Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti
Tomo CLXIX (2010-2011) - Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali

IL MODELLO STOCASTICO PER LA PREVISIONE DI MAREA A VENEZIA

Alessandro Tosoni*, Paolo Canestrelli*

Nota presentata dal socio effettivo Alessandro Marani
nell'adunanza ordinaria del 25 settembre 2010

1. *Introduzione*

Il Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, divenuto Istituzione con deliberazione del Consiglio Comunale n° 154 del 13 ottobre 2003, continua, con sempre maggior impegno, l'importante attività nel campo della modellistica previsionale al fine di migliorare l'accuratezza della stima del livello di marea a Venezia, sia nel breve che nel lungo anticipo temporale.

In questa nota viene illustrato il modello auto regressivo, di tipologia esperta, recentemente realizzato presso il Centro Maree ed utilizzato presso il Centro per gestire gli allarmi «acqua alta» anche per anticipi temporali elevati (superiori ai 3 giorni).

Lo schema teorico si rifà ai modelli statistici classici (Box, Jenkins 1970) che hanno portato a risultati interessanti in precedenti studi ai quali rimandiamo il lettore (Goldmann, Tomasi 1971; Mosetti 1971; Canestrelli 1999; Canestrelli, Pastore 2000; Canestrelli, Moretti 2004a, 2004b).

Riteniamo utile ricordare come la marea che si registra in un dato luogo (in questo caso Punta Salute nel Bacino di S. Marco di Venezia) può essere considerata come somma di due componenti ad evoluzione indipendente:

* Istituzione Centro Previsoni Maree, Comune di Venezia, Palazzo Cavalli, S. Marco 4090, Venezia.

- la marea astronomica, governata dall'attrazione lunisolare sulle masse marine;

- il contributo meteorologico, molto più variabile in ampiezza e nel tempo, dovuto alle forzanti meteorologiche (principalmente vento e pressione atmosferica) sull'intero bacino dell'Adriatico.

La prima componente da sola non è in grado di produrre il fenomeno dell'acqua alta a Venezia, mentre il contributo meteorologico è in grado di stravolgere l'andamento della marea astronomica e originare, anche da sola, eventi di inondazione.

Tra le tecniche di previsione impiegate dal Centro Maree un posto centrale è occupato dai modelli statistici di tipo autoregressivo a media mobile per i quali la componente meteorologica è funzione dei valori osservati del contributo meteorologico e della pressione registrata nelle ultime ore presso alcune stazioni italiane ed ex-jugoslave.

Partendo da una base di dati di 25 anni (1966-1990) di marea[1] e pressione[2], sono stati ottenuti i coefficienti di regressione utilizzabili per le previsioni relative a ben 2751 differenti versioni di modelli stocastici, dei quali sono state analizzate caratteristiche, previsioni e statistiche per arrivare ad una sintesi rappresentata dal "Modello esteso esperto Bigsumdp". La scelta dei coefficienti più appropriati all'attuale situazione meteorologica viene effettuata in automatico attraverso un «sistema esperto» che compendia le esperienze acquisite dagli operatori del Centro, operando tra le categorie meteorologiche individuate.

L'elevato grado di affidabilità delle previsioni prodotte dal nuovo sistema, verificato su oltre 3 anni di operatività, e l'acquisizione di nuovi input barici ottenuti grazie ad un accordo con il Servizio Meteorologico ed Idrologico Croato, ci ha spinti ad un aggiornamento dei coefficienti, calibrandoli su un database di 41 anni (1966-2006) di marea e pressione.

---

[1] L'archivio dei livelli orari di marea è consultabile sulle pagine web dell'ICPSM all'indirizzo <http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/25419>.

[2] I dati barici sono stati messi a disposizione dell'ICPSM dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, ma non sono disponibili on-line come stabilito dalla convenzione stipulata fra l'IPCSM ed il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare.

Il modello in uso si basa su 122 parametri ed impiega i dati barici forniti dal Centro Europeo di Reading (E.C.M.W.F.).

L'espertizzazione dei modelli ed il ricorso alle pressioni atmosferiche previste dall'ECMWF ha consentito un sensibile miglioramento nelle previsioni di marea, specialmente in presenza di condizioni meteorologiche che inducono il fenomeno dell'acqua alta. Il criterio applicato nell'individuazione delle diverse situazioni nasce direttamente dall'esperienza accumulata nel corso di oltre 25 anni dai tecnici del Centro Maree. I dettagli relativi all'evoluzione dei modelli usati presso il Centro Maree sono in corso di pubblicazione in un apposito rapporto dal quale risulta anche l'enorme quantità di lavoro svolto dal Centro prima di arrivare alla soluzione attuale.

2. *Il modello*

La necessità di disporre di previsioni attendibili in contesti di rapida evoluzione nel livello di marea e per anticipi temporali anche a lungo termine, ha spinto le ricerche verso strutture in grado di cogliere l'incidenza del fattore meteorologico sull'Adriatico che, per la sua forma stretta e allungata e chiusa nella parte superiore, risente molto della pressione atmosferica e del vento. Nell'ambito dei modelli ARMAX[3] il Centro Maree ha sviluppato un'evoluzione degli schemi classici: il modello completo Bigsumdp.

Il modello completo risulta strutturato con 122 regressori. Impieghiamo gli ultimi 50 livelli orari di marea registrati a Venezia, 4 serie temporali di registrazioni bariche (8 valori triorari di pressione rilevati a Venezia, Alghero, Genova e Bari) e, per cogliere l'influenza del vento sul livello di marea, si introducono i valori relativi al gradiente barico tra stazioni opposte della costa adriatica orientale (Trieste, Pola, Zara, Spalato e Dubrovnik) ed occidentale (Ravenna, Rimini, valore medio tra Falconara e Pescara, Termoli e Bari)[4]. Per meglio cogliere il legame quadratico esistente tra pressione at-

[3] <http://automatica.ing.unibs.it/mco/ms/stocastici/node13.html>.

[4] <http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/2109>.

mosferica e vento, nella formula si considera un valore calcolato come quadrato della differenza barica della coppia di stazioni, inserito con segno positivo se la pressione sulla costa orientale risulta maggiore, negativo altrimenti.

