

GLI EVENTI DI ACQUA ALTA DEL DICEMBRE 2008 NELLA LAGUNA DI VENEZIA E LUNGO IL LITORALE NORD ADRIATICO

Maurizio Ferla

Dirigente del Servizio Laguna di Venezia, Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine dell'Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA).

PREMESSA

Nel corso della prima metà del mese di dicembre del 2008 l'Adriatico settentrionale è stato interessato da alcuni significativi eventi di alta marea eccezionale. L'elemento maggiormente caratterizzante è stato la persistenza di in tutto l'Adriatico di venti provenienti dai quadranti meridionali e sud orientali (S-SSE-ESE) che, sospingendosi fino alla parte settentrionale del bacino, hanno determinato ripetuti allagamenti in numerosi centri urbani, localmente noti come *acque alte*. Il dato più significativo è stato rappresentato dall'insieme dei livelli dell'alta marea registrati nella mattinata del 1° dicembre quando le punte massime hanno raggiunto valori di rilevanza storica sia lungo il litorale che all'interno dei bacini lagunari. A Venezia il massimo della marea è stato registrato alle ore 10.45 con un'altezza di **156 cm** sopra lo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS), 4° caso storico da quando, nel 1872, iniziarono le sistematiche osservazioni del livello marino nella città lagunare. L'eccezionale alta marea ha determinato persistenti allagamenti che hanno interessato integralmente, oltre alla città di Venezia, anche gli abitati di Burano e Murano, la cittadina di Chioggia e in parte anche alcune zone del Lido.

L'alta marea del 1° dicembre ha assunto caratteri di eccezionalità anche in altre città del nord Adriatico come ad esempio Trieste ove il livello massimo ha raggiunto i **321 cm** sopra lo Zero dell'Istituto Talassografico (ZIT), 2° caso storico dopo la punta di 360 cm raggiunta il 26/11/1969. Per alcune ore il mare ha sommerso il Molo Audace ed ha raggiunto la pavimentazione della monumentale Piazza Unità. A Grado, cittadina situata sul cordone litoraneo dell'omonima laguna, l'alta marea ha raggiunto il livello massimo di 169 cm ZMPS con conseguenze che hanno ricordato quelle della storica alluvione del 4 novembre 1966.

Gli effetti della eccezionale alta marea sono stati registrati anche oltre confine lungo la costa croata dell'Istria e nel golfo del Quarnero. Disagi dovuti agli allagamenti provocati dall'alta marea si sono avuti nelle zone prossime alle aree portuali delle città di Pola e Fiume.

L'evento del 1° dicembre è stato inoltre accompagnato da una violenta mareggiata che si è abbattuta lungo tutto il tratto di litorale Adriatico che va da Lignano, a Bibione, a Caorle, a Jesolo fino ad arrivare ai litorali di Lido, Pellestrina, e Sottomarina che separano dal mare la laguna di Venezia. Diffusi ed estesi sono stati i fenomeni di erosione delle spiagge suscitando allarme generale presso le comunità locali preoccupate per le temute conseguenze economiche sul comparto turistico.

Un successiva fase di fenomeni di acqua alta si è registrata tra il 10 e il 16 dicembre, ma con livelli massimi più contenuti rispetto a quelli del 1° dicembre. Durante questa seconda fase le punte massime a Venezia sono state di **114 cm** alle ore 21.20 del 10, **115 cm** alle ore 23.10 dell'11, **116 cm** alle ore 11.40 del 14 e **113 cm** alle 11.40 del 15.

