiere e della capacità di risolvere scale di dettaglio tramite modelli numerici previsionali, è possibile lavorare alla costruzione di sistemi previsionali di supporto alla gestione della qualità delle acque di balneazione anche per prevedere le condizioni favorevoli alla proliferazione di specie algali pericolose. Il telerilevamento costiero, nonostante alcune note problematiche quali la correzione atmosferica, presenta ampie prospettive di sviluppo per i prossimi anni, ed è pertanto uno strumento molto importante per il monitoraggio della concentrazione di parametri ecosistemici, quali la clorofilla di superficie, come indicatore dello stato trofico delle acque, per l'implementazione della direttiva UE "Marine Strategy" (Cristina et al., 2015).

I nuovi satelliti ESA, Sentinel-3, Ocean and Land Color Instrument (OLCI) e Sentinel-2, Multi Spectral Instrument (MSI), mostrano caratteristiche molto promettenti per il telerilevamento delle acque costiere. È quindi possibile osservare e studiare le dinamiche fisiche e biogeochimiche delle acque costiere e i potenziali impatti delle attività umane lungo i litorali, i porti, gli ambienti di transizione quali lagune ed estuari.

Come esempio di applicazione, proponiamo il possibile utilizzo di dati satellitari come strumento per l'osservazione sinottica e quotidiana delle aree target, permettendo dunque un monitoraggio frequente e la possibilità di individuare, tramite serie temporali, le combinazioni di parametri fisici e biogeochimici che possono determinare condizioni di allerta per le HABs.

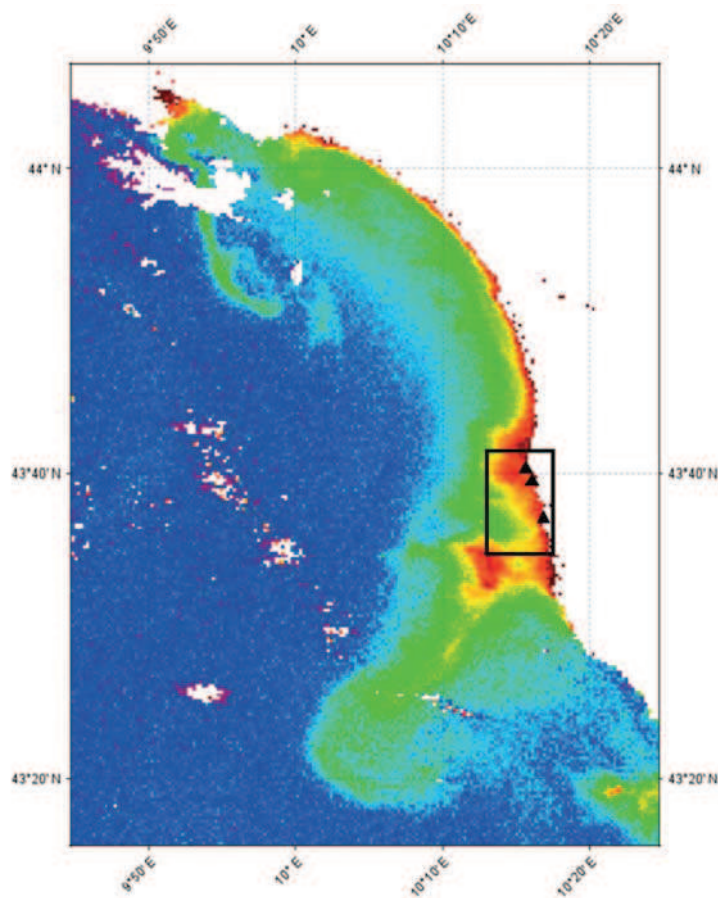


Figura 5. Clorofilla da Sentinel 3A FR OC4ME, (31/7/2017). Il riquadro nero mostra l'area in cui sono state effettuate le osservazioni satellitari. I triangoli neri sono le stazioni di monitoraggio di *O.ovata* (ARPAT).