La struttura del modello esperto completo Bigsumdp è la seguente:

$$dh_{(t+\tau)} = a_0^{(\tau)} + \sum_{i=1}^{50} a_i^{(\tau)} \cdot dh_{(t+1-i)} + \sum_{j=1}^{4} \sum_{i=1}^{8} b_{ji}^{(\tau)} \cdot p(st_j)_{(t-(i-1)\cdot 3} + \sum_{j=1}^{5} \sum_{i=1}^{8} c_{ji}^{(\tau)} \cdot dp\,(gr_j)^2_{(t-(i-1)\cdot 3)} \quad (1)$$

dove :

- t è l'istante (espresso in ore) in cui si effettua la previsione;
- τ sono le ore di anticipo con cui si intende calcolare la previsione (da 1 a 48);
- dh_t è la componente meteorologica (marea osservata - marea astronomica) registrata all'istante t;
- $dh_{(t+\tau)}$ è il livello del contributo meteorologico previsto per il tempo t più un numero di ore di anticipo τ;
- $a_0^{(\tau)}$ è il termine costante di regressione;
- $a_i^{(\tau)}$ i=1,2,…, 50; sono i coefficienti relativi alla componente meteorologica di marea registrata a Venezia nelle ultime 50 ore;
- $p(st_j)$ rappresenta il valore di pressione atmosferica registrata nella stazione j-esima (si considerano i dati triorari delle stazioni di Venezia, Genova, Alghero e Bari).
- $b_{ji}^{(\tau)}$ sono i coefficienti relativi alla pressione atmosferica registrata (ogni 3 ore) per 8 volte (fino a 21 ore precedenti) presso le 4 stazioni meteorologiche.
- $dp(gr_j)$ rappresenta la differenza di pressione registrata all'istante indicato e relativa alla coppia di stazioni j (si considerano le coppie TRIESTE-RAVENNA, POLA-RIMINI, ZARA-FALCONARA/PESCARA, SPALATO-TERMOLI, DUBROVNIK-BARI). Si considera il quadrato di tale valore con segno po-

sitivo se la pressione sulla costa orientale risulta maggiore, negativo altrimenti;

- $c_{ji}^{(\tau)}$ sono i coefficienti relativi alla differenza di pressione atmosferica registrata (ogni 3 ore) per 8 volte e relativa alle 5 coppie di stazioni meteorologiche.

3. *Le classi meteorologiche ed i coefficienti di regressione*

In una seconda fase del lavoro l'attenzione è stata incentrata sull'ingegnerizzazione di una struttura esperta capace di elaborare in automatico la situazione meteorologica per fornire previsioni più accurate. Lo schema esperto prevede una partizione del database in sottoinsiemi che raccolgono casi simili, e dai quali si ricavano i coefficienti di regressione. La suddivisione del database nasce dalle seguenti classi stagionali (scelte accorpando mesi con caratteristiche simili per casi di acqua alta registrati dal mareografo di Punta Salute dal 1882 ad oggi):

- ottobre, novembre e dicembre (Stagione 1)
- giugno, luglio e agosto (Stagione 2)
- settembre, gennaio, febbraio, marzo, aprile e maggio (Stagione 3)

secondo il seguente criterio di individuazione del dominio:

- Somma delle differenze di pressione delle stazioni adriatiche: 20 classi (indicate con le lettere da *a* fino a *t*) in cui le rilevazioni sono collocate in base alla massima somma (si confrontano i valori assoluti) delle differenze bariche registrate nelle ultime 21 ore nel medesimo istante (una somma per ogni rilevazione trioraria)

inoltre, considerato che la serie storica della pressione atmosferica ha un passo di 3 ore, mentre il livello di marea è acquisito ogni ora, si è proceduto ad una suddivisione in sottoinsiemi caratterizzati dai seguenti istanti:

- **t** (nessuno sfasamento temporale tra osservazione del livello di marea e aggiornamento del dato di pressione)
- **t+1** (la marea è stata rilevata al momento della previsione, la pressione un'ora prima)

- **t+2** (2 ore di differenza tra il livello osservato dell'acqua e le ultime informazioni disponibili delle stazioni meteorologiche).

La struttura completa esperta vede l'inserimento di nuove tecniche di classificazione dei casi osservati per giungere ad una diversa architettura dei modelli. Riassumiamo le classi meteorologiche dello schema completo esperto (con i casi che le compongono) con la tabella 1.

Tabella 1 - La struttura esperta Bigsumdp e il numero di situazioni bariche osservate.

CLASSE	Massima Somma Differenze di Pressione (hPa)	NUMERO DI CASI OSSERVATI		
		Stagione 1	Stagione 2	Stagione 3
a	dp< -10	410	352	870
b	-10≤dp<-8	798	842	2289
c	-8≤dp<-6	2325	2851	4424
d	-6≤dp<-4	3705	4727	7215
e	-4≤dp<-2	3429	4293	6145
f	-2≤dp<-0	549	660	928
g	0≤dp<2	455	588	766
h	2≤dp<4	3109	3017	5231
i	4≤dp<6	3485	3240	6973
j	6≤dp<8	2807	2576	6050
k	8≤dp<10	1928	1266	4182
l	10≤dp<12	1277	540	2701
m	12≤dp<14	819		1883
n	14≤dp<16	521		944
o	16≤dp<18	339		673
p	18≤dp<20			339
q	20≤dp<22			212
r	dp≥22			335
s	dp≥18	424		
t	dp≥12		409	
Valori Mancanti		*3053*	*3796*	*4815*
TOTALE CASI		18400	18400	36248

Individuare le tecniche più appropriate per scomporre il dominio d'osservazione ottenendo classi distinte su cui calcolare i coefficienti per le previsioni è stata la parte più complessa della ricerca, ma anche quella che ha determinato i progressi più consistenti. In figura 1 possiamo rappresentare schematicamente la creazione e l'impiego della struttura esperta. Abbiamo scomposto l'insieme dei dati a disposizione seguendo più criteri, per meglio cogliere le particolarità proprie di ogni stagione o situazione climatica o istante di rilevazione dei dati; successivamente abbiamo analizzato i sottodomini creati, effettuando molteplici regressioni; infine abbiamo aggregato i risultati, per confrontare tra di loro gli schemi operativi implementati e per verificare la validità delle scelte adottate.