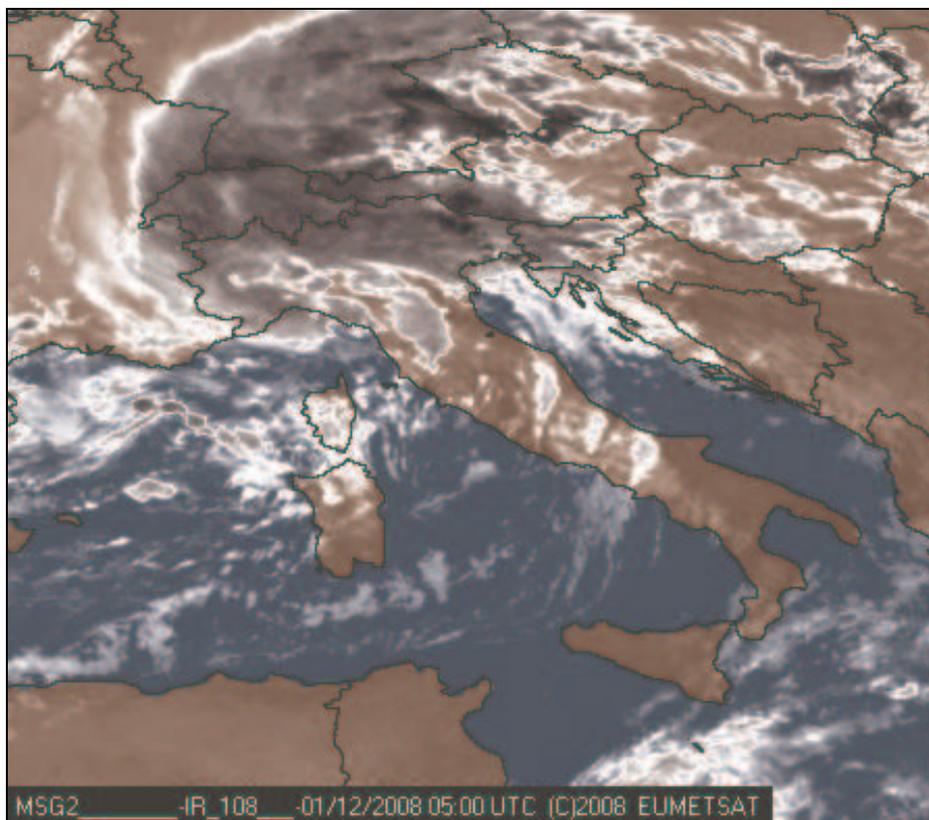
L'evento del 1° dicembre è stato studiato attraverso le registrazioni mareografiche e meteorologiche acquisite presso le 52 stazioni di osservazione di cui dispone l'ISPRA lungo il litorale nord Adriatico e all'interno della laguna di Venezia. Le elaborazioni dei dati hanno consentito di caratterizzare il fenomeno nei vari punti della laguna e lungo il litorale evidenziando gli aspetti di maggior interesse. Viene inoltre presentata una breve elaborazione dei dati relativi a Venezia registrati in occasione della seconda fase degli eventi di acqua alta e cioè quelli registrati tra il 10 e il 16 dicembre.

L'EVENTO 081201 A VENEZIA-PUNTA DELLA SALUTE

I fenomeni di alta marea eccezionale, noti in letteratura con il termine di *storm surges*, hanno cause di natura prevalentemente meteorologica e si differenziano da quelle di tipo astronomico legate al campo gravitazionale luni-solare. La marea astronomica ha un ciclo di 12 ore e da luogo una alta e una bassa marea ogni 6 ore. Nell'Alto Adriatico queste ultime risultano ben distanziate nelle fasi di sizigia (novilunio e plenilunio) e più ravvicinate durante le fasi di quadratura (primo quarto ed ultimo quarto).

Le cause meteorologiche vanno invece ricercate nel il transito di profondi campi di bassa pressione nell'area centro settentrionale della nostra Penisola. A tale situazione spesso si associa l'istaurarsi di persistenti correnti sciroccali su tutto l'Adriatico che fanno sì che la parte alta di questo bacino diventi sede di significativi sovralti del livello del mare ben oltre le alte maree dovute al normale ciclo astronomico¹.

La figura 1 mostra l'immagine EUMETSAT delle ore 05.00 UTC del 1° dicembre (06.00 ora italiana) nella quale si evidenzia la presenza di una attività ciclonica, centrata grosso modo in prossimità del golfo di Genova, che determina il richiamo di correnti meridionali umide dal Mediterraneo verso l'arco alpino.



