

MODELLISTICA DI PREVISIONE E REANALISI PER L'INGEGNERIA MARITTIMA

G. Besio¹, F. Cassola², L. Mentaschi¹, L. Sartini¹

- (1) DICCA, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Civile e Ambientale, Università degli Studi di Genova, Via Montallegro 1, 16145 Genova
(2) DIFI Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Genova, Via Dodecaneso 33, 16146 Genova

SOMMARIO

Le necessità progettuali e l'avanzamento della ricerca nel campo dell'Ingegneria Marittima hanno fatto sì che nelle ultime decadi ci sia stata una tendenza sempre maggiore a supportare le attività progettuali e di ricerca sia con modelli sperimentali di laboratorio che con simulazioni numeriche. Quest'ultime stanno trovando sempre maggior impiego soprattutto grazie a un aumento significativo delle prestazioni di calcolo e della ricerca nell'ambito della simulazione numerica della meccanica dei fluidi. Inoltre lo sviluppo di sistemi di misura diretti e indiretti di grandezze quali il moto ondoso e le correnti marine, ha messo a disposizione basi di dati solide e affidabili con cui verificare e validare i modelli numerici. In quest'ottica presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università di Genova è stata sviluppata e validata un catena modellistica per la simulazione della generazione e propagazione del moto ondoso all'interno del bacino del Mediterraneo (www.dicca.unige.it/meteocean). Tale strumento viene impiegato sia a scopo previsionale, quindi per poter fornire informazioni sullo stato del mare a breve termine, sia per attività di reanalisi del clima ondoso, rendendo così possibile la stima delle caratteristiche del moto ondoso a lungo termine.

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'ingegneria marittima una delle problematiche maggiori è sempre stato il reperimento di informazioni attendibili ed esaustive sulle caratteristiche del clima ondoso per poter realizzare tutta una serie di studi relativi alle attività produttive caratteristiche della fascia costiera e dell'industria offshore. Fino a pochi decenni fa il reperimento e l'analisi dei dati sulle variabili meteo-marine venivano effettuati solitamente sulla base di misure ed osservazioni di campo caratterizzati quindi da una forte limitazione sia spaziale che locale. I dati così raccolti, pur essendo di grande valore sia per la ricerca scientifica che per l'utilizzo per applicazioni ingegneristico, presentano quindi delle limitazioni dovute principalmente alla limitata estensione temporale e alla loro forte località, ovvero al fatto di poter avere a disposizione l'informazione in un determinato punto per un determinato periodo. Inoltre la strumentazione e le

infrastrutture per poterla rendere operativa presentano, in ambito marino, costi di installazione e manutenzione particolarmente significativi. La necessità quindi di poter disporre di informazioni distribuite e non più locali ha fatto sì che la modellistica numerica dei processi fisici legati alle forzanti meteo-marine si sviluppasse in maniera sempre più efficiente ed affidabile man mano che la potenza computazionale dei computer aumentava. Ovviamente l'affidabilità della modellazione numerica è strettamente collegata alla quantità e alla qualità delle misure di campo da utilizzare come casi di confronto per l'ottimizzazione e la validazione dei modelli numerici utilizzati per la simulazione dei principali processi fisici in ambito meteo-marino.

In questo contributo vengono presentate le attività svolte presso il DICCA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università di Genova), con la collaborazione del DIFI (Dipartimento di Fisica, Università di Genova) nell'ambito della modellazione numerica della dinamica meteo-marina e delle possibili applicazioni con un diretto interesse per l'ingegneria offshore e marittima, sia a scopi operativi che per scopi di pianificazione e progettazione. In particolare viene illustrata la catena modellistica operativa per la simulazione della fisica dell'atmosfera e della dinamica del moto ondoso utilizzata sia in maniera operativa (previsioni fino a cinque giorni) che in modalità di *hindcast*, ovvero per la ricostruzione della dinamica meteo-marina dal 1979 al 2014.

2 IL MODELLO ATMOSFERICO WEATHER RESEARCH FORECAST (WRF)

La componente atmosferica della catena modellistica messa a punto presso il DICCA, in collaborazione con il Dipartimento di Fisica (DIFI) dell'Università di Genova, è costituita dal modello a mesoscala non idrostatico WRF-ARW, sviluppato e distribuito dal National Center for Atmospheric Research, USA (*Skamarock et al.*, 2008). Sono stati definiti, in particolare, due domini di calcolo, il primo esteso all'intero bacino del Mediterraneo con risoluzione orizzontale di 10 km, il secondo nidificato nel primo con una risoluzione di 3.3 km e centrato sull'Italia settentrionale (Figura 1). I dati geografici statici necessari per le simulazioni (orografia, uso del suolo e maschera terra-mare) sono stati ricavati dalle banche dati USGS (United States Geological Survey), con risoluzione rispettivamente di 2' e 30'' di arco, e interpolati alla risoluzione richiesta tramite opportuni preprocessori del modello WRF.

Schemi di parametrizzazione diffusamente utilizzati e allo stato dell'arte sono stati adottati per la descrizione dei fenomeni fisici "sotto-griglia". In particolare, per la radiazione solare a onda lunga e onda corta sono stati scelti rispettivamente il modello RRTM (*Mlawer et al.*, 1997) e lo schema di Goddard (*Chou & Suarez*, 1994). Lo schema di Kain-Fritsch (*Kain*, 2004) è impiegato per descrivere la convezione sul dominio esterno, mentre sul dominio ad alta risoluzione è possibile risolvere esplicitamente i processi convettivi senza bisogno di parametrizzazioni. Lo schema di *Thompson et al.* (2008) è stato adottato per la microfisica delle nuvole, mentre per la descrizione dei processi nello strato limite e nello strato superficiale si è fatto ricorso rispettivamente allo schema di Mellor-Yamada-Janjic e a quello derivato dal modello Eta (*Janjic*, 2002). Infine, per i processi alla superficie è stato adottato il modello di Noah (*Chen & Dudhia*, 2001).