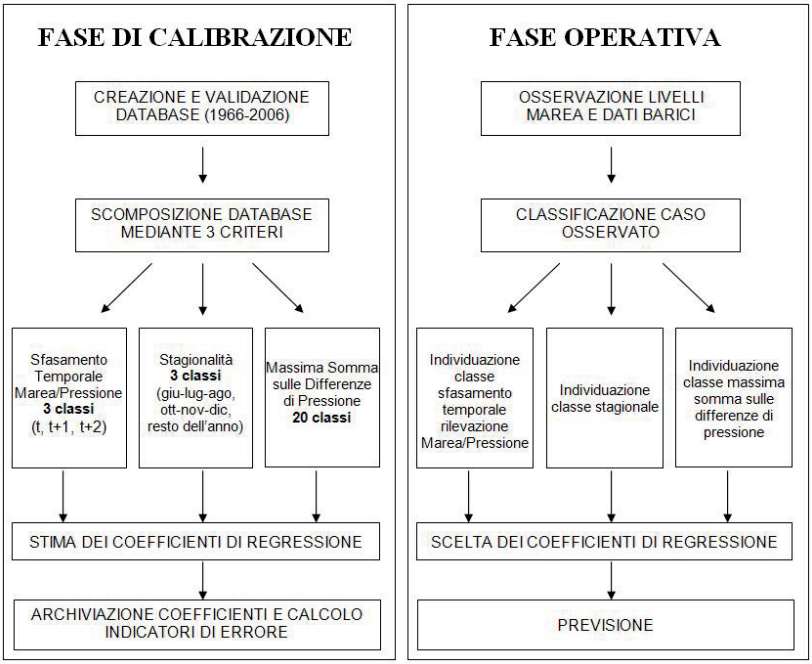

Fig. 1 - Calibrazione ed operatività della struttura esperta Bigsumdp.

4. *Il sistema esperto esteso alla previsione meteorologica*

La struttura esperta completa garantisce previsioni molto accurate a breve termine. Con l'estendersi dell'anticipo temporale è riscontrabile una perdita di accuratezza delle proiezioni del livello di marea, dovuta in gran parte all'impossibilità dei modelli di anticipare completamente le mutazioni meteorologiche in atto. La configurazione completa, che impiega esclusivamente dati osservati, non può verificare cambiamenti che sopraggiungono tra l'elaborazione dei valori ed il momento in cui si realizza la previsione. I modelli estesi alla previsione meteorologica adottano una diversa filosofia che consiste nell'effettuare proiezioni in avanti nel tempo con una sequenza di passi orari ottenibili grazie all'impiego contemporaneo di osservazioni e previsioni.

Utilizzando i coefficienti di regressione calcolati per la struttura completa non si modifica l'architettura del sistema, a variare è invece la natura degli input del modello: oltre ai valori osservati di marea e pressione, si impiegano anche i dati barici attesi, i quali, sebbene affetti da errore, garantiscono una migliore spiegazione delle possibili variazioni atmosferiche.

Il sistema esteso alla previsione meteorologica applica un algoritmo mobile la cui architettura generale coincide con quella individuata per il modello completo. La struttura segue uno schema iterativo che, ad ogni passo triorario, assume i nuovi input costituiti dai dati di previsione atmosferica prodotti dal Centro di Reading (E.C.M.W.F.) e ad ogni ora modifica i predittori relativi al livello di marea a Venezia introducendo i valori autogenerati dal modello stesso. Lo schema genera previsioni limitate ad un ora, ma i valori ottenuti, insieme ai dati di pressione attesi, individuano la posizione di partenza per i passi successivi. In linea teorica non esiste un limite all'intervallo temporale su cui estendere le previsioni di marea, dal punto di vista pratico la diminuzione di attendibilità riscontrabile nei dati barici previsti consente di spingersi fino ad un anticipo di 120 ore, contro le 48 della versione completa.

Si utilizzano gli stessi predittori e le stesse stazioni meteorologiche della struttura completa. Nel creare la struttura estesa alla previsione meteorologica non è stata necessaria la stima di alcun

parametro, ma l'applicazione dei coefficienti già determinati, in una sequenza di previsioni ad un'ora, avvalendosi delle previsioni meteorologiche per spostarsi ai passi successivi.

4.1 *La fase di calibrazione*

In fase di calibrazione, oltre a stimare i coefficienti di regressione da utilizzare nella fase operativa, sono stati analizzati gli errori che si commettono con il modello operando sull'intero dominio storico dal quale gli stessi coefficienti sono stati ricavati. La grandezza presa in esame al fine della valutazione è l'*errore* (o *scarto*, o *scostamento*), cioè la differenza tra valore previsto e valore osservato: $s_k^{(\tau)} = f_k^{(\tau)} - x_k^{(\tau)}$. ($x_k^{(\tau)}$ = livelli di marea osservati durante il caso *k-esimo;* $f_k^{(\tau)}$ = livelli di marea calcolati per il caso *k-esimo;* $1 \leq \tau \leq 120$; $1 \leq k \leq n$ (numero casi validi)).

L'analisi del modello poggia su di una struttura di indici in grado di cogliere i diversi aspetti delle previsioni, presentati in tabella 2.

Tabella 2 - Indicatori di qualità usati per valutare le prestazioni dei vari modelli.

Indicatore	Definizione
Casi Validi (τ)	= Numero di previsioni valide effettuate
$R^2(\tau)$	$= \left(\frac{\sigma_{xf}^{(\tau)}}{\sigma_x^{(\tau)} \sigma_f^{(\tau)}} \right)^2 = \left(\frac{\sum_{k=1}^{n} \left(f_k^{(\tau)} - \overline{f^{(\tau)}} \right) \cdot \left(x_k^{(\tau)} - \overline{x^{(\tau)}} \right)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} \left(f_k^{(\tau)} - \overline{f^{(\tau)}} \right)^2 \sum_{k=1}^{n} \left(x_k^{(\tau)} - \overline{x^{(\tau)}} \right)^2}} \right)^2$

