

EVOLUZIONE DEI DATI ONDAMETRICI E DETERMINAZIONE DEL CLIMA ONDOSO DI PROGETTO

*F. Dentale^{***}, F. Reale^{***}, G. Nardone^{***}, E. Pugliese Carratelli^{***}*

^{*}C.U.G.RI. (Consorzio inte-Universitario Grandi Rischi)

^{**}MEDUS (Maritime Engineering Division University of Salerno) - Dip. Ing. Civile

^{***}ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

SOMMARIO

La correttezza della progettazione delle opere costiere ed off-shore dipende in maniera essenziale dall'affidabilità delle metodologie di valutazione del clima ondosso; e poiché le esigenze legate allo sviluppo della tecnica ed alla protezione dell'ambiente sono in continua crescita, egualmente deve crescere la qualità ed il numero di dati disponibili.

Per tali scopi è ormai comune il ricorso all'impiego di serie storiche ottenute attraverso modelli spettrali di ricostruzione del moto ondosso a partire dai dati di vento meteorologici, ciò può dare l'impressione di una diminuita importanza dei rilievi di campo; al contrario, come ben sa chi opera nel settore, l'uso dei modelli richiede un sistematico ricorso ai dati sperimentali, indispensabili per la calibrazione e la verifica. L'uso indiscriminato dei dati di modello per la valutazione dei valori estremi può indurre errori rilevanti, soprattutto nei mari chiusi come il Mediterraneo: da una parte l'affidabilità dei modelli meteorologici - motore principale della generazione sintetica del moto ondosso - in situazioni topografiche ed orografiche complesse è minore rispetto a quella che si può ottenere negli oceani; dall'altra è possibile che nelle elaborazioni statistiche i valori estremi di altezza d'onda vengano sottovalutati, soprattutto perché l'intensità delle mareggiate è soggetta a variazioni di breve periodo che male vengono rappresentate dai modelli (Pugliese Carratelli et al., 2012a; Reale et al., 2014). L'incremento e l'ottimizzazione delle misure resta perciò la via principale per migliorare la qualità della stima del clima marittimo.

Il presente lavoro dunque illustra, con particolare riferimento ai mari italiani, quali sono le realtà e le linee di tendenza della misura dello stato d'agitazione del mare, e come esse possono essere impiegate in sinergia con i risultati dei modelli.

1. Misure

1.1 Rilievi in sito - le metodologie disponibili

È ben noto a tutti gli operatori del settore che la fonte primaria di dati è costituita dalle boe ondamiche: galleggianti ancorati in maniera elastica al fondo seguono la superficie del mare e ne misurano sia l'elevazione istantanea sia gli spostamenti nel piano orizzontale. Lo strumento quasi universale per questa misura è l'accelerometro, anche se esistono alcuni sistemi che utilizzano invece apparati GPS. I sistemi di bordo delle boe sono ormai in grado di compiere tutte le elaborazioni più comuni (determinazione delle onde, calcolo dei parametri statistici, analisi spettrale, etc.); la durata dell'intervallo di raccolta dei dati che una volta era trioraria, ora è diventata quasi universalmente di 20 - 30' (il minimo perché le elaborazioni statistiche abbiano senso). Per quanto riguarda la trasmissione dati, si va dall'uso di ponti radio dedicati, all'impiego della rete GSM, all'uso dei satelliti Iridium. La scelta tra questi sistemi dipende dal bilancio tra costi e vincoli fisici ed amministrativi: l'impiego della rete GSM è il più conveniente dal punto di vista economico, ma è limitato dalla distanza dalla costa; la comunicazione satellitare è la più costosa, ma anche quella di più semplice gestione. Un compromesso possibile è quello di trasmettere per via satellitare i soli dati essenziali ai fini della previsione e delle analisi mentre i dati di maggior dettaglio (la storia temporale degli spostamenti verticali ed orizzontali) sono conservati a bordo della boa per essere poi scaricati in occasione delle operazioni di manutenzione.

A tal proposito è bene considerare che i dati di dettaglio non sono solo utili ai fini di ricerca, ma sono uno strumento di verifica della funzionalità della rete di misura. A titolo di esempio si riporta nel seguito (Fig. 1) l'analisi di una mareggiata verificatasi all'inizio di dicembre 2013 a largo di Crotona e registrata dalla locale boa ondometrica della Rete Ondometrica Nazionale gestita dall'ISPRA.

I dati sono quelli elaborati dal software di bordo della boa sul segnale originale a 4 Hz. Si nota chiaramente che mentre i valori di H_s sono abbastanza regolari, alcuni valori relativi all'altezza massima H_{max} di ciascuno stato di mare sono stranamente alti. Il valore vero di H_{max} tuttavia si può ottenere solo attraverso un'attenta analisi dei dati "grezzi", e cioè dell'altezza istantanea d'acqua η .