Tale strumento modellistico è utilizzato sia in modalità previsionale, per descrivere l'evoluzione dei principali campi atmosferici a breve e medio termine, sia per studi

climatologici e ricostruzione di eventi passati. Nel primo caso le condizioni iniziali e al contorno necessarie per le simulazioni con il modello WRF sono ottenute dai campi del modello globale americano GFS (*Environmental Modeling Center, 2003*), distribuite su una griglia di $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Due corse giornaliere del modello WRF (inizializzate con le analisi GFS delle 00 UTC e delle 12 UTC) forniscono campo previsionali a passo orario per le successive 120 ore (48 ore sul dominio interno ad alta risoluzione), un sottoinsieme dei quali è liberamente consultabile sul sito web www.dicca.unige.it/meteocean.

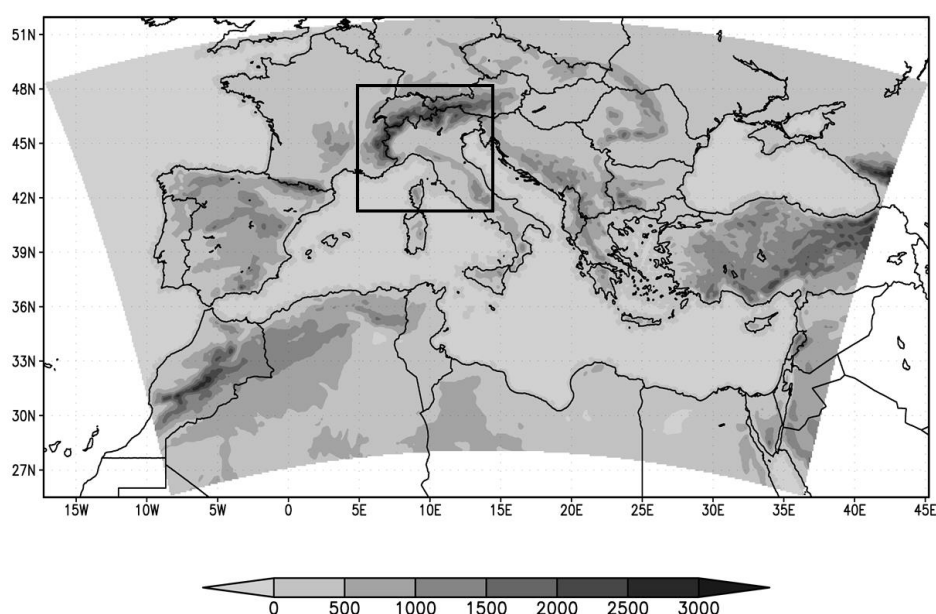


Figura 1. Domini di calcolo definiti per le simulazioni con il modello WRF: la risoluzione spaziale è di 10 km per il dominio esterno, di 3.3 km per quello nidificato (riquadro nero). I contorni ombreggiati indicano l'orografia del terreno, espressa in metri.

Per le simulazioni retrospettive in modalità *hindcast*, le condizioni iniziali e al contorno sono invece estratte dalle rianalisi globali CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) distribuite dal National Center for Environmental Prediction (Saha et al., 2010) su una griglia anch'essa di $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Le rianalisi CFSR sono un prodotto allo stato dell'arte finalizzato a fornire la miglior ricostruzione dello stato dell'atmosfera nel periodo dal 1979 in avanti, grazie all'utilizzo di un sistema accoppiato atmosfera-oceano-superficie terrestre-ghiaccio marino. A partire dalle rianalisi CFSR, tramite il modello WRF è stato quindi ricostruito un archivio di campi meteorologici su tutto il Mediterraneo per il periodo 1979-2014, con risoluzione spaziale di 10 km e risoluzione temporale oraria. In questa seconda modalità, ciascuna simulazione con WRF ha una durata di 24 ore, la condizione iniziale viene aggiornata alle 00 UTC di ogni giorno e le condizioni al contorno vengono imposte ogni 3 ore.

3 IL MODELLO PER IL MOTO ONDOSO WAVEWATCHIII (WWIII)

I modelli spettrali d'onda, quali WaveWatchIII, adottano una rappresentazione spettrale dello stato della superficie dell'oceano. In questo approccio, introdotto da Pierson (1955), la dinamica del moto ondoso è descritta come una sovrapposizione lineare di componenti spettrali bidimensionali quasi indipendenti, definite da coppie frequenza/direzione. L'energia di ogni componente spettrale si propaga negli spazi geografico e spettrale indipendentemente dalle altre, a meno di una somma di termini sorgente che descrivono i vari processi fisici che contribuiscono alla generazione e all'evoluzione delle onde. In acqua profonda i termini sorgente vengono convenzionalmente suddivisi in termini di crescita e smorzamento dell'onda e termini di interazione non lineare onda – onda.