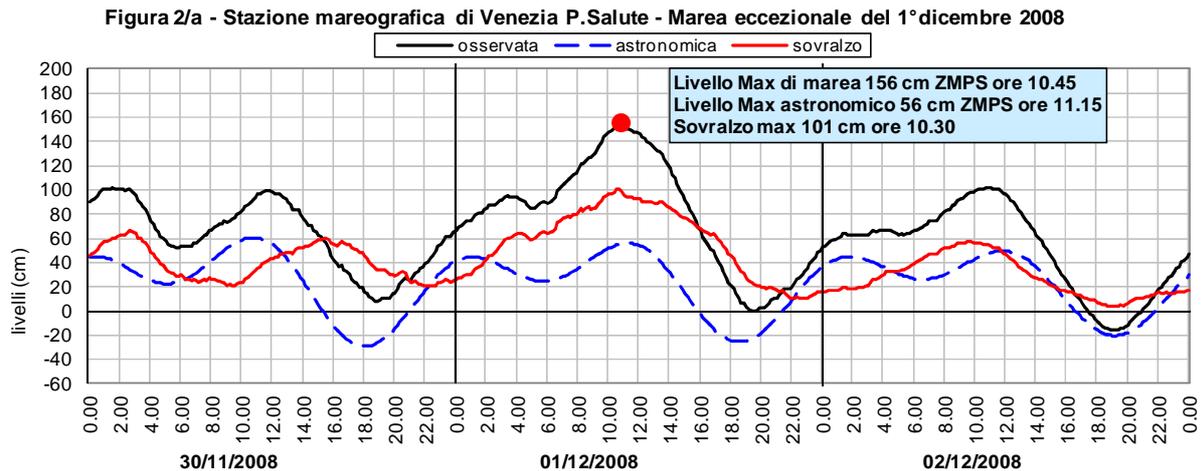
(Figura 1 – Immagine EUMETSAT delle ore 5.00 UTC del 1° dicembre 2008)

Tale situazione meteorologica generale si è combinata a Venezia con condizioni di marea astronomica intermedie tra quelle proprie della sizigia (ultimo novilunio del 27 novembre) e quelle della quadratura (primo quarto del 5 dicembre) con escursioni variabili tra i 30 e i 70 cm in fase crescente e i 20 e gli 80 cm in fase calante. Con riferimento al periodo che va dalle ore 0.00 del 30

¹ Per sovraltzo della marea si intende lo scostamento tra il valore osservato della marea e il corrispondente valore astronomico. In occasione del passaggio di campi di bassa pressione atmosferica l'andamento della marea osservata si sviluppa tutto al di sopra dell'andamento della marea astronomica. Situazione opposta si verifica in presenza di campi di alta pressione quando l'andamento della marea osservata si sviluppa al di sotto di quello astronomico. In questi casi spesso si dice che il *sovraltzo* è *negativo*.

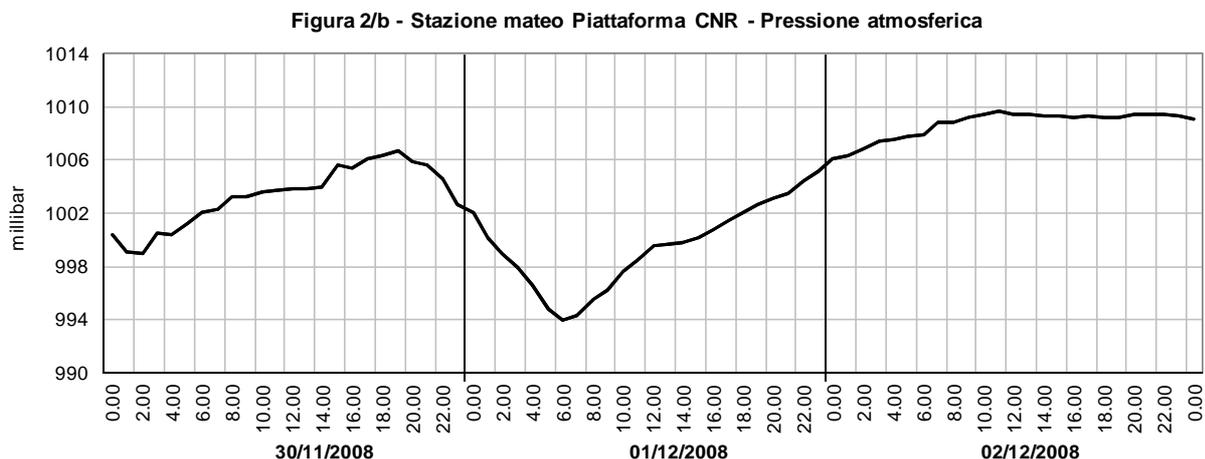
novembre fino alle ore 24 del 2 dicembre, la figura 2 mostra l'evoluzione della marea a Venezia in rapporto alle condizioni meteo locali, ed in particolare:

- l'andamento della marea osservata a Punta della Salute assieme all'andamento della corrispondente marea astronomica e del sovralzo (fig. 2-a);
- l'andamento della pressione atmosferica registrata presso la stazione meteo posizionata sulla piattaforma oceanografica del CNR localizzata a circa 8 miglia al largo delle bocche di porto della laguna di Venezia (fig. 2-b);
- l'andamento della velocità e della direzione del vento registrata presso la medesima stazione meteo (fig. 2-c).