In questa applicazione vengono rilevate le condizioni in cui si può verificare un evento potenzialmente dannoso legato alla fioritura algale di *O. ovata*. Questa fioritura, che può causare danni all'organismo marino e agli esseri umani, è principalmente causata dal verificarsi di giorni di condizioni meteorologiche e marine stabili (alta pressione atmosferica), in aree con ridotto moto ondoso (presenza di scogliere naturali o artificiali), e di temperatura dell'acqua relativamente alta. Le condizioni di rischio di fioritura sono rilevate confrontando i dati biogeochimici e fisici di un'area derivata da satellite - MODIS Aqua e OLCI Sentinel 3 - con soglie specifiche. I parametri di riferimento utilizzati sono:

- lo stato trofico, valutato come concentrazione superficiale di clorofilla (Chla);
- la temperatura dell'acqua, valutata come Temperatura superficiale del mare (SST);
- la Water Clarity, valutata come coefficiente di attenuazione della diffusione a 490 nm (KD490).

Considerando che *O. ovata* vive in acque poco profonde e per la maggior parte della sua vita su rocce e macroalghe, non è possibile un rilevamento satellitare diretto di parametri fisici/biogeochimici, ma i valori di SST, Chla e KD490 mediati su un'area più ampia, che include quella monitorata, possono essere usati come proxy per la segnalazione di una possibile allerta. Un'analisi esplorativa (Lapucci et al., 2019) effettuata alla foce dell'Arno, area in cui si trovano tre punti di monitoraggio ARPAT di concentrazione di *O. ovata* (Figura 5) mostra che è possibile mettere in relazione gli episodi di fioriture algali pericolose con questi parametri. Le osservazioni derivano dai satelliti MODIS AQUA e Sentinel 3 OLCI (SST, Chla, KD490). I parametri meteomarine sono ottenuti dalle boe più vicine (Gorgona, Gombo).

I risultati dell'analisi svolta per gli anni 2010-2015, indicano che un'interazione tra temperatura superficiale del mare (25° C) preceduta da giorni di moto ondoso appropriato per favorire la risospensione delle cellule nella colonna d'acqua e seguito da giorni di mare calmo sono fattori che favoriscono la fioritura e il bloom (Tabella 2). Si osserva inoltre come nei giorni in cui si manifesta il bloom i dati satellitari sono sopra una soglia prefissata, mentre nei periodi in cui il bloom è assente i dati satellitari (almeno quelli OLCI, con maggiore rappresentatività costiera) sono quasi sempre sotto questa soglia.

Tabella 2. dati satellitari e di *O. ovata* giugno - settembre 2016 e 2017. In rosso i dati sopra soglia, in arancione quelli prossimi alla soglia. I bloom si verificano in corrispondenza del superamento simultaneo.

	2016				2017				
	27/07	18/07	01/08	31/08	20/06	05/07	10/07	20/07	17/08
O. ovata (cell/l) Threshold 10000	8960	440	14360	960	9560	29800	60480	1760	4520
OLCI Chla (mg/m ³) Threshold 0.3	0.499	0.162	0.970	0.272	0.869	0.539	0.472		
MODIS Chla (mg/m ³) Threshold 0.3	0.281		0.404		0.322	0.352	0.254	0.215	0.250
OLCI KD490 (mg/m ³) Threshold 0.04	0.063	0.034	0.085	0.042	0.086	0.044	0.060		
MODIS KD490 (mg/m ³) Threshold 0.04	0.048		0.060		0.053	0.056	0.045	0.039	0.037
MODIS SST (°C) Threshold 25	26.22	24.26	27.62		25.8	26.3	25.9	25.61	
Bloom	X		X		X	X	X		

Si ritiene che questa applicazione possa essere implementata come vero e proprio servizio di previsione delle condizioni favorevoli alla fioritura, mediante dati di previsione idrodinamica e biogeochimica da modelli ad alta risoluzione.

Discussione e conclusioni

La realizzazione di sistemi previsionali a scala litoranea e costiera necessari per supportare applicazioni o servizi per la tutela della vita umana o della salute richiede, come descritto nei paragrafi precedenti, non può prescindere da una serie di componenti tecniche che includono:

- 1) utilizzo di modelli a scala costiera e altissima risoluzione;
- 2) disponibilità di rilievi geomorfologici recenti o comunque di un quadro aggiornato di informazioni;
- 3) disponibilità di un certo numero di dati di osservazione di onde, fenomeni idrodinamici costieri e qualità delle acque, anche da immagini satellitari, in numero sufficiente da permettere la calibrazione e la successiva validazione dei modelli numerici;
- 4) la definizione di indicatori e delle relative soglie, definiti a scala locale sulla base dell'indagine precedentemente avviata, per identificare le situazioni di potenziale rischio.