Le rielaborazioni, svolte fuori linea attraverso la procedura di zero-down-crossing sui dati di elevazione ricampionati a 1.28 Hz acquisiti in telemetria (Fig. 2), hanno dimostrato che è possibile analizzare puntualmente i valori anomali per verificare che non siano artefatti dell'algoritmo di bordo; per l'evento in esame è risultato che per tutti gli intervalli dove i dati erano completi, le onde si distribuivano regolarmente secondo la distribuzione di Rayleigh confermando, quindi, nessuna onda "anomala".

Appare evidente da questo ed altri esempi che per quanto possano essere aggiornate e sofisticate le procedure di raccolta e trasmissione dati in tempo reale, è sempre necessario archiviare e rendere disponibili tutti gli elementi per le analisi e verifiche successive.

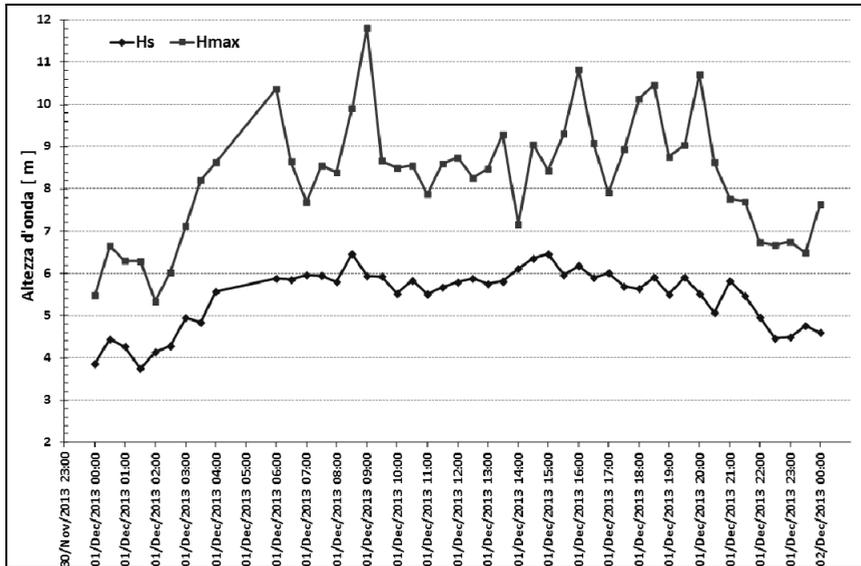


Fig. 1 - Confronto tra valori dell'altezza significativa H_s (in blu) e dell'altezza d'onda massima H_{max} (in rosso) rilevati e mediati ogni 30' dalla Boa ISPRA di Crotona dalle ore (UTC) 00:00 del 01/12/2013 alle ore (UTC) 00:00 del 02/12/2013

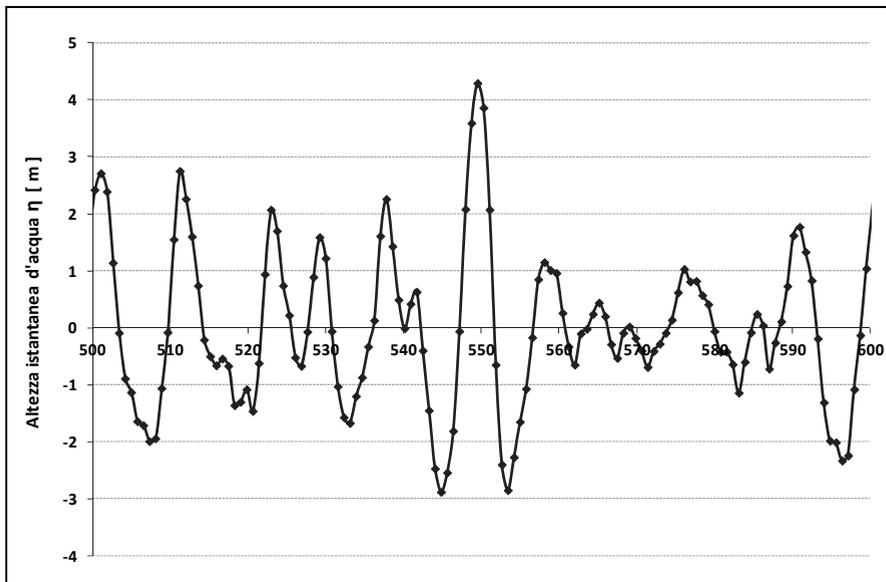


Fig. 2 - Valori dell'altezza istantanea d'acqua rilevati dalla Boa ISPRA di Crotona alle ore (UTC) 20:00 del 01/12/2013

Restano ancora da evidenziare le tendenze evolutive della tecnologia delle boe: se si paragonano gli ondametri accelerometrici più diffusi qualche anno fa con quelli più recenti, si vede che da una parte si stanno rendendo disponibili boe sempre più piccole ed economiche con diametri dell'ordine dei 30-35 centimetri; dall'altra trovano applicazione boe assai più grandi e complesse in grado di fornire dati non solo sul moto ondoso ma anche sulle correnti, la temperatura dell'aria e dell'acqua e la velocità del vento (Fig. 3a).