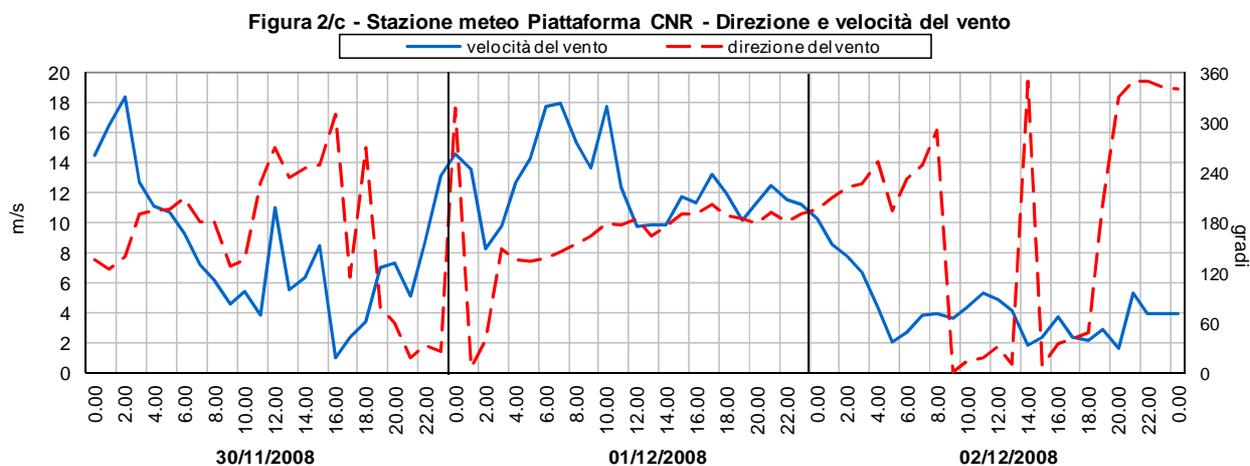


La figura 2-a mostra che la condizione di massimo di marea del 1° dicembre (156 cm ZMPS) si è registrata alle ore 10.45; la condizione di massimo astronomico, di 56 cm, si è avuta intorno alle ore 11.15, con un ritardo di soli 30 minuti rispetto al massimo osservato. La condizione di massimo sovrалzo, di 101 cm, si è invece registrata intorno alle ore 10.30 con un anticipo di soli 15 minuti rispetto all'ora della punta massima osservata, e di 45 minuti rispetto alla condizione di massimo astronomico. In realtà l'entità di quest'ultimo ritardo è così breve da far ritenere praticamente la condizione di massimo astronomico concomitante con quella di massimo sovrалzo con la conseguenza di un evento di acqua alta che per Venezia, per la laguna e per il litorale nord Adriatico ha assunto caratteri di assoluta eccezionalità.

Si osserva inoltre che il valore del massimo sovrалzo di 101 cm è di entità paragonabile con quella registrata in occasione dei più significativi eventi di alta marea eccezionale degli ultimi 15-20 anni (sovrалzo di 110 cm per l'evento dell'8 dicembre 1992; sovrалzo di 116 cm per l'evento del 6 novembre 2000; sovrалzo di 105 cm per l'evento del 16 novembre 2002).



Coerentemente con la descrizione della situazione meteorologica innanzi descritta, l'analisi della figura 2-b evidenzia un marcato abbassamento della pressione atmosferica registrata presso la piattaforma CNR. Dal valore di 1006,7 Millibar, delle ore 19.00 del 30 novembre, la pressione si è abbassata fino al minimo di 994 Millibar delle ore 6.00 del 1° dicembre, con un gradiente negativo di 1,15 Millibar/ora.