Errore Medio (τ)	$= \overline{s^{(\tau)}} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(s_k^{(\tau)}\right)$
Dev. Std. (τ)	$= \sigma_s^{(\tau)} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(s_k^{(\tau)} - \overline{s^{(\tau)}}\right)^2}$
MAE (τ)	$= \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left\lvert s_k^{(\tau)}\right\rvert$
$(MAE\{contr \geq \alpha\})_\tau$	$= \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\left\lvert s_k^{(\tau)}\right\rvert$ solo casi con contributo meteo ≥ α cm
$(MAE\{contr \leq -30\})_\tau$	$= \frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\left\lvert s_k^{(\tau)}\right\rvert$ solo casi con contributo meteo ≤ -30 cm
$(MAE\{x_k^{(\tau)} \geq \alpha\})_\tau$	$= \frac{1}{q}\sum_{k=1}^{q}\left\lvert f_k^{(\tau)} - x_k^{(\tau)}\right\rvert$ solo casi con $x_k^{(\tau)} \geq \alpha$ cm
Massima sottostima (τ)	$= -MAX\left\{x_k^{(\tau)} - f_k^{(\tau)}\right\} \quad per\ f_i^k \leq x_i^k$
Massima sovrastima (τ)	$= MAX\left\{f_k^{(\tau)} - x_k^{(\tau)}\right\} \quad per\ f_i^k \geq x_i^k$
Indice di accuratezza (τ)	= Errore medio (τ) ± × 2 Dev.Std.(τ)

Per giudicare un modello è necessario considerare l'insieme degli indicatori a disposizione, da una a 120 ore, anche se, per facilitare l'analisi, abbiamo calcolato parametri aggregati a breve,

medio, lungo termine (rispettivamente 1-24 ore, 25-48 ore, 49-120 ore). Effettuando una media aritmetica semplice degli indici orari del modello in analisi giungiamo ad indicatori generali che permettono un confronto rapido tra modelli diversi e consentono di analizzarne i comportamenti al variare dell'orizzonte temporale della previsione.

Gli indicatori di errore e l'indice di accuratezza sono stati calcolati per ogni anticipo fino a 120 ore[5], il medesimo lavoro è stato effettuato per il modello Esteso Meteo, per il quale sono stati ricalibrati i coefficienti di regressione sul database di 41 anni. La scomposizione del dominio in classi, la stagionalità delle previsioni, il maggior numero di regressori impiegati, garantiscono notevoli guadagni in termini di accuratezza: l'errore, rispetto al modello classico dell'ICPSM (l'Esteso Meteo), si riduce, in media sulle 120 ore, del 13.3% . La maggiore accuratezza del nuovo modello è costante lungo l'intero arco di anticipo previsionale, come riscontrabile in figura 2, nel quale si può anche notare una riduzione media del 12.4% nel MAE. Miglioramenti importanti si riscontrano anche in termini di errori massimi in sottostima e sovrastima: si riducono gli errori rispettivamente, in media sulle 120 ore, di 28.2 e 27.2 centimetri, anche se (figura 3) per le previsioni ad 1 e 2 giorni i benefici più significativi si hanno in sovrastima, mentre nel lungo termine si guadagna soprattutto in sottostima.

I già considerevoli progressi assumono ancor più significatività concentrando l'attenzione sulle situazioni che eccedono i livelli d'allarme. L'errore medio assoluto del modello Bigsumdp nei casi di livello osservato non inferiore agli 80 centimetri si riduce del 28% (più precisamente del 26.2%, del 27% e del 28.7%, rispettivamente a breve, medio, lungo termine). Nelle situazioni con marea osservata maggiore o uguale a 120 centimetri la diminuzione del MAE arriva a stabilizzarsi costantemente al 40% (il vantaggio medio sulle 120 ore è del 41.3%).

---

[5] Le tabelle complete sono consultabili all'indirizzo <http://194.243.104.171/maree/DOCUMENTI/Risultati Calibrazione.xls> e <http://194.243.104.171/maree/DOCUMENTI/Risultati Operativi.xls>.

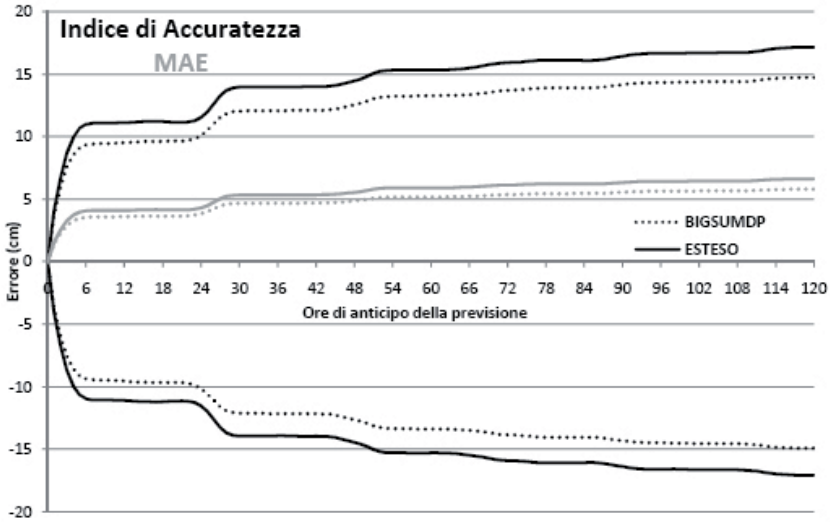

Fig. 2 - L'andamento dell'Indice di Accuratezza e del MAE al crescere dell'anticipo di previsione. (in calibrazione, modelli *Esteso* e *Bigsumdp*).

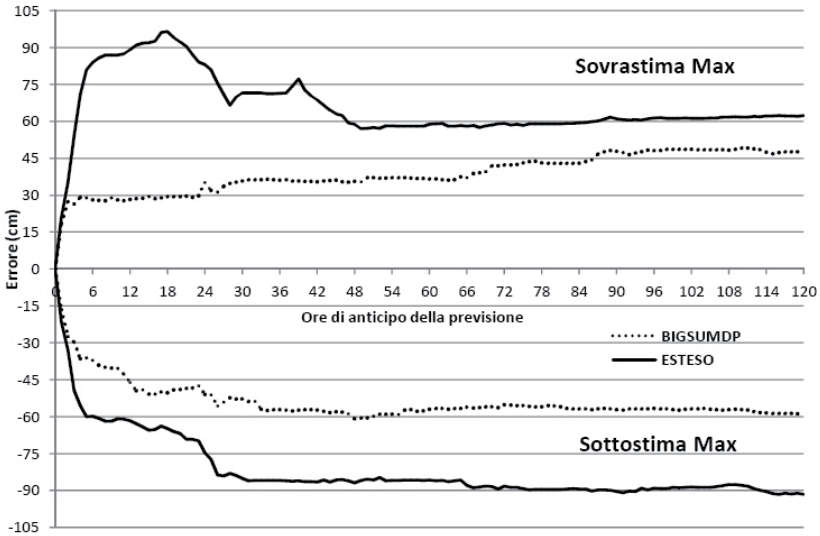

Fig. 3 - L'andamento della Sottostima e Sovrastima massima al crescere dell'anticipo di previsione (in calibrazione, modelli *Esteso* e *Bigsumdp*).