Altri sistemi di misura in situ possono essere installati sia su pali, a loro volta infissi nel fondo marino (Fig. 3b)), sia semplicemente poggiati sul fondo, come ad esempio i correntometri (Fig. 3c)).

L'impiego di strutture fisse presenta alcuni vantaggi, in particolare la possibilità di produrre dati su fenomeni di bassa frequenza (set-up, storm surge); tuttavia il grande costo dell'installazione e l'ovvio limite di essere realizzabili solo su bassi fondali ne limita fortemente l'utilità. Vale la pena di notare che in molti casi le piattaforme petrolifere sono dotate di strumenti di misura con caratteristiche simili a quelle installate su palo e, quindi, potenzialmente utili agli scopi progettuali.

Quanto agli strumenti da fondo, anche essi utilizzabili solo su bassi fondali, il loro uso è prevalentemente limitato agli studi portuali e locali, e hanno scarse applicazioni per le indagini climatiche, poiché è difficile garantire la manutenzione ed il recupero dei dati da uno strumento subacqueo per un tempo abbastanza lungo.

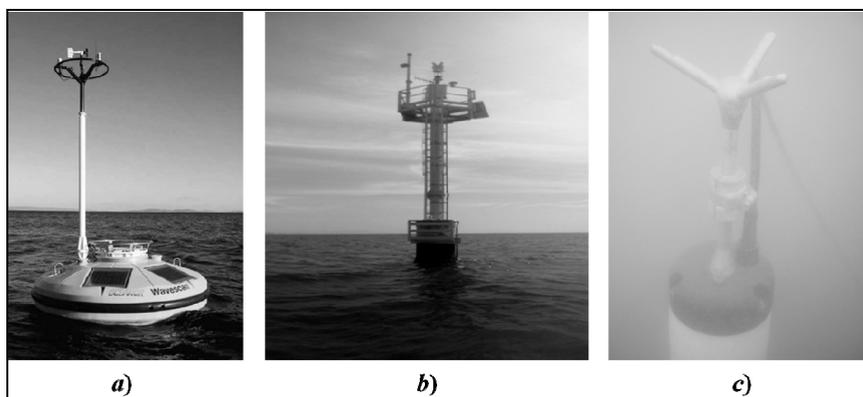


Fig. 3 - *Diversi sistemi di misura in situ: a) boa (Protezione Civile Campania); b) palo (Protezione Civile Campania); c) correntometro subacqueo (C.U.G.RI.)*

1.2 Rilievi in sito - la pratica operativa

La gestione degli ondametri è assai complessa e costosa, al punto che solo enti pubblici di dimensioni adeguate possono garantire un servizio continuo; l'esempio più evidente è naturalmente costituito dalla Rete Ondametrica Nazionale, gestita attualmente dall'ISPRA. Essa è ad oggi basata su 15 boe ondametriche dislocate lungo le coste italiane così come riportato in figura 4.

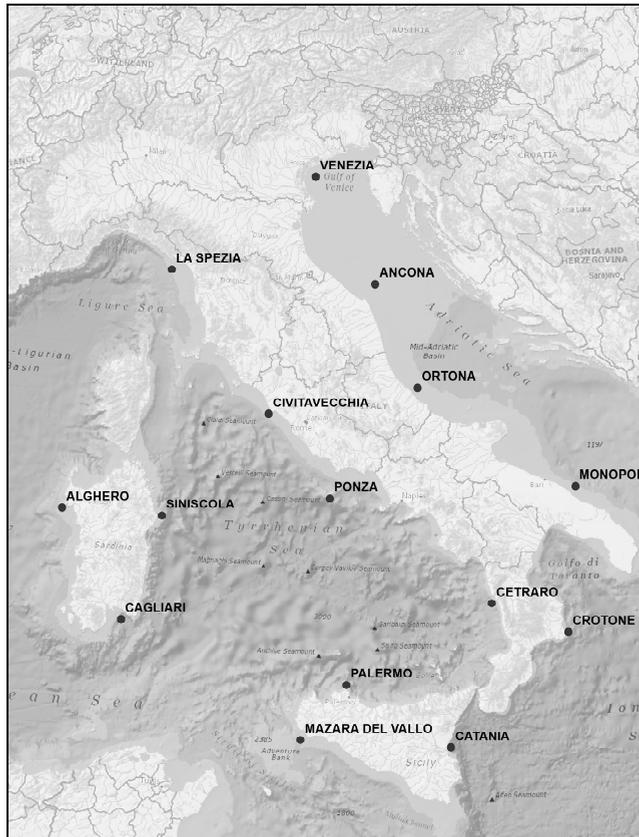


Fig. 4 - *Dislocamento attuale lungo le coste italiane delle boe costituenti la Rete Ondametrica Nazionale (ISPRA)*