La rappresentazione della crescita dell'onda è basata su teorie che descrivono l'instabilità di Kelvin-Helmholtz dell'interfaccia oceano-atmosfera (e.g. Miles, 1957). La dissipazione dell'onda è l'aspetto meno conosciuto della dinamica, e la sua descrizione è generalmente basata su metodi semiempirici e probabilistici (e.g. Hasselmann *et al.*, 1974, Phillips *et al.*, 1985, Babanin *et al.*, 2001), calibrati in larga misura a posteriori sulla base delle misure raccolte da boe, radar e satelliti. I termini di crescita e dissipazione risultano pertanto strettamente legati, essendo sviluppati e calibrati insieme, e le loro parametrizzazioni dipendono l'una dall'altra. Ciò che distingue i modelli d'onda di terza generazione quali WWIII dai modelli precedenti è una rappresentazione puntuale, anche se approssimata, delle interazioni non lineari onda-onda (Hasselmann *et al.*, 1985) responsabili della cascata energetica da componenti spettrali di frequenza più alta, maggiormente interessate dalla crescita legata all'azione del vento, a componenti spettrali di frequenza più bassa.

Il modello WWIII (Tolman, 2014), mantenuto presso il NOAA, è un modello di terza generazione che si sta affermando come modello di riferimento per la simulazione della dinamica delle onde in acqua profonda, anche grazie alla sua natura *open source*.

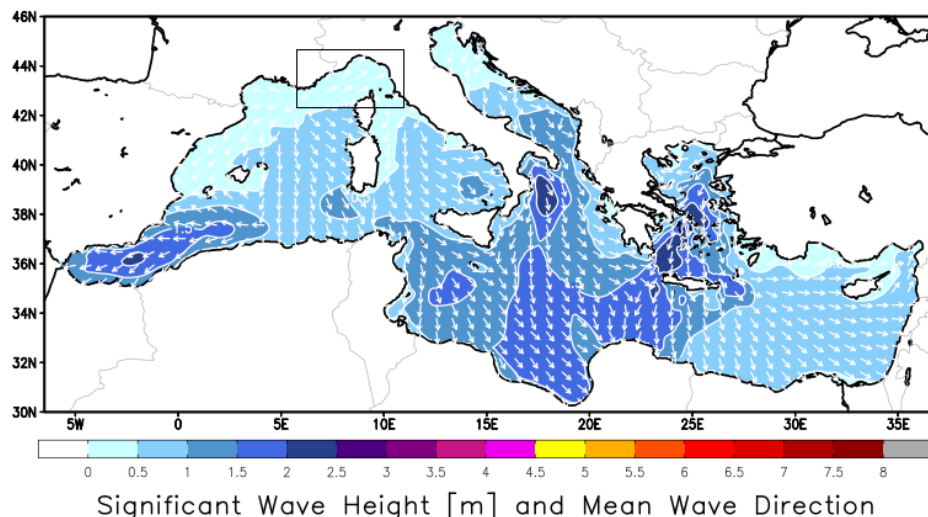


Figura 2. Domini di integrazione del modello WWIII. Il riquadro in alto rappresenta il dominio ad alta risoluzione sul mar Ligure.

La catena operativa implementata presso il DICCA utilizza WWIII v3.14 in una configurazione nidificata che comprende una maglia regolare sull'intero bacino del Mediterraneo con una risoluzione di circa 10 km, ed una maglia regolare con risoluzione di circa 2 km sul mar Ligure. Le maglie sono riportate in Figura 2. Lo spettro risolto comprende 24 direzioni separate da un intervallo di 15° e 25 frequenze separate da un fattore 1.1. Il periodo massimo considerato è di circa 15 s, mentre il periodo inferiore è di 1.4 s. Per la rappresentazione della crescita/smorzamento dell'onda è stato impiegato il termine sorgente di *Ardhuin et al.* (2010), che fa uso di un termine in grado di descrivere la dissipazione delle onde lunghe in funzione della velocità di attrito del vento.

Il modello d'onda viene forzato su base oraria dalle uscite del modello meteorologico sia in modalità operativa (quindi in funzione previsionale a cinque giorni) sia in modalità di *hindcast*/ricostruzione degli eventi passati. Le uscite del modello vengono registrate su ogni nodo di calcolo del dominio a cadenza oraria. In funzione delle caratteristiche dello spettro del moto ondoso vengono così salvate le principali quantità integrate del moto ondoso (H_s , T_{10} , T_{01} , T_{02} , T_p , θ_m , θ_p , σ_θ ...) assieme alle diverse componenti dello stato del mare (mare vivo e/o mare lungo).

4 VALIDAZIONE DEI MODELLI

I campi meteorologici ottenuti con il modello WRF sono stati sottoposti a validazione e utilizzati per molteplici applicazioni. In particolare, in *Bove et al.* (2014) una catena modellistica molto simile a quella descritta nel precedente paragrafo 2 è stata utilizzata per fornire l'input a simulazioni con modelli chimici di trasporto per valutare l'impatto delle attività portuali sulla qualità dell'aria nella città di Genova. Un confronto con dati sperimentali forniti da centraline site nell'area costiera genovese e sui rilievi retrostanti ha mostrato come il modello sia in grado di riprodurre in modo più che soddisfacente l'evoluzione di campi di superficiali di interesse quali la temperatura e la velocità del vento, pur in un contesto topografico complesso come quello ligure.

Un altro studio (*Cassola et al.*, 2015) si è invece focalizzato sulla capacità del modello di prevedere eventi di precipitazione estrema associati a fenomeni alluvionali. In particolare, è stata dimostrata la forte sensibilità del campo di precipitazione previsto alla risoluzione orizzontale delle simulazioni e allo schema di parametrizzazione utilizzato per la microfisica delle nubi. Per superare i limiti dei metodi di verifica tradizionale, basati su un confronto puntuale tra previsioni e osservazioni e tendenti a penalizzare in eccesso previsioni ad alto dettaglio spaziale, sono stati utilizzati approcci statistici di nuova generazione, in cui sono confrontati *pattern* (detti anche "oggetti") ben definiti di precipitazione, identificati nei campi previsti e in quelli ottenuti interpolando su un grigliato regolare le misure delle centraline.