In fase di calibrazione, lavorando su dati passati, le statistiche sono calcolate in condizione di «previsione perfetta», vale a dire utilizzando le osservazioni future rispetto all'istante di previsione come fossero previsioni fornite da un centro meteorologico. Tale procedura è messa in atto per mettere in risalto l'errore endogeno del modello, scollegando la componente d'errore esogena, cioè quella causata da imperfezioni nelle previsioni meteorologiche che si ricevono nella fase operativa, dati impiegati dall'ICPSM ma prodotti esternamente al centro.

4.2 *La fase operativa*

Il modello Esteso Bigsumdp è operativo presso l'ICPSM dal 18 giugno 2007 e fornisce, ogni ora, le previsioni del livello dell'acqua a Venezia impiegando come input le osservazioni di marea ed i dati di previsione atmosferica (corsa ECMWF). Per analizzarne i risultati è stato impiegato il periodo 1 ottobre 2008 - 31 marzo 2009, 6 mesi caratterizzati da ben 90 eventi di marea non inferiore agli 80 centimetri, dei quali uno classificato come «marea eccezionale» (≥140 centimetri) ed altri 11 come «marea molto sostenuta» (≥110 centimetri).

In fase operativa, l'utilizzo di dati barici previsti, e dunque soggetti ad errori, comporta una perdita di attendibilità rispetto ai risultati in calibrazione. Abbiamo dovuto constatare che le previsioni fornite dall'ECMWF possono comportare errori anche superiori ai 2 millibar, in particolar modo per orizzonti temporali lunghi ed in condizioni di mutazioni meteorologiche repentine. Nonostante questa difficoltà la struttura estesa esperta Bigsumdp si è dimostrata tra i modelli attualmente operativi presso l'I.C.P.S.M. quella con le migliori performance di previsione.

Nella tabella 3 si riportano i risultati del modello Bigsumdp: complessivamente nelle 182 giornate utili sono state generate oltre 4000 previsioni orarie. I casi validi si riducono al crescere dell'anticipo, in quanto non sempre si dispone di 120 ore utili di previsioni bariche. Il comportamento del modello è rapportato ai risultati del modello Esteso (figure 4 e 5), così come già visto per la fase operativa. Ancora una volta i miglioramenti sono notevoli, si riscontrano sulla media delle 120 ore le seguenti riduzioni negli errori: devia-

Tabella 3 - Il modello esperto esteso Bigsumdp in operatività (dal 1/10/2008 al 31/03/2009, errori in cm).

Anticipo (ore)	CASI VALIDI	R^2	Errore Medio (cm)	MAE (cm)	MAE (cm) con marea totale ≥ 80cm	MAE (cm) con marea totale ≥ 120cm	Max sottostima (cm)	Max sovrastima (cm)	Deviaz. Stand. (cm)	Indice di Accuratezza (cm)
1	4080	0.996	-0.06	1.5	2.1	5.7	-13.2	15.5	2.0	-0.06 ± 4.1
2	4080	0.986	-0.14	2.7	3.9	8.1	-24.7	20.5	3.7	-0.14 ± 7.4
3	4080	0.976	-0.22	3.6	5.1	7.4	-22.9	25.5	4.9	-0.22 ± 9.8
4	4080	0.967	-0.28	4.2	6.1	4.9	-24.7	29.1	5.7	-0.28 ± 11.4
5	4080	0.960	-0.31	4.6	6.8	4.4	-28.4	31.1	6.3	-0.31 ± 12.5
6	4080	0.957	-0.31	4.7	7.4	5.6	-31.3	33.1	6.5	-0.31 ± 13.1
7	4080	0.955	-0.29	4.8	7.7	5.3	-32.7	33.5	6.6	-0.29 ± 13.3
8	4080	0.954	-0.27	4.9	7.8	5.4	-33.2	32.9	6.7	-0.27 ± 13.4
9	4080	0.953	-0.26	4.9	7.9	5.6	-33.7	32.3	6.8	-0.26 ± 13.6
10	4080	0.952	-0.25	5.0	7.8	6.1	-36.5	32.5	6.9	-0.25 ± 13.7
11	4080	0.951	-0.26	5.0	7.8	6.7	-44.0	33.9	7.0	-0.26 ± 13.9
12	4080	0.950	-0.28	5.1	8.0	7.3	-44.9	34.8	7.1	-0.28 ± 14.1
18	4080	0.945	-0.28	5.2	8.1	5.6	-39.6	38.9	7.3	-0.28 ± 14.7
24	4080	0.940	-0.27	5.5	8.9	7.9	-44.7	44.1	7.7	-0.27 ± 15.5
36	4080	0.919	-0.55	6.6	10.3	15.0	-46.4	45.1	9.0	-0.55 ± 18
48	4080	0.913	-0.69	6.9	11.1	16.6	-50.3	39.5	9.3	-0.69 ± 18.6
72	4079	0.891	-0.92	7.9	11.9	5.5	-54.8	51.0	10.6	-0.92 ± 21.1
96	4049	0.862	-0.91	9.0	12.4	18.4	-56.7	48.0	12.0	-0.91 ± 23.9
120	3431	0.824	-1.81	10.1	16.1	52.3	-66.6	55.4	13.6	-1.81 ± 27.2
media 1-24h		0.954	0.259	0.26	4.8	7.5	6.3	35.9	34.9	
media 25-48h		0.919	0.539	0.54	6.5	10.4	14.8	44.9	44.1	
media 49-120h		0.873	0.930	0.93	8.5	12.6	25.7	56.7	49.5	
media 120h		0.899	0.716	0.72	7.3	11.2	19.7	50.2	45.5	

zione standard 25.5%, MAE 23.5%, massima sottostima 37%, massima sovrastima 33.6%.

Ancor più rimarcati i benefici della nuova struttura in corrispondenza di eventi di marea che raggiungono il limite di 100 cm (figura 6), vale a dire quelle situazioni che più comportano disagi alla città di Venezia e che si sono verificate 28 volte nel periodo in esame. Anziché considerare l'ora di produzione della previsione, le statistiche sono calcolate a partire dall'ora in cui si è registrata la punta massima di marea e prendendo in analisi la previsione dell'estremale generata da una a 120 ore prima. In queste situazioni si ottiene una riduzione media sulle 120 ore dell'Errore Medio del 55.1% e del MAE del 33.2%. L'accuratezza del modello in situazioni d'emergenza è l'elemento chiave per facilitare il lavoro dei tecnici del Centro Maree.