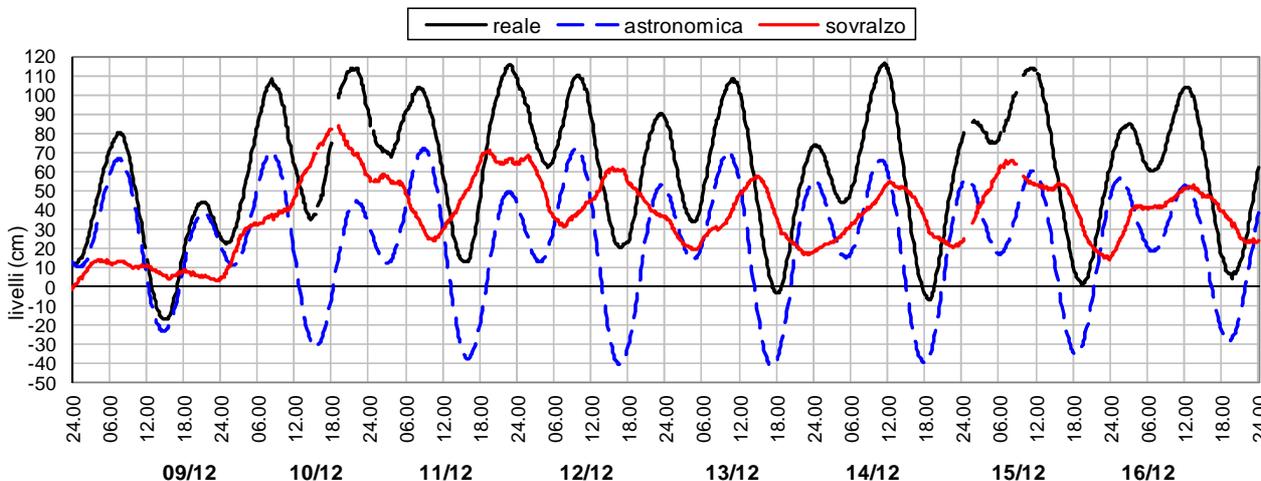


La figura 2-c mostra che il vento davanti le bocche si è disposto dai quadranti sud orientali e meridionali a partire dalle ore 03.00 della notte del 1° dicembre ed è rimasto pressoché costante in direzione fino alle ore 10.00 del mattino successivo. La sua intensità è invece rapidamente cresciuta toccando un primo massimo di 18 m/s (circa 70 km/orari) intorno alle 05.30 ed un secondo massimo di 17.8 m/s (circa 65 km/orari) intorno alle ore 10.00.

L'osservazione dei tre diagrammi conferma il ripetersi di condizioni tipiche dei fenomeni di acqua alta e cioè la presenza di un forte gradiente barico negativo e la presenza di venti di scirocco nelle ore che precedono la condizione di massimo sovrалzo.

Le figure 3-a, 3-b e 3-c si riferiscono invece alla seconda fase dei fenomeni di acqua alta, e cioè quelli registrati tra il 10 e il 16 dicembre. I tre diagrammi riassumono le condizioni della marea a Venezia, l'andamento della pressione atmosferica e gli andamenti della velocità e della direzione del vento registrati presso la medesima stazione ISPRA sulla Piattaforma Oceanografica del CNR. Durante questa seconda fase, le condizioni della la marea astronomica sono state quelle tipiche della sizigia (plenilunio del 12 dicembre) con escursioni massime di circa 110 cm in fase calante e di circa 90 cm in fase crescente.

Figura 3/a - Stazione mareografica di Venezia Punta Salute - Eventi del 10-16 dicembre 2008



La figura 3-a mostra che nel corso di questo periodo si sono registrati ben 9 picchi di alta marea con livelli superiori ai 100 cm ZMPS. In particolare nella giornata dell'11 e del 12 tali picchi si sono ripetuti per due volte nell'arco delle 24 ore.

La condizione di massimo sovranzo si è registrata nella giornata del 10, con un valore di 83 cm alle ore 19.10; un primo massimo astronomico di 70 cm era previsto per le 8.30 del mattino ed il secondo massimo di 44 cm per le 22.30. Il livello massimo di marea di **114 cm** si è avuto alle ore 21.20 con un ritardo quindi di circa 2 ore rispetto alla condizione di massimo sovranzo. Nei giorni successivi il sovranzo mostra un andamento oscillante con periodicità variabile tra le 20 e le 24 ore fino alla giornata del 15 e con un effetto di smorzamento progressivo sui massimi fino al valore di 55 cm della giornata del 14. Tale andamento evidenzia l'effetto dovuto all'istaurarsi del fenomeno della sessa principale dell'Adriatico, e cioè quella che oscilla lungo l'asse longitudinale con un periodo di circa 21 ore.