L'implementazione del modello d'onda è stata validata mediante confronto tra i valori simulati e le misure delle boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON), la Red Externa spagnola e la rete greca Poseidon. I confronti sono stati effettuati su grandezze integrate, quali l'altezza significativa, il periodo medio e la direzione media, e le prestazioni sono state valutate tramite indicatori statistici di errore (*Mentaschi et al.* 2013). Una prima validazione è stata effettuata su una serie di mareggiate nel mar Tirreno settentrionale e nel mar di Alboran al largo della costa Andalusia, ed è stata effettuata al fine di verificare l'affidabilità della catena modellistica nella simulazione di

eventi estremi. Nell'ambito di questa attività è stato effettuato un confronto tra diverse parametrizzazioni di crescita e smorzamento, mostrando come i termini sorgente di *Ardhuin et al. (2010)* producano i risultati più attendibili. La parametrizzazione di riferimento di *Ardhuin et al. (2010)* è stata inoltre adattata al fine di ridurre una leggera tendenza alla sovrastima dell'altezza significativa. La configurazione ottenuta è stata successivamente utilizzata per produrre un *hindcast* del moto ondoso in un arco temporale compreso tra il 1979 e il 2014. Ciò ha consentito una validazione estensiva della catena modellistica, mostrando come il sistema sia in grado di riprodurre correttamente il moto ondoso all'interno del bacino del Mediterraneo (*Mentaschi et al. 2015*).

5 PREVISIONI A BREVE TERMINE DEL MOTO ONDOSO

La catena modellistica, implementata e verificata secondo quanto descritto nei paragrafi precedenti, è impiegata innanzitutto nella produzione di informazioni riguardanti le variabili meteo-marine per la previsione a breve termine (ovvero per un orizzonte temporale di cinque giorni) su tutto il bacino del Mediterraneo. Le previsioni, realizzate due volte al giorno, per il run delle 0.00UTC e delle 12.00UTC, sono consultabili sul sito www.dicca.unige.it/meteocean. La particolare attenzione posta nell'ottimizzazione dei modelli atmosferici e del moto ondoso e la loro validazione con le osservazioni di campo disponibili, ha innalzato significativamente l'affidabilità dei dati di previsione, rendendo queste informazioni di fondamentale importanza per diverse applicazioni rivolte principalmente alla sicurezza di persone e cose lungo la costa e all'operatività delle infrastrutture costiere.

Una prima applicazione delle informazioni di previsione dello stato del mare è stata infatti implementata in collaborazione con l'ARPA Liguria per lo sviluppo di un indice di pericolosità per le condizioni del mare ai fini di protezione civile e tutela delle infrastrutture costiere. Tale indice è stato pensato per poter essere valutato senza costi computazionali direttamente dalle informazioni delle previsioni a scala di bacino. In quest'ottica non era possibile realizzare delle simulazioni di dettaglio della propagazione e trasformazione del moto ondoso in maniera dettagliata lungo tutta la costa ligure a causa dei costi computazionali in termini sia di tempo che di risorse informatiche. La stima dell'indice è stata quindi impostata in funzione delle caratteristiche del moto ondoso al largo, tenendo in conto l'entità della possibile risalita del motoso sulla spiaggia; tale processo fisico è infatti responsabile di danni a cose e/o persone in caso di eventi di mareggiata particolarmente significativi. Seguendo la formulazione per il calcolo del run-up proposta da *Stockdon et al. (2006)*, una parte dell'indice è stata presa come proporzionale alla lunghezza e all'altezza d'onda al largo. Inoltre è stato aggiunto un contributo che teneva in conto della persistenza delle condizioni di mareggiata; tale contributo è stato quindi riferito al contenuto energetico degli stati di mari mediato su un intervallo di undici ore (*Besio et al. 2015a*).

$$HI \propto \left(\sqrt{HL}, E \right) \quad (1)$$

L'indice di pericolosità, opportunamente calibrato sulle condizioni locali del moto ondoso (l'indice assume infatti valori compresi tra 0 e 10 in funzione delle condizioni del moto ondoso caratteristiche dell'area in esame) può essere utilizzato per fornire

messaggi di allerta e per intraprendere azioni per la mitigazione del rischio in occasioni di forti eventi di mareggiata che possono portare a inondazioni e danni lungo la zona costiera. Un esempio dell'applicazione dell'indice di pericolosità in occasione della mareggiata del 30 Maggio 2015 nell'Alto Tirreno è riportato in Figura 3.

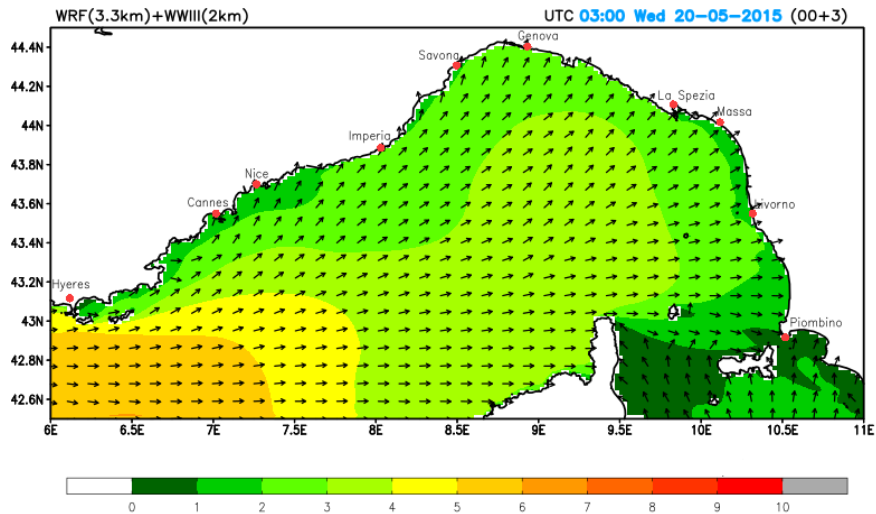


Figura 3. Stima dell'indice di pericolosità per l'Alto Tirreno, mareggiata del Maggio 2015.