Un aspetto importante, riscontrabile in fase di analisi degli errori, è la gradualità nella perdita di accuratezza delle previsioni del modello Bigsumdp che, dopo una rapida diminuzione della precisione nelle prime 5 ore, stabilizza gli errori che crescono in modo lento e costante. Del tutto diverso il comportamento dell'Esteso, caratterizzato da forte variabilità nell'errore che subisce sbalzi intensi in corrispondenza del cambio delle previsioni di pressione atmosferica (ogni 24 ore).

5. *La marea eccezionale del 01/12/2008*

L'evento di acqua alta eccezionale dell'1 dicembre 2008, quarto nella storia per livello raggiunto, è avvenuto per la concomitanza davvero singolare di diversi fattori meteo marini.

La fase lunare era tra fine sizigia ed inizio quadratura. Il campo barico in quota, da giorni caratterizzato da una persistente e vasta saccatura euro atlantica, aveva già determinato il perdurare di una sessa di circa 60 cm. La sera del 30 novembre si forma un profondo minimo al suolo di 990 hPa sul Golfo Ligure, che determina tra Bari e Venezia un gradiente barico di 20 hPa (figura 7). Il suo rapido spostamento in direzione NE provoca dapprima un modesto rinforzo di bora sull'Alto Adriatico e nella notte un intenso

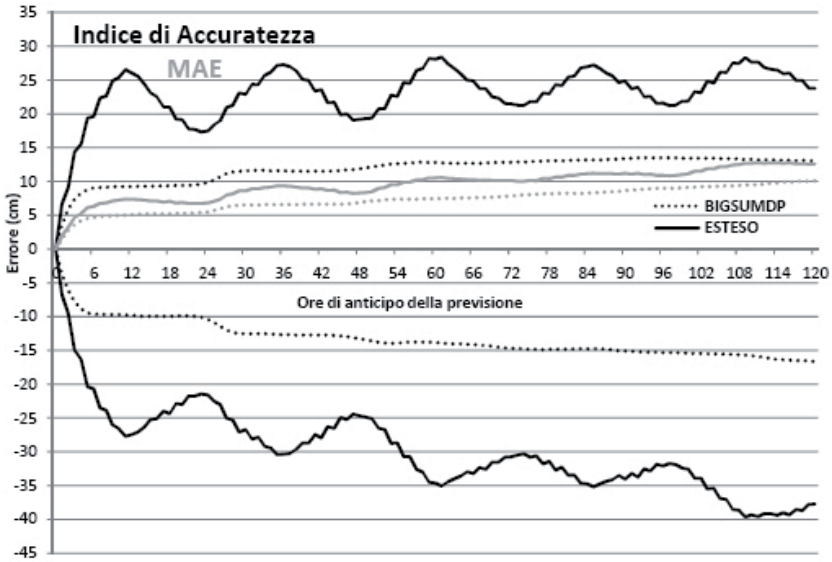

Fig. 4 - L'andamento dell'Indice di Accuratezza e del Mean Absolute Error al crescere dell'anticipo di previsione (in operatività, modelli *Esteso* e *Bigsumdp*).

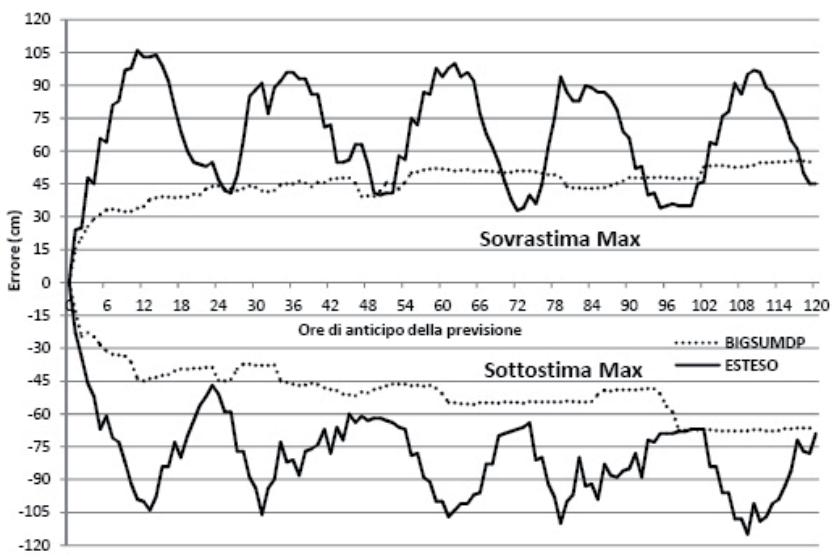

Fig. 5 - L'andamento della Sottostima e Sovrastima massima al crescere dell'anticipo di previsione (in operatività, modelli *Esteso* e *Bigsumdp*).

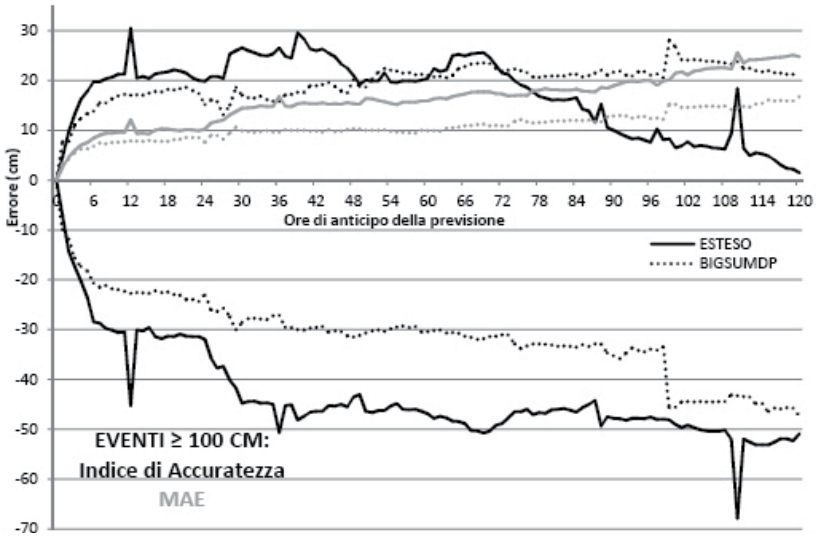

Fig. 6 - L'andamento dell'Indice di Accuratezza e del MAE in corrispondenza degli eventi con marea osservata ≥ 100 cm (in operatività, modelli *Esteso* e *Bigsumdp*).