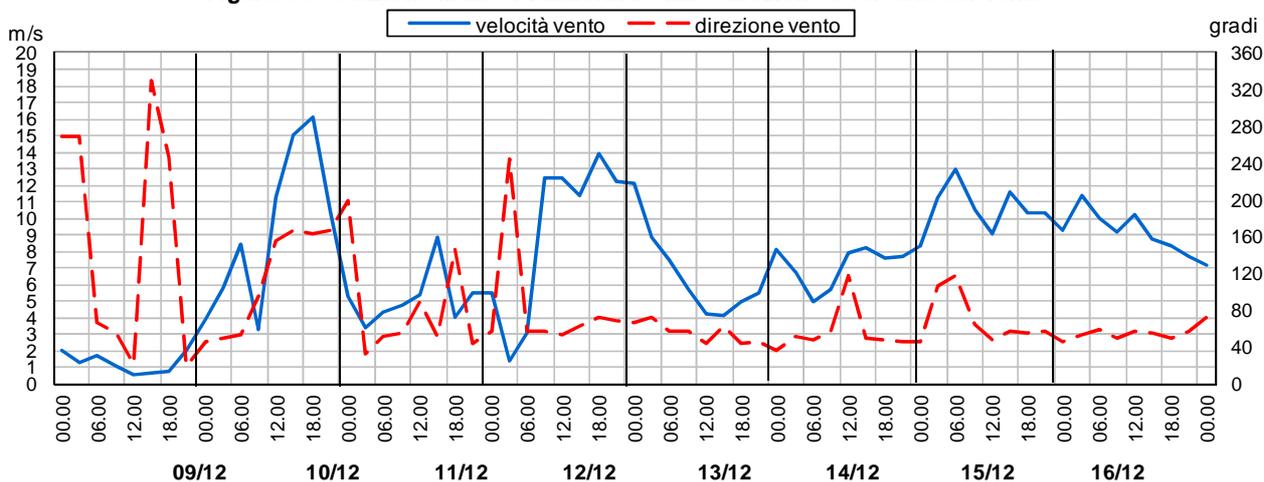
A partire dalla giornata dell'11 la condizione di massimo sovranzo si è verificata con ritardi via via decrescenti rispetto alla condizione di massimo astronomico. Nella giornata del 14 tale ritardo si è ridotto a poco più di un'ora dando luogo ad una condizione di *acqua alta* con una punta massima di **116 cm ZMPS** che rappresenta il livello più elevato raggiunto dalla marea durante questa seconda fase degli eventi del dicembre 2008.

Figura 3/b - Stazione meteo Piattaforma CNR - Pressione atmosferica



La figura 3-b evidenzia un graduale abbassamento della pressione atmosferica dal valore di 1.023,3 Millibar delle ore 10.30 del 9 dicembre, fino ad un primo minimo di 1005,1 Millibar delle ore 19.30 del 10 dicembre, con un gradiente negativo di 0.63 Millibar/ora. Dopo una brevissima fase di risalita, la pressione atmosferica ha ripreso gradualmente a scendere con un gradiente di 0.36 millibar/ora fino al successivo minimo di 997 Millibar delle ore 17.30. La pressione si è poi mantenuta livellata su tale valore minimo fino alle ore 22.10 dell'11 quando ha ripreso a salire fino al valore di 1010,1 Millibar raggiunto alle ore 2.40 del 13. E' poi seguita fino alle ore 6.00 del 16 una ulteriore e più lunga fase livellata con valori intorno ai 1008 Millibar, cui è seguita una nuova fase di crescita.

Figura 3/c - Stazione meteo Piattaforma CNR - direzione e velocità del vento



Infine la figura 3-c mostra che nella giornata del 10, tra le ore 12.00 e le ore 21.00, il vento davanti le bocche si è disposto con provenienza dal settore di SSE (scirocco) con intensità via via crescente fino ad una punta massima di 16 m/s (58 km/h) intorno alle ore 18.00. Nei giorni successivi il vento davanti le bocche si è disposto da ENE (bora) mantenendosi pressoché costante in direzione e raggiungendo una punta massima di 13.9 m/s (50 km/h) alle ore 18.00 del 12. Tra le ore 3.00 e le ore 9.00 del 15 si è registrata una breve fase in cui il vento è ritornato a soffiare dal settore sud orientale (ESE) con un rinforzo fino a 13 m/s (47 km/h) intorno alle ore 6.00. Nei giorni successivi il vento è tornato a disporsi dal settore di ENE con intensità via via decrescente.