L'archivio di dati prodotto nel corso degli anni, per otto stazioni di misura a partire dal 1989, è imponente, anche secondo gli standard internazionali, e costituisce la principale risorsa per la valutazione del clima ondoso e quindi per la progettazione delle opere e degli interventi di sistemazione.

In Italia esistono poi varie altre realtà: in momenti diversi vari enti locali in regioni quali la Calabria, la Puglia, la Campania, la Toscana, la Liguria, l'Emilia Romagna ed in qualche caso anche le province, come quella di Salerno, hanno realizzato delle piccole reti ondametriche autonome (Pugliese Carratelli et al., 2007). L'utilità di questi sistemi è indiscutibile, soprattutto per integrare la Rete Ondametrica Nazionale, in particolar modo nelle zone dove la morfologia della costa è più complessa. Lo stesso si può dire delle boe e dei sistemi di misura gestiti da enti di ricerca, allo scopo primario di verificare e sviluppare le tecniche di misura: vale la pena di ricordare che la prima boa "pubblica" in Italia fu installata e gestita per alcuni anni a partire dal 1985 dall'allora Istituto Universitario Navale, oggi Parthenope (Pugliese Carratelli e Sansone, 1987). Esistono altre apparecchiature in funzione, tra cui varie mede, piattaforme e boe

CNR (www.ismar.cnr.it/area-riservata/verbali/allegati-ai-verbali-del-cdi/Rete%20osservativa%20ISMAR.pdf) ma le difficoltà di carattere economico, gestionale ed autorizzativo rendono estremamente difficile la conduzione di queste iniziative.

1.3 Rilievi a distanza - la pratica operativa

I termini “rilievo a distanza” o “telerilevamento” del moto ondoso comprendono varie tecnologie, tutte basate sull’uso di radar, con diversi livelli di maturità tecnologica e di diffusione.

La tecnologia di gran lungo più diffusa è quella dell’altimetro satellitare: si tratta di un radar azimutale che permette il rilievo dell’altezza significativa del moto ondoso, ed in qualche misura anche della velocità del vento, attraverso l’analisi del segnale elettromagnetico riflesso su di un’area (footprint) di alcuni chilometri di diametro in corrispondenza della verticale del passaggio - il quale avviene a grande velocità (circa 7 km/s). Esso è lo strumento più importante per la pratica da parte degli uffici meteorologici e degli enti operativi. Le caratteristiche di questi satelliti (quota, inclinazione dell’orbita rispetto all’asse equatoriale terrestre, velocità, etc.) permette loro di compiere un giro completo della Terra in circa 100 minuti e di ripercorrere la stessa zona ad intervalli di tempo prefissati dell’ordine dei giorni (ciclo).

La teoria è piuttosto complessa, ed è esposta, a diversi livelli di completezza in Della Rocca e Pugliese Carratelli (2000), Chelton et al. (2001), Vignudelli et al. (2011).

I satelliti di questo tipo sono gestiti da diverse agenzie spaziali tra cui l’ESA, la NASA, l’Agenzia Spaziale Francese (CNES) e l’Agenzia Spaziale Indiana (ISRO). Informazioni più dettagliate sulle varie missioni altimetriche di queste agenzie si possono trovare sui loro rispettivi siti. La copertura spaziale è adeguata (ad esempio, in figura 5 è rappresentata la copertura spaziale dei satelliti Envisat