richiamo di scirocco con raffiche prossime ai 100 km/h (tabella 4, dati a 8 miglia dal Lido di Venezia). L'evoluzione si concretizza in una catena di eventi che portano la marea a livelli storici. Il rialzo meteorologico raggiunge l'apice nella tarda mattinata, proprio in corrispondenza con il massimo astronomico (cm 56), nonché in fase con il contributo della sessa determinatasi nei giorni precedenti. Alle 10:45 la marea raggiunge il valore massimo di 156 cm (figure 8 e 9). L'evento è per certi versi anomalo: infatti senza la simultaneità del loro verificarsi, i fattori descritti avrebbero provocato un "normale" episodio di acqua alta sostenuta. Nonostante questa situazione meteo marina complessa, il modello Bigsumdp ha fornito previsioni molto accurate già con 4 giorni di anticipo (figure 8 e 9). La previsione ufficiale è stata purtroppo influenzata dalle indicazioni più contenute dei modelli ufficiali: il Bigsumdp era allora sperimentale.

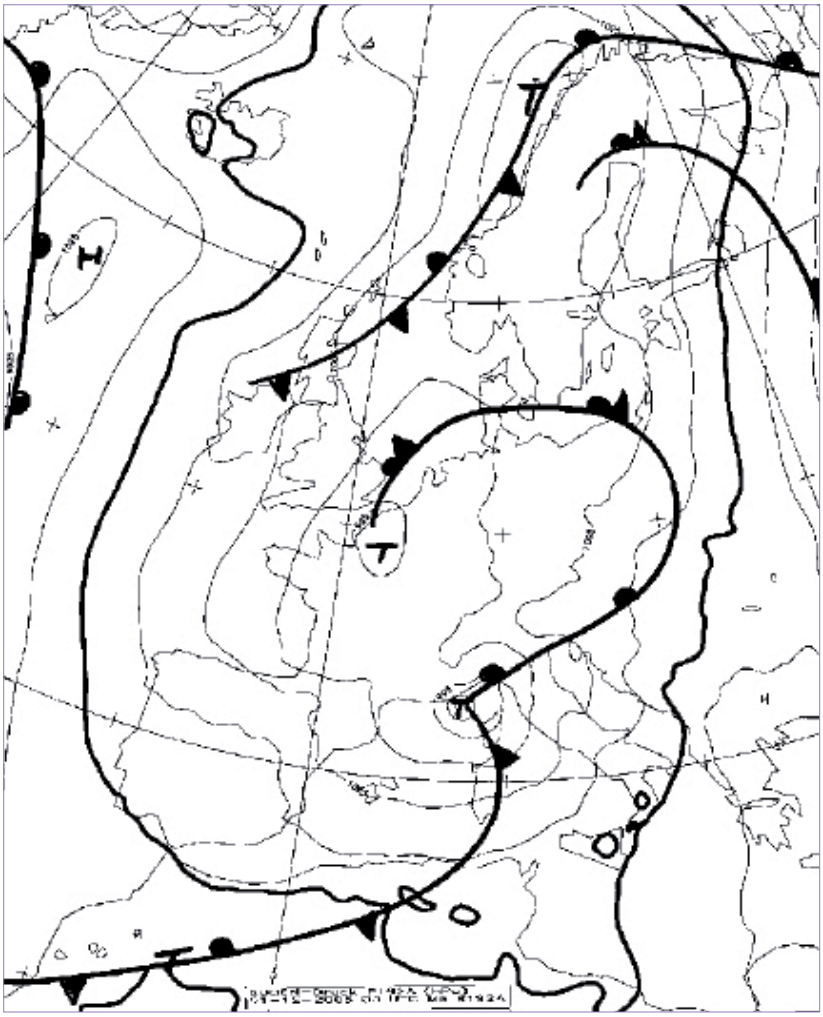

Fig. 7 - Pressione al suolo 1/12/2008 ore 0.

Tabella 4 - Il vento registrato in Piattaforma CNR.

Giorno	Ora Solare	Direzione Media	Velocità Media m/s	Velocità Max m/s
30/11/2008	22.00	33	8.7	11.8
30/11/2008	22.30	32	10.1	13.1
30/11/2008	23.00	25	12.4	15.1
30/11/2008	23.30	23	13.4	16.8
01/12/2008	0.00	357	14.1	19.6
01/12/2008	0.30	337	13.8	20.0
01/12/2008	1.00	0	13.7	18.2
01/12/2008	1.30	13	13.1	16.6
01/12/2008	2.00	33	10.2	13.6
01/12/2008	2.30	41	8.0	11.3
01/12/2008	3.00	106	9.0	12.7
01/12/2008	3.30	143	11.2	13.3
01/12/2008	4.00	138	12.1	14.6
01/12/2008	4.30	133	11.5	14.7
01/12/2008	5.00	134	14.0	17.1
01/12/2008	5.30	158	16.3	21.2
01/12/2008	6.00	155	16.3	22.8
01/12/2008	6.30	143	19.6	24.2
01/12/2008	7.00	139	18.4	23.0
01/12/2008	7.30	150	17.3	21.9
01/12/2008	8.00	154	15.7	20.3
01/12/2008	8.30	172	14.2	19.5
01/12/2008	9.00	168	13.5	16.7
01/12/2008	9.30	165	15.2	18.9
01/12/2008	10.00	177	17.0	20.7
01/12/2008	10.30	178	16.4	20.7
01/12/2008	11.00	176	13.2	17.1
01/12/2008	11.30	178	11.6	14.3
01/12/2008	12.00	179	9.3	11.8
01/12/2008	12.30	176	8.9	11.2