CARATTERI DELL'EVENTO 081201 LUNGO IL LITORALE E NELLA LAGUNA DI VENEZIA

Le osservazioni mareografiche raccolte lungo il litorale nord Adriatico hanno consentito di compilare la tabella I che riporta l'ora e le punte massime registrate presso le stazioni di Grado, Lignano, Caorle, Cavallino, Lido Diga Nord, Lido Diga Sud, Malamocco Diga Nord, Chioggia Diga Sud, Porto Caleri durante le giornate del 30 novembre e del 1 e del 2 dicembre 2008.

	30 NOV				1° DIC				2° DIC			
	Ora	1° max	Ora	2° max	Ora	1° max	Ora	2° max	Ora	1° max	Ora	2° max
Grado	0.00	67	10.10	75	1.30	103	10.50	171	0.30	50	9.50	107
Lignano	0.10	75	10.30	78	2.10	84	11.30	147	0.40	50		
Caorle	0.30	99	11.10	104	0.50	112	8.50	169	1.00	79	9.20	110
Cavallino Darsena	0.40	104	10.50	111	3.00	105	9.40	169	3.20	86	10.20	114
Lido DN	0.20	104	10.30	106	2.50	107	9.30	168	1.00	69	10.15	105
Lido DS	0.20	105	11.00	105	3.10	104	9.40	163	3.20	71	10.30	104
Malamocco DN			10.40	105	3.00	103	9.40	171	3.30	72	10.10	104
Chioggia DS	0.10	100	10.50	105	3.20	97	9.40	154	3.20	71	10.10	104
Porto Caleri	0.20	95	11.10	100	2.30	100	10.30	151	3.50	67	10.30	101

Tabella I – Evento di marea eccezionale del 1° dicembre 2008. Punte massime in cm ZMPS registrate presso le stazioni mareografiche del litorale nord Adriatico.

L'esame dei dati riportati in tabella I mostra che già nella giornata del 30 le condizioni della marea risultavano piuttosto sostenute su tutto il litorale nord Adriatico. Lungo la parte veneta, ed in particolare davanti le bocche della laguna di Venezia, le punte massime hanno superato i 100 cm ZMPS per due volte nell'arco della stessa giornata. Una ulteriore fase di alta marea, con massimi superiori ai 100 cm ZMPS, si è verificata nella nottata del 1° dicembre precedendo quindi l'eccezionale alta marea della mattinata successiva quando lungo tutto il litorale sono stati praticamente raggiunti livelli superiori ai 150/160 cm ZMPS. Se si considera che in condizioni normali le punte di marea dell'alto Adriatico raggiungono al massimo i 70-80 cm solo durante le fasi di sizigia, si capisce che le condizioni del mare nella mattinata del 1° dicembre, anche in relazione alla concomitante mareggiata, hanno assunto caratteri di estrema severità per i vari aspetti legati al rischio costiero.

Le figure 5-a, 5-b e 5-c mostrano l'andamento della marea osservata in corrispondenza delle tre stazioni significative di Grado, Lido Diga Nord e Porto Caleri. Se si assume, ad esempio, come riferimento la soglia degli 80 cm ZMPS (in relazione alle sopracitate considerazioni sui massimi astronomici dell'alto Adriatico), l'osservazione delle figure evidenzia che, mediamente, la marea del 1° dicembre si è mantenuta al di sopra di tale soglia per circa 12-14. Si osserva inoltre che la marea osservata alla stazione di Lido Diga Nord presenta un andamento maggiormente perturbato rispetto alle altre due, evidenziato dalla presenza di oscillazioni secondarie di breve periodo. Ciò evidentemente è dovuto al fatto che la stazione, posizionata in testa al molo guardiano che delimita verso nord la bocca di Lido, risulta direttamente esposta alle oscillazioni del moto ondoso che, a

causa della concomitante violenta mareggiata, dovevano essere così ampie e da riuscire a superare i dispositivi di smorzamento del pozzetto interno della cabina mareografica. Non è neanche da escludere la possibilità che, per effetto del frangimento delle onde sul molo foraneo che delimita verso nord la bocca portuale, sia penetrata acqua di mare all'interno della cabina, e quindi all'interno del pozzetto, attraverso le fessura di base della porta di accesso. Le altre due stazioni, e cioè quella di Grado e quella di porto Caleri, trovandosi in posizione più interna, e quindi più ridossata rispetto al litorale, hanno registrato un andamento della marea più regolare e meno disturbato dalle piccole oscillazioni indotte dal moto ondoso.

Figura 5/a - Stazione mareografica di Grado - Marea eccezionale del 1° dicembre 2008

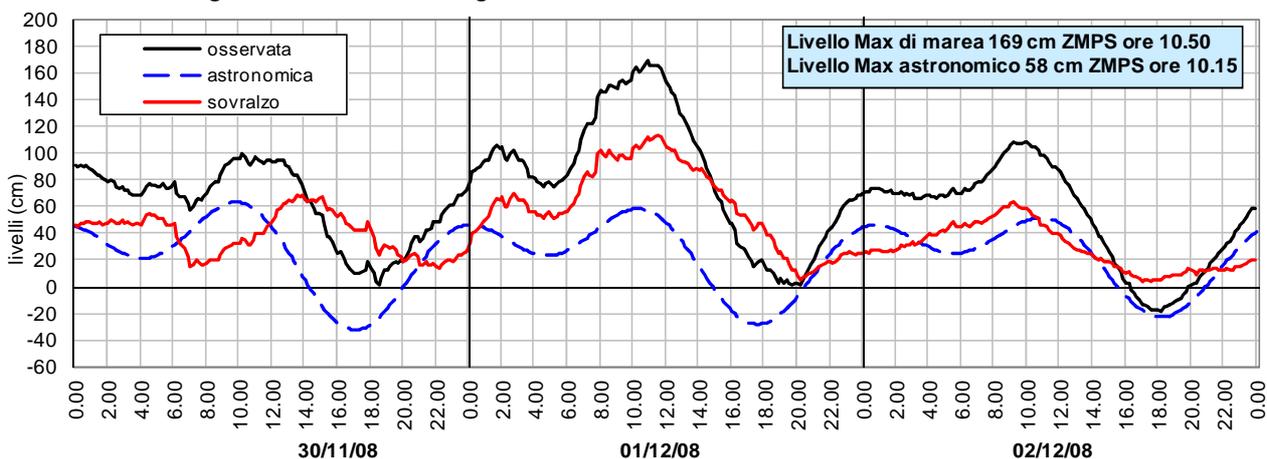


Figura 5/b - Stazione mareografica di Lido Diga Nord - Marea eccezionale del 1° dicembre 2008

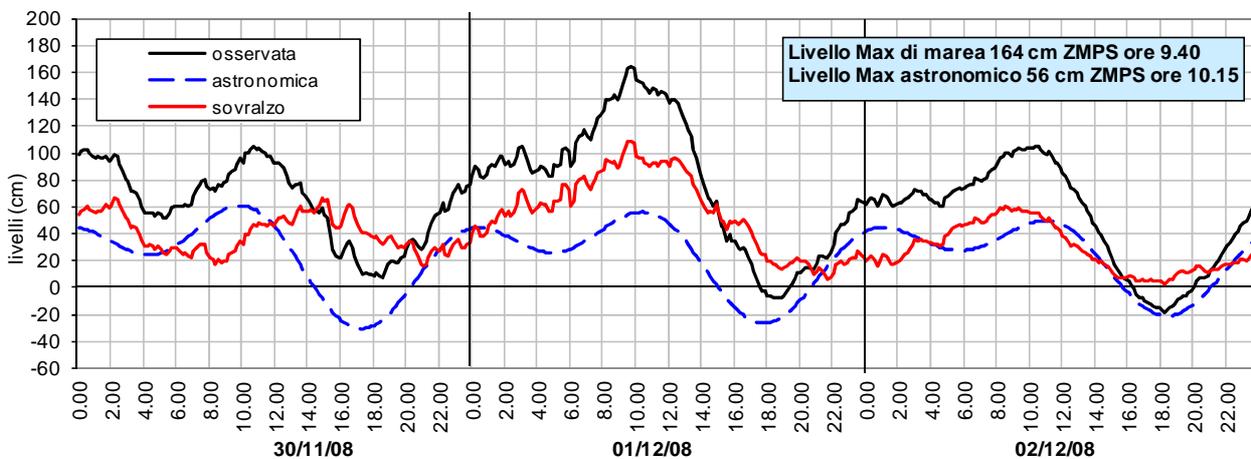