Una seconda applicazione della catena modellistica previsionale è stata utilizzata per la sicurezza portuale e in particolare per la caratterizzazione delle condizioni di tracimazione del moto ondoso in corrispondenza delle opere foranee del porto di Savona.

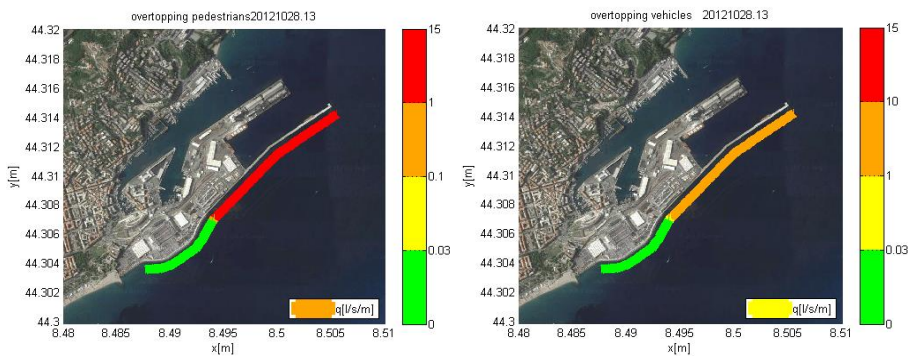


Figura 4. Previsione delle condizioni di rischio in prossima dell'opera di difesa del Porto di Savona in funzione della portata tracimante

Le uscite del modello di previsione a scala di bacino vengono impiegate per la modellazione della propagazione del moto ondoso verso costa a una risoluzione di dettaglio tramite maglie nidificate con una risoluzione che passa dai 2 km del modello

padre ai 25 metri di quello finale. La risoluzione della propagazione del moto ondoso nella zona costiera è simulata con il modello SWAN. In funzione delle caratteristiche del moto ondoso e della sezione del tratto di diga considerata è possibile quindi restituire una indicazione sul livello di rischio e quindi di operatività delle aree a tergo dell'opera di difesa del porto di Savona. In Figura 4 è riportato un esempio grafico dei risultati delle simulazioni per la mareggiata dell'Ottobre del 2012.

Le informazioni in previsione, inoltre, possono venire utilizzate per la pianificazione e la gestione di tutte quelle attività che risultano altamente sensibili ai cambiamenti e alle condizioni meteo-marine locali, quali attività di cantiere da realizzarsi in mare aperto o in zone poco riparate, navigazione e rimorchio di corpi galleggianti, assistenza ad operazioni di ricerca e salvataggio e attività ludiche e sportive.

6 PREVISIONI A LUNGO TERMINE: GLI EVENTI ESTREMI

La disponibilità delle serie di re-analisi del moto ondoso (1979-2014) sull'intero dominio computazionale, ha consentito lo sviluppo di studi inerenti la caratterizzazione del clima ondoso a lungo termine su tutto il bacino del Mediterraneo. Un primo lavoro (Sartini *et al.*, 2015a) è stato realizzato focalizzando l'attenzione sulla confronto tra differenti modelli statistici utilizzabili nel campo dell'analisi degli eventi estremi (quali i modelli di processo GEV e GPD-Poisson, l'algoritmo per il calcolo della Mareggiata Triangolare Equivalente ed il metodo di Goda); più precisamente sono state messe in luce ed evidenziate le potenzialità e le criticità di ciascun approccio, con lo scopo di predisporre un modello di analisi degli eventi estremi. A tal fine, sono state utilizzate le uscite del modello in prossimità dei punti-boa appartenenti alla Rete Ondametrica Nazionale (RON), con lo scopo di realizzare una validazione delle serie temporali di *hindcasting* e di aggiornare i valori degli eventi estremi in funzione del tempo di ritorno.

In generale, è stata osservata una maggiore versatilità del modello GPD-P. I risultati conseguiti mediante tale modello sono spesso in linea con le stime fornite dal metodo di Goda, il quale presenta alcune limitazioni nel descrivere eventi estremi relativi a condizioni di mare caratterizzate da minore intensità. Una tendenza a fornire stime più elevate è stata evidenziata per l'algoritmo ETS, il quale inoltre non consente una quantificazione degli intervalli di confidenza associati alle stime dei valori estremi. Sartini *et al.* (2015a) hanno quindi proposto una metodologia per superare questa problematica. Infine, si è osservato che i valori di ritorno forniti mediante il modello GEV sono poco verosimili per tempi di ritorno inferiori ai 50 anni. La Figura 5 sintetizza le stime ottenute per il punto-boa di Alghero, al variare del modello statistico utilizzato. Il lavoro menzionato, inoltre, può essere considerato come un aggiornamento e revisione dell'atlante delle onde italiane (Tabella 1), sia poiché concepito avvalendosi di serie temporali caratterizzate da una estensione temporale maggiore rispetto ai dati disponibili della RON, e da una frequenza di campionamento oraria.