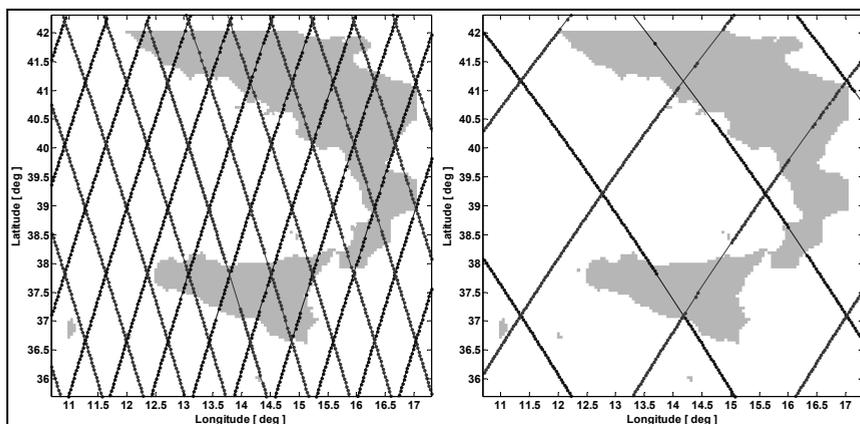


Fig. 5 - Copertura spaziale sul Tirreno degli altimetri satellitari Envisat (sinistra) e Jason-2 (destra). In rosso i passaggi ascendenti (da Sud verso Nord); in blu i passaggi discendenti (da Nord verso Sud)

e Jason-2 sul Tirreno) ma, almeno per il momento, la frequenza di osservazione è insufficiente sia ai fini del preallarme di eventi eccezionali (il passaggio sullo stesso punto si ripete come detto a distanza di diversi giorni) sia come dato di base da utilizzare per la caratterizzazione del paraggio di interesse. I dati satellitari hanno invece un ruolo fondamentale per la calibrazione e la messa a punto dei modelli di cui si discuterà brevemente nel seguito.

Il ciclo nel primo caso è di 35 giorni, nel secondo di circa 10 (per la precisione 9.9156 giorni). Come si vede, una frequenza maggiore si paga con una minore densità spaziale dei passaggi. Nella tabella 1 è riportato un riepilogo delle principali missioni altimetriche satellitari dal 1995 ad oggi.

Agenzia	Satellite	Quota media [km]	Incl. orbita [° antior.]	Ciclo [giorni]	Inizio Missione	Fine missione
ESA	ERS-2	785	98.52	35	Apr 1995	Lug 2011
ESA	Envisat	800	98.55	35	Mar 2002	Mag 2012
ESA	CryoSat-2	717	92	369	Apr 2010	Operativa
CNES + NASA	Jason-1	1336	66	9.9156	Dic 2001	Lug 2013
CNES + NASA + NOAA + EUMETSAT	Jason-2	1336	66	9.9156	Giu 2008	Operativa
CNES + ISRO	SARAL	800	98.55	35	Feb 2013	Operativa

Tab. 1 - Riepilogo di alcune delle principali missioni altimetriche satellitari dal 1995 ad oggi

Dalla tabella 1 si evince che gli altimetri satellitari attualmente operativi sono soltanto 3 (Cryosat-2, Jason-2 e SARAL), a questi si aggiungeranno a breve i nuovi satelliti Sentinel-3 e Jason-3, entrambi dotati di radar altimetrici di ultima generazione, il cui lancio è previsto entro la fine del 2015.

I dati così raccolti, su un periodo che è ormai di oltre 20 anni, sono generalmente disponibili pubblicamente, e sono stati oggetto di una quantità enorme di lavori scientifici, alcuni dei quali proprio rivolti alla determinazione di parametri del clima ondoso (valori massimi, medi etc.). Si veda per esempio Cavaleri (2005) e Pugliese Carratelli et al. (2012b).

Un altro sistema radar satellitare di grande importanza è il SAR (“Synthetic Aperture Radar”) spesso presente sugli stessi satelliti dotati di altimetro (è il caso ad esempio dei satelliti ERS-2 ed Envisat dell’ESA). Differentemente dall’altimetro radar, il SAR è un radar ad immagini in grado di coprire ampie aree (dell’ordine dei 100 x 100 km) della superficie terrestre. Il SAR offre molto meno rispetto agli altimetri alla pratica dell’ingegneria marittima, almeno per i mari di estensione limitata come il Mediterraneo; esso presenta però il grande

vantaggio di fornire un quadro di insieme su una vasta area e di evidenziare con efficacia visiva una serie di fenomeni di grande interesse per la comprensione dei fenomeni marini, ma non fornisce per ora valutazioni abbastanza accurate e frequenti dei valori di altezza significativa (Pugliese Carratelli et al., 2005).

1.4 Rilievi a distanza - Radar basati a terra o su navi

Una nuova promettente tecnologia è quella dei sistemi radar basati a terra; due diverse tecnologie promettono di diventare uno strumento utile per i rilievi di moto ondoso: i radar in banda HF, e quelli in banda X o L.

I sistemi in banda HF¹ nati originariamente per la misura di correnti superficiali, forniscono elementi anche sull'altezza d'onda, ma sono molto più complessi e costosi. Dal punto di vista del progetto e della gestione delle opere costiere, la loro utilità è ancora limitata.