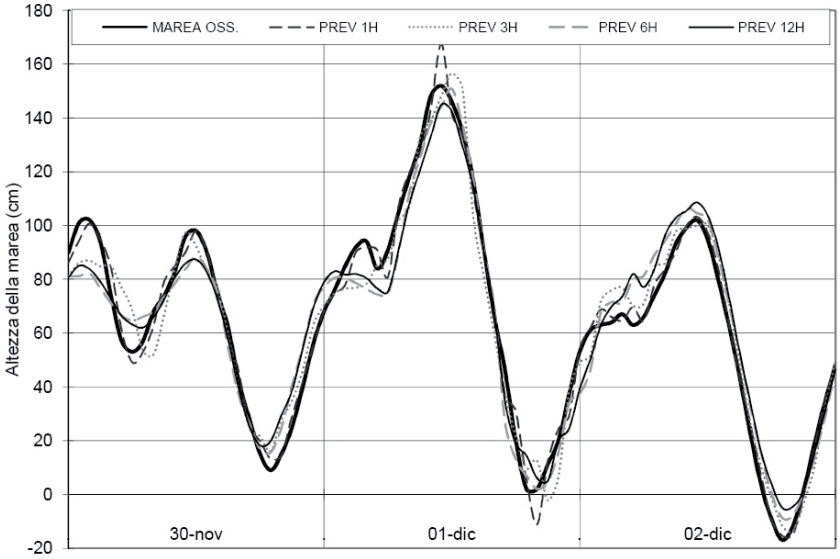

Fig. 8 - Marea osservata dell'evento del 01/12/08 e previsioni fino a 12 ore (modello *Bigsumdp*).

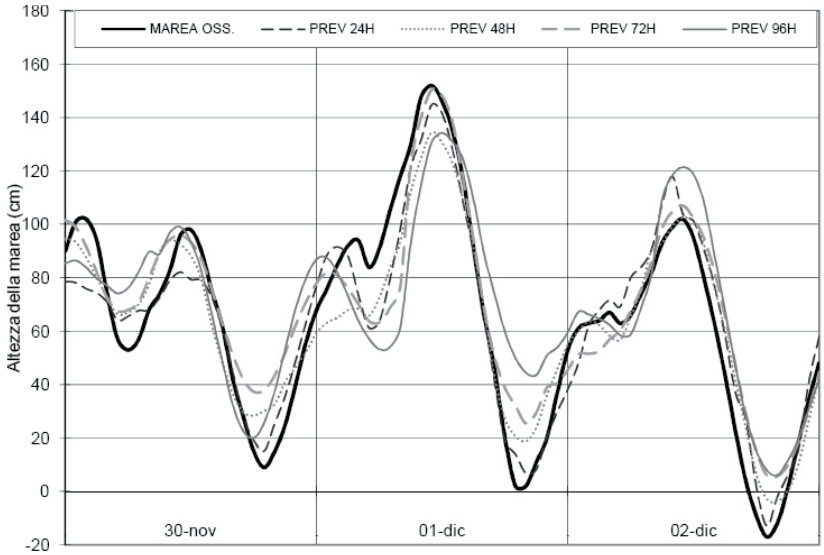

Fig. 9 - Marea osservata dell'evento del 01/12/08 e previsioni da 24 a 96 ore (modello *Bigsumdp*).

Ringraziamenti

Al dr. Alberto Tomasin, dell'Università di Venezia, nostro maestro, instancabile suggeritore di preziosi consigli.

Al Colonnello Marcello Cerasuolo, già del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, da lungo tempo collaboratore del Centro Maree e al responsabile della Sala Operativa dell'I.C.P.S.M., Marino Filippi, per aver curato l'interpretazione meteorologica dell'evento dell'1 dicembre 2008.

A tutti i tecnici dell'I.C.P.S.M., in particolare Annamaria Massalin e Franca Pastore, per l'aiuto nella realizzazione e correzione dell'ampio data base che ha costituito l'essenza del nostro lavoro, e Lucia Zampato per la gestione delle previsioni E.C.M.W.F. e la trasmissione dei dati ai modelli.

BIBLIOGRAFIA

Box C.E.P., Jenkins G.M. (1970), *Time series analysis forecasting and control,* Holden Day, S. Francisco.

Canestrelli P. (1999), *Il sistema statistico del Comune di Venezia per la previsione del livello della marea in città. Risultati teorici e in fase di operatività*, Comune di Venezia - C.P.S.M..

Canestrelli P., Pastore F. (2000), *Modelli stocastici per la previsione del livello di marea a Venezia*, in *Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia - Rapporti e Studi*, Venezia, Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti 2 (2), 635-663.

Canestrelli P., Moretti F. (2004a), *I modelli statistici del comune di Venezia per la previsione della marea: valutazioni e confronti sul quinquennio 1997-2001,* Atti Istituto Veneto Scienze, Lettere ed Arti, 167 (2003-2004), Venezia.

Canestrelli P., Moretti F. (2004b), *Una prima applicazione di modello statistico di tipo esperto*. Comune di Venezia, Centro Previsioni e Segnalazioni Maree.

Goldmann A., Tomasin A. (1971), *Model for the Adriatic sea. Colloque international sur l'exploitation des oceans*, II, Bordeaux (France).

Mosetti F. (1971), *Sulle cause dell'acqua alta a Venezia e sui sistemi di previsione*, Osservatorio Geofisico Sperimentale, Trieste.

Riassunto

Si illustra una famiglia di modelli numerici ARMAX (AutoRegressive Moving Average model with eXogenous inputs model) utilizzata per la previsione dei livelli di marea a Venezia e, in caso di «acqua alta», per l'attivazione dell'allarme alla città e la posa di passerelle mobili. Da una serie storica di 41 anni si determinano i coefficienti dei modelli, differenziati per classi di stagionalità e di forzanti atmosferiche. Il modello base interpreta statisticamente l'evoluzione della marea adottando il set di coefficienti adatti alla particolare circostanza, sulla base della classe di parametri meteo-marini che identificano l'evento attuale. Si discutono, in termini statistici, i risultati dei modelli ottenuti con riferimento alla serie storica dei dati e, in particolare, all'evento di marea eccezionale del giorno 1 dicembre 2008.

Abstract

We describe an ARMAX (AutoRegressive Moving Average model with eXogenous inputs model) numerical model family, operationally used to predict the sea levels in Venice. The forecasted levels trigger the alert to citizens and the arrangement of mobile walkways in the city centre. A data set of 41 years of sea level and atmospheric forcing is used to classify the water levels with respect to seasonality and pressure patterns. Each model of the family is identified by a different class of parameters, fed to a unique base model that will statistically forecast the water level in subsequent days. A discussion is presented in statistical terms, on the overall score of the model family, with particular focus on the extreme storm surge event of December 1st 2008.