Studi di maggior dettaglio a differente scala (sottoscala) sono stati realizzati nel Mar Ligure (Sartini *et al.*, 2014), avvalendosi di un modello statistico non-stazionario in grado di cogliere i differenti comportamenti esibiti dal clima ondoso in relazione alle differenti tipologie di forzanti meteorologiche presenti nell'area. Un esempio è riportato dal punto boa di La Spezia (Figura 6), per il quale l'alta variabilità inter-annuale dei livelli di ritorno è associata ad un determinato assetto di forzanti meteorologiche insistenti sul bacino dell'Alto Tirreno (Sartini *et al.*, 2015b).

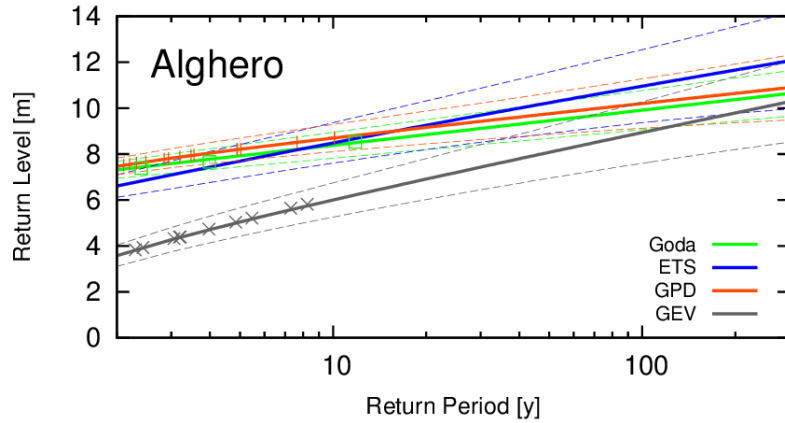


Figura 5. Valori attesi per le altezze d'onda significativa [m] relativi al punto boa Alghero ottenuti per diversi tempi di ritorno, al variare del modello statistico utilizzato.

Punto Boa	Hs_{50} [m]	Hs_{100} [m]	Hs_{200} [m]
Alghero	9.8	10.2	10.7
La Spezia	7.7	8.2	8.6
Ponza	8.9	9.4	10.0
Mazara del Vallo	7.2	7.7	8.2
Monopoli	6.9	7.4	7.9
Ortona	6.7	7.0	7.3
Catania	6.8	7.5	8.2
Crotone	6.6	7.1	7.6

Tabella 1. Valori attesi per diversi periodi di ritorno T_R

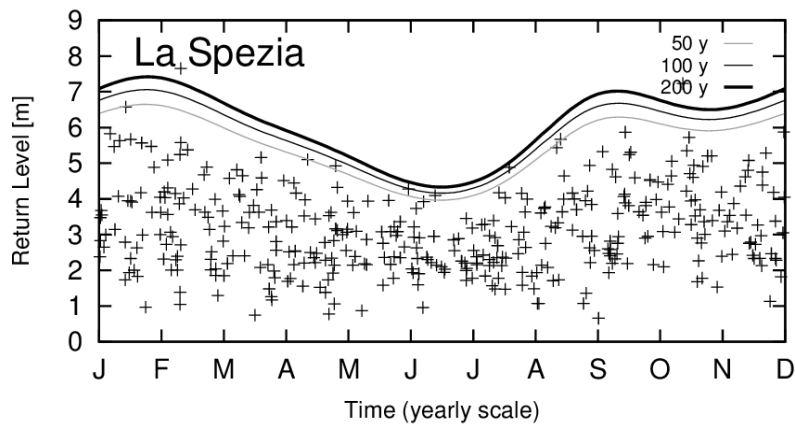


Figura 6. Variabilità intra-annuale delle altezze d'onda significativa [m] per tempi di ritorno pari a 50, 100 e 200 anni, punto-boa La Spezia.

Il modello non stazionario per la previsione a lungo termine è stato inoltre esteso all'intero bacino del Mediterraneo (Sartini et al., 2015b). L'adozione di un modello non stazionario ha consentito non solo di revisionare ed aggiornare il clima ondoso definito precedentemente in modalità stazionaria, ma anche di incorporare la variabilità stagionale, i trend a lungo termine e gli effetti delle covariate meteorologiche nella valutazione dei livelli di ritorno (Figura 7).

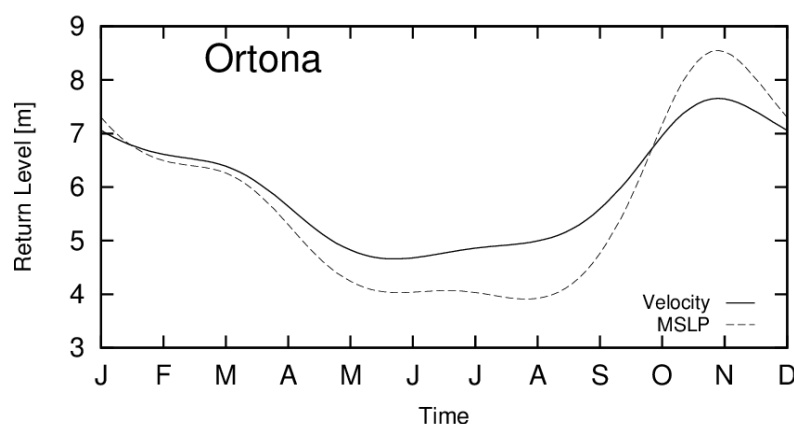


Figura 7. Variabilità intra-annuale esibita dall'altezza d'onda significativa [m], $T_R = 200$ anni, in funzione della covariata impiegata nel modello non stazionario (U_{10} e $MSLP$). I dati delle variabili meteorologiche derivano dalle simulazioni del modello WRF-ARW. Punto-boua di Ortona.