I sistemi in banda X sono relativamente semplici e poco costosi, ed hanno maggiori potenzialità come strumento di monitoraggio del moto ondoso (Serafino et al., 2012). Al momento le loro misure sono influenzate negativamente dalla pioggia, ma esistono concrete prospettive di miglioramento, grazie anche all'adozione di tecnologie di analisi Doppler dell'energia elettromagnetica riflessa. Essi comunque stanno dimostrando fin d'ora la loro efficacia come strumento di sorveglianza e sicurezza della navigazione in vicinanza dei porti. La figura 6 ne illustra una tipica applicazione nell'area antistante il porto di Salerno (Ludeno et al., 2015).

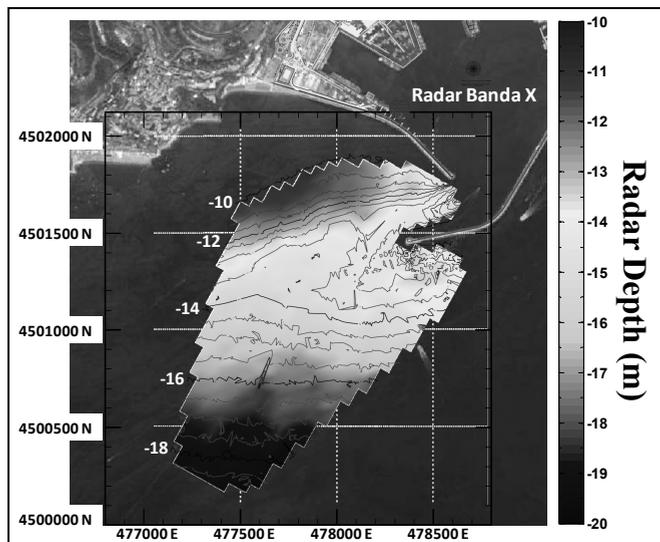


Fig. 6 - Esempio di applicazione di un radar in banda X nell'area antistante il Porto di Salerno (da Ludeno et al., 2015)

¹ HF High Frequency; nonostante il nome, la frequenza è assai minore di quella dei radar in banda x

1.5 I modelli - la pratica operativa

La pratica ormai quasi universale, nei casi dove non sono disponibili dati storici registrati da ondometri, è il ricorso all'uso di dati prodotti da modelli numerici del moto ondoso. Per questi modelli esiste un'amplessissima letteratura che ne descrive la teoria e l'implementazione ormai consolidate: si veda per esempio Janssen (2004) e Al Ragum et al. (2009).

Ciascuna delle componenti spettrali e direzionali dell'energia, viene considerata separatamente: per ogni punto dello spazio di coordinate (x,y) , per ogni istante temporale t , per ogni valore della frequenza f e della direzione θ si considera $E(x,y,t,f,\theta)$, energia di ciascuna componente dello spettro direzionale del moto ondoso; vengono ovviamente considerati intervalli finiti per f e θ , oltre che per le variabili spaziali e temporali x , y e t .

Per ciascuna di tali componenti si ha un bilancio dell'energia² E dato da un'equazione del tipo³:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \vec{C}_g E = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (1)$$

Il termine a sinistra è abbastanza chiaro: è la variazione di energia rispetto ad un osservatore fisso, divisa in due termini: quella temporale locale, più quella convettiva; il ruolo che nelle equazioni di bilancio classiche è giocato dalla velocità, qui spetta alla celerità delle onde, o meglio alla celerità di gruppo. La parte a destra dell'equazione è data da un certo numero di termini "sorgente" S , che vengono calcolati attraverso funzioni più o meno empiriche. In particolare S_{in} è l'input di energia, che per ciascuna direzione e componente spettrale è funzione delle velocità del vento. Esso deriva infatti dallo sforzo che il vento esercita sulle onde: prevale (a parità di altezza) nelle alte frequenze e inoltre diminuisce con la celerità delle onde. Un dato indispensabile è quindi il valore del vento U_{10} alla quota di 10 metri sul livello del mare, che è fornito regolarmente dalle previsioni meteorologiche.

La matematica è complessa ma il senso fisico è chiaro: l'energia può spostarsi da una direzione all'altra (ad esempio rifrazione) e da una lunghezza d'onda all'altra (shoaling).

Esistono diversi sistemi software (ormai giunti alla cosiddetta terza generazione) che implementano questi modelli: forse il primo, e più diffuso, è il WAM (The WAMDI Group, 1988; Komen et al., 1994); un software abbastanza simile il WAVEWATCH III (Tolman, 2014) va prendendo piede, ed è impiegato tra l'altro dalla NOAA; lo SWAN (Booij et al., 1999), modello per acque basse, è largamente usato soprattutto per applicazioni locali. Tutti questi sistemi vengono costantemente modificati ed aggiornati, ma comunque la qualità dei risultati dipende essenzialmente dalla catena modellistica meteo-oceanografica che

² Nella maggior parte delle trattazioni si parla di Azione e non di Energia; ma l'approccio è equivalente, ed è di più facile comprensione

³ L'operatore divergenza è qui generalizzato per estendersi alle variabili f,θ

comprende modelli globali e regionali; solo grandi servizi meteorologici inter-internazionali (ECMWF) e nazionali (NOAA, UKMO) sono quindi in grado di fornire un servizio completo.

I dati altimetrici satellitari di cui si è discusso prima vengono impiegati in maniera sistematica sia per fornire ai modelli valori affidabili da cui iniziare o correggere i calcoli (“assimilazione” dei dati) sia per verificarne a posteriori l’affidabilità (calibrazione). I valori del moto ondoso sui punti della griglia di calcolo vengono poi archiviati - solitamente ad intervalli di 1 o 3 ore: si può quindi accedere a serie molto lunghe di dati “sintetici” cioè calcolati e poi calibrati. Queste serie sono una base per gli studi del clima marittimo, specialmente per le località dove non sono disponibili misure ondometriche. Negli ultimi anni anche molte società private sono entrate nel mercato e forniscono elaborazioni più o meno complesse.

Il CNMCA (Centro Meteorologico dell’Aeronautica Militare) in collaborazione col CNR-ISMAR di Venezia ha implementato un proprio modello (“Nettuno”) per l’intero bacino del Mediterraneo (30° ÷ 46° N; 6° ÷ 36.25° E) ormai operativo dal 2009.

Si tratta di un WAM ad alta risoluzione spaziale (dimensioni della griglia 3’x 3’) il cui input di vento è fornito dal modello meteorologico “regionale” (l’intera Europa) COSMO-ME (la cui risoluzione spaziale è a sua volta di circa 7 km). Le condizioni al contorno della parte meteorologica provengono dal modello meteorologico dell’ECMWF. Lo stesso CNMCA ha sviluppato un’ulteriore versione del modello Nettuno ancora a più alta risoluzione spaziale (dimensioni della griglia 1’x 1’) per un’area ristretta intorno all’Italia (34.5° ÷ 45.95° N; 5° ÷ 19.5° E) il cui input di vento è fornito dal modello meteorologico locale COSMO-IT (risoluzione spaziale circa 2 km) innestato a sua volta sul modello regionale COSMO-ME.

Una descrizione dell’intero sistema la si può trovare alla pagina web: http://ricerca.ismar.cnr.it/MODELLI/ONDE_MED_ITALIA/comunicato.html e in Bertotti et al. (2010).

Un sistema analogo è da qualche tempo in servizio presso l’ISPRA (Inghilesi et al., 2012):

http://www.isprambiente.gov.it/pre_mare/coastal_system/maps/first.html.

Per le coste del basso Tirreno può essere particolarmente utile il modello gestito dall’Università Parthenope, le cui condizioni al contorno meteorologiche provengono dal modello NOAA:

http://ccmma.uniparthenope.it/misc/Agrillo_e4hpcws2012.pdf

<http://ccmma.uniparthenope.it/?q=forecast/wave>

Tuttavia, specialmente in mari chiusi come il Mediterraneo, non è opportuno affidarsi completamente ad elaborazioni modellistiche ed algoritmi automatici.

Esistono infatti numerose possibili cause di errore che possono influenzare i risultati, specialmente riguardo ai valori estremi.

È ovvio, per esempio, che se la durata o la dimensione spaziale di un fenomeno meteorologico è più piccolo degli intervalli di campionamento delle

procedure di calcolo, la stima della probabilità è certamente distorta: questo specialmente nelle aree costiere dove gli effetti locali dell'orografia e dei gradienti di temperatura sono molto rilevanti (Pugliese Carratelli et al., 2012a; Reale et al., 2014).

Inoltre la risoluzione dei modelli globali o di area può non essere adeguata per certe situazioni, specialmente in vicinanza di coste dalla conformazione complessa. Per questo motivo è spesso possibile migliorare la risoluzione dei dati e soprattutto la qualità della batimetria e dei dati di calibrazione, inserendo un modello con passo di calcolo più piccolo all' interno della griglia del modello globale, prendendo da questo le condizioni al contorno e iniziali.

Ringraziamenti. Gli Autori sono grati all'ISPRA, al Dipartimento di Protezione Civile della Regione Campania ed al CNMCA (Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica) per la fornitura di dati, le utili discussioni e la continua assistenza nel corso di molti anni di lavoro in collaborazione.

I dati di altimetro satellitare provengono dal sito RADS (Radar Altimeter Database System) e dall'ESA (European Space Agency) attraverso il Progetto ESA/EO 1172 "Remote Sensing of Wave Transformation".

Il C.U.G.RI. (Consorzio inter-Universitario per la previsione e prevenzione dei Grandi Rischi, ha contribuito finanziariamente ed attraverso l'accesso ai propri dati.

Bibliografia

1. Al Ragum A., Reale F., Pugliese Carratelli E., Rakha K.A., Giarrusso C.C. (2009) *Satellite Altimeter Calibration of a Wave Model in Arabian Gulf* - 4th SCACR International Short Conference on Applied Coastal Research, Barcelona, Catalonia, 15 – 17 giugno 2009
2. Bertotti L., Cavaleri L., De Simone C., Torrisi L., Vacino A. (2010) *Il sistema di previsione del mare NETTUNO* - Rivista di Meteorologia Aeronautica, Anno 70, No. 1, gennaio-marzo 2010
3. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. (1999) *A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation* - J. Geophys. Res. Vol. 104, n. C4, pp. 7649-7666
4. Cavaleri L. (2005) *The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea - the calibration phase* - Adv. in Geosc. Vol. 2, pp. 255-257
5. Chelton D.B., Ries J.C., Haines B.J., Fu L.-L., Callahan P.S. (2001) *Satellite altimetry* - Capitolo 1 in *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications* - Academic Press, San Diego, California, USA
6. Della Rocca M.R. e Pugliese Carratelli E. (2000) - *A Model for Wind Speed and Wave Height Retrieval from Radar Altimeter Measurements* - in ERS-Envisat Symposium, Gothenburg - Svezia, 16-20 ottobre 2000
7. Inghilesi R., Catini F., Bellotti G., Franco L., Orasi A, Corsini S. (2012) *Implementation and validation of a coastal forecasting system for wind waves in the Mediterranean Sea* - Nat. Hazard Earth Syst. Sci. Vol. 12, pp. 485-494
8. Janssen P. (2004) - *The Interaction of Ocean Waves and Wind* - Cambridge University Press, Cambridge, UK

9. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Jansen P.A.E.M. (1994) - *Dynamics and Modelling of Ocean Waves* - Cambridge University Press, Cambridge, UK
10. Ludeno G., Reale F., Dentale F., Pugliese Carratelli E., Natale A., Soldovieri F., Serafino F. (2015) *An X-Band Radar System for Bathymetry and Wave Field Analysis in a Harbour Area* - Sensors Vol. 15, n.1, pp. 1691-1707
11. Pugliese Carratelli E. e Sansone E. (1987) - *Rilievi Ondametrici nel Golfo di Napoli* - Annali Istituto Universitario Navale Vol. LV
12. Pugliese Carratelli, E., Giarrusso C.C., Spulsi G. (2005). *Analisi delle immagini da SAR satellitare sul mare* - Atti del 26° Corso Di Aggiornamento in Tecniche per la Difesa dall’Inquinamento, BIOS, Cosenza
13. Pugliese Carratelli E., Budillon G., Dentale F., Napoli F., Reale F., Spulsi G. (2007) *An experience in monitoring and integrating wind and wave data in the Campania Region* - Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 48, n. 3, pp. 215-226
14. Pugliese Carratelli E., Dentale F., Reale F, Torrisi L. (2012a) *Satellite Altimeter Data to Improve the Understanding of Wave Storm Statistics* - 8th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries -COPDEC, Chennai, India, 20-24 febbraio 2012
15. Pugliese Carratelli E., Dentale F., Reale F., Spulsi G., Torrisi L. (2012b) - *Rilievo da satellite dello stato del mare* - Tecniche per la Difesa dall’Inquinamento 33° Corso - EdiBios, Cosenza
16. Reale F., Dentale F., Pugliese Carratelli E., Torrisi L. (2014) *Remote Sensing of Small-Scale Storm Variations in Coastal Seas* - J. Coastal Res. Vol. 30, n. 1, pp. 130-141
17. Serafino F., Lugni C., Ludeno G., Arturo D., Uttieri M., Buonocore B., Zambianchi E., Budillon, G., Soldovieri, F.(2012) *REMOCEAN: A Flexible X-Band Radar System for Sea-State Monitoring and Surface Current Estimation* - IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. Vol. 9, n. 5, pp. 822-826
18. The WAMDI Group (1988) *The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model* - J. Phys. Oceanogr. Vol. 18, n. 12, pp. 1775-1810
19. Tolman H.L. (2014) *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18* - NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 316, pag. 194
20. Vignudelli S., Kostianov A.G., Cipollini P, Benveniste J. (2012) - *Coastal Altimetry* - Springer-Verlag Berlin Heidelberg