Per quanto i servizi di oceanografia operativa si stiano impegnando a fornire dati a risoluzione crescente, con maggiore dettaglio temporale, utilizzando modelli migliorati, possibilmente utilizzando dati disponibili a scala di bacino, quali immagini satellitari dei nuovi Sentinel-1, i servizi che si innestano su quei prodotti sono ancora lontani da poter essere utilizzati per fornire servizi a scala locale, lungo i litorali ad esempio.

Il gap fra i prodotti forniti dai servizi di analisi e previsione ufficiali (Copernicus) e la necessità di disporre di osservazioni e modelli ad altissima risoluzione è ancora troppo ampio.

Diverso è ovviamente il discorso riguardanti possibili applicazioni prototipali su aree limitate. Una soluzione tecnicamente interessante può essere realizzata utilizzando, come variabili predittive non tanto i risultati di modelli a piccola scala, quanto le variabili a larga scala quali: moto ondoso, temperatura e clorofilla.

Questi potrebbero essere utilizzate per la costruzione di appositi indici legati al rischio.

In questo lavoro, si è descritto lo stato d'implementazione di alcuni potenziali servizi operativi finalizzati a supportare la richiesta d'informazioni per la salvaguardia delle vite umane o per la tutela della salute. Si è mostrato come oggi ci sono tutti gli elementi per pervenire alla realizzazione di sistemi previsionali a scala locale, e non più solo ad ampia scala, innestandosi sui dati provenienti dall'ordinaria previsione meteorologica o meteomarina, che ha raggiunto livelli di affidabilità molto elevati.

Il miglioramento delle capacità di calcolo permette, infatti, di realizzare modelli ad altissima risoluzione costiera per simulare varie situazioni di potenziale pericolo, legate a vari tipi di: impatto delle mareggiate, rip current, episodi d'inquinamento intenso e di breve periodo, condizioni favorevoli allo sviluppo di specie algali pericolose.

All'incremento delle capacità prestazionali dei modelli si accompagna anche la disponibilità di dati satellitari ad altissima risoluzione con cui è possibile aggiornare alcune caratteristiche fisiche o biogeochimiche delle acque costiere, quali: temperatura, torbidità o clorofilla.

Le potenziali applicazioni che coinvolgono solo sistemi la cui dinamica è nota con minore incertezza, è senza dubbio più matura. È il caso della previsione dei fenomeni favorevoli all'innescò di rip current che, come noto, costituiscono uno dei maggiori pericoli per la balneazione.

Bibliografia

- Aligizaki K., Nikolaidis G., 2006. *The presence of the potentially toxic genera *Ostreopsis* and *Coolia* (Dinophyceae)*. In the North Aegean Sea, Greece. *Harmful Algae*, 5: 717–730.
- Dalrymple R.A. MacMahan J.H., Reniers J.H.M., Nelko J.H.M., 2011. *Rip Currents, Annual Reviews*. In *Fluids Mechanics*, 43: 551-581.
- Lapucci C., Taddei S., Doronzo B., Fattorini M., Melani S., Betti G., Maselli F., Ortolani A., Gozzini B., Brandini C., 2019. *Earth observation as an aid to coastal water monitoring: potential application to harmful algal bloom detection*. In: G. Chirici & M. Giannetto (Eds.), *Trends in earth observation*, 1: 171-175.
- Longuet-Higgins M.S. e Stewart R. W., 1962. *Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf-beats'*. *Journal of Fluid Mechanics*, 10: 529–549.
- Roelvink, J.A., 2003. *Implementation of roller model, draft Delft3D manual*. Delft Hydraulics Institute.
- Sverdrup H.U. e Munk W.H., 1947. *Wind, sea and swell. Theory of relations for forecasting*. U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, Pub. No. 601, 44 pp.
- Tolman H.L., 1991. *A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents*. *Journal of Physical Oceanography*, 21: 782–797.

Tolman H.L., Balasubramanian B., Burroughs L.D., Chalikov D.V., Chao Y.Y., Chen H.S., Gerald V.M., 2002. *Development and implementation of wind generated ocean surface wave models at NCEP*. Weather and Forecasting, 17: 311–333.

Vila M., Garcés E., Masó M., 2001. *Potentially toxic epiphytic dinoflagellate assemblages on macroalgae in NW Mediterranean*. Aquatic Microbial Ecology, 26: 51–60.

Ricevuto il 20/06/2019

Accettato il 30/06/2019