I risultati ottenuti sono stati analizzati e relazionati alle principali forzanti meteorologiche agenti sul bacino del Mediterraneo. Inoltre è stata sviluppata una procedura di scelta del modello statistico migliore in relazione alla complessità del modello stesso (verosimiglianza e numero di parametri utilizzati).

7 LA STIMA DEL POTENZIALE ENERGETICO DEL MOTO ONDOSO

Un ulteriore ambito in cui i dati di hindcast sono estremamente preziosi è lo sfruttamento delle energie rinnovabili. La disponibilità di informazioni sulle caratteristiche del moto ondoso su periodi sufficientemente lunghi e con una scansione temporale particolarmente fitta, rende possibile la stima del potenziale energetico del moto ondoso e la sua caratterizzazione per un eventuale sviluppo di progetti di sfruttamento di tale risorsa. In quest'ottica sono stati elaborati degli specifici atti a fornire informazioni dettagliate e complete del clima ondoso su tutto il bacino del Mediterraneo. La base di dati così elaborata ha permesso la stima sia delle quantità integrate su tutto il periodo di analisi del moto ondoso, sia su periodi variabili per poter valutare le fluttuazioni stagionali e/o mensili durante il periodo analizzato e estrarre i trend dell'andamento del potenziale ondoso nell'arco di tempo considerato (Figura 8, Besio et al., 2015b). Analisi di dettaglio sono state realizzate in punti specifici delle coste italiane, scelti in base alla distribuzione del potenziale ondoso maggiormente significativo e alla presenza di boe della rete ondometrica nazionale (Alghero e Mazzara del Vallo) e in base ad eventuali progetti portuali di sviluppo futuro che prevedano

l'installazione di apparati per l'estrazione dell'energia del moto ondoso (Genova e Savona). Per queste ultime tre località sono state quindi realizzate delle analisi delle potenzialità dell'estrazione del moto ondoso in funzione della potenza effettivamente estraibile tenendo in conto le caratteristiche del moto ondoso (direzione e persistenza), le prestazioni di eventuali convertitori di energia (Bozzi *et al.*, 2014) e le caratteristiche di installazione degli eventuali convertitori di energia del moto ondoso (Figura 9, De Santis *et al.*, 2015).

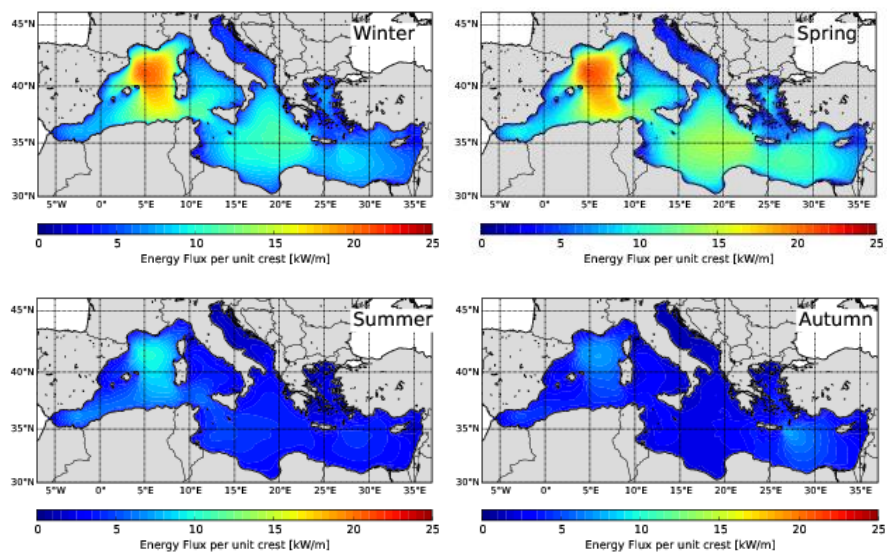


Figura 8. Stime stagionali del flusso di energia del moto ondoso nel bacino del Mediterraneo (periodo 1979-2014)

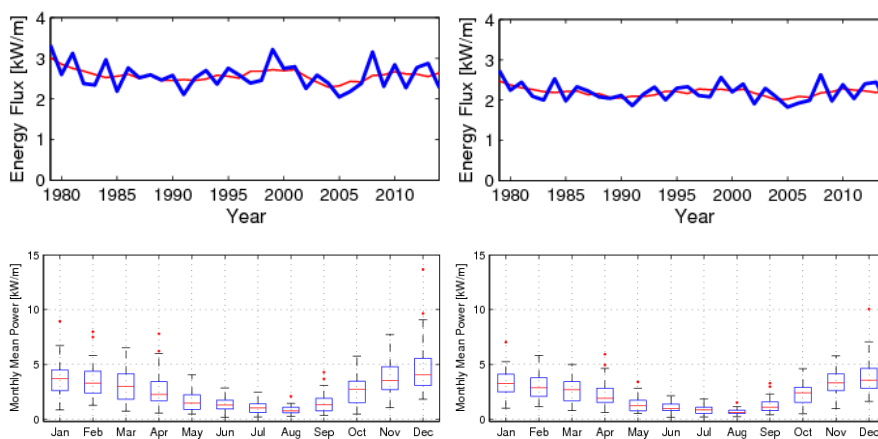


Figura 9. Potenziale energetico del moto ondoso per Genova (colonna sinistra) e per Savona (colonna di destra)

8 CONCLUSIONI

La possibilità di poter sviluppare e ottimizzare dei modelli numerici per la descrizione della dinamica delle variabili meteo-marine è di grande interesse per l'ingegneria offshore e marittima sia da un punto di vista scientifico che da un punto di vista prettamente pratico. La disponibilità di dati affidabili per la pianificazione e la gestione delle attività produttive nella fascia costiera e al largo, permette infatti una maggiore efficienza in termini di risorse e di livelli di sicurezza. L'utilizzo di tali informazioni deve comunque rimanere subordinata ad un attento utilizzo degli strumenti numerici che non deve prescindere dall'osservazione e studio dei processi naturali e dalla validazione e verifica dei risultati ottenuti con confronti con le misure di campo ed eventualmente con prove sperimentali di laboratorio.

Ringraziamenti. Gli autori ringraziano Andrea Mazzino del DICCA per le risorse computazionali messe a disposizione nell'ambito del progetto RITMARE per l'elaborazione dell'hindcast 1979-2014. L'attività di ricerca di L. Sartini è stata supportata dal Progetto Europeo PO CROFSE 2007/13. Le ricerche di F. Cassola e L. Mentaschi sono state finanziate nell'ambito dei Progetti di Ricerca di Ateneo dell'Università di Genova.

BIBLIOGRAFIA

- Arduin, F., Rogers, E., Babanin, A.V., Filipot, J., Magne, R., Roland, A., van der Westhuysen, A., Queffeuilou, P., Lefevre, J., Aouf, L., Collard, F. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration, and validation RID A-1364-2011. *J. Phys. Oceanogr.* 40 (9), 2010, 1917–1941
- Babanin, A.V., Young, I.R. and Banner, M.L. Breaking probabilities for dominant surface waves on water of finite constant depth. *Journal of Geophysical Research* 106, 2001
- Besio, G., Donini, L., Gallino, S., Onorato, L. A prompt index for sea storm hazards. *Proceeding of SCACR2015*, Florence, Italy, 2015a
- Besio, G., Mentaschi, L., Mazzino, A. Wave resource assessment in the Mediterranean basin based on an hourly 32-years hindcast dataset. *Under revision on Renewable Energy*, 2015b
- Bove, M.C., Brotto, P., Cassola, F., Cuccia, E., Massabò, D., Mazzino, A., Piazzalunga, A. & Prati, P. An integrated PM2.5 source apportionment study: Positive Matrix Factorization vs. the chemical transport model CAMx. *Atmos. Environ.*, 2014, 94, pp. 274-286
- Bozzi, S., Archetti, R., Passoni, G. Wave electricity production in Italian offshore: a preliminary investigation. *Renewable Energy*, 2014, 62, pp. 407-416.
- Cassola, F., Ferrari, F. & Mazzino, A. Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: sensitivity to resolution and intercomparison of different microphysics parameterization schemes. *Atmos. Research*, 2015, Under Revision
- Chen, F. & Dudhia, J. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation, *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129, pp. 569–585
- Chou M.-D. & Suarez, M.J. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, NASA Tech. Memo. 104606, 3, 1994
- De Santis, G., Besio, G., Mentaschi, L. & Mazzino, A. A Preliminary wave energy exploitation assessment in the Northern Tyrrhenian Sea. Oceans MTS/IEEE Proceedings, Genova, 18-21 May
- Environmental Modeling Center. The GFS Atmospheric Model. NCEP Office Note 442. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2003

- Hasselmann, K.. On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping, *Bound.-Layer Meteor.*, 1974, 6, 107-127
- Hasselmann, S., Hasselmann, K.. Computations and parametrizations of the non linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. i: a new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *J. Phys. Oceanogr.*, 1985, 15 (11), 1369–1377
- Janjic, Z.I. Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, No. 437, 2002
- Kain, J.S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteor.*, 2004, 43, pp. 170-181
- Mlawer, E.J. , Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J. & Clough, S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102, 16663-16682.
- Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. (2013) Problems in RMSE-based wave model validations. *Ocean Modelling*, 72, pp. 53-58.
- Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. (2015) Performance evaluation of WavewatchIII in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, In Press.
- Miles, J.W. On the generation of surface waves by shear flows. *J. Fluid Mech.*, 1957, 3
- Phillips, O.M. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in 831 wind-generated gravity waves. *J. Fluid Mech.*, 1985, 156, 505–531
- Pierson, W.J., G. Neumann, and R.W. James. Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. Technical report, H.O. Pub. 603, US Navy Hydrographic Office, Washing-ton, DC, 1955
- Saha, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, 91, 1015–1057
- Sartini, L., Cassola, F., Besio, G. Extreme waves seasonality analysis: an application in the Mediterranean Sea. *Under revision on Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2015b
- Sartini L., Mentaschi L. & Besio G. Comparing different extreme wave analysis models for wave climate assessment along the Italian coast. *Coastal Engineering*, 2015a, 100, pp. 37-47
- Sartini, L., Mentaschi, L. & Besio, G. Sub-mesoscale wave height return levels on the basis of hindcast data: the North Tyrrhenian Sea. *Coastal Engineering Proceedings*, 2014, 1(34), 13 pp
- Skamarock, W.C., Kemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W. & Powers, J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Centre for Atmospheric Research, Boulder, USA, 2008.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., & Sallenger, A.H. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 2006, 53(7), 573-588.
- Thompson, G., Rasmussen, R.M. & Manning, K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, 132, 519-542.
- Tolman, H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCHIII version 4.18. Technical Report. NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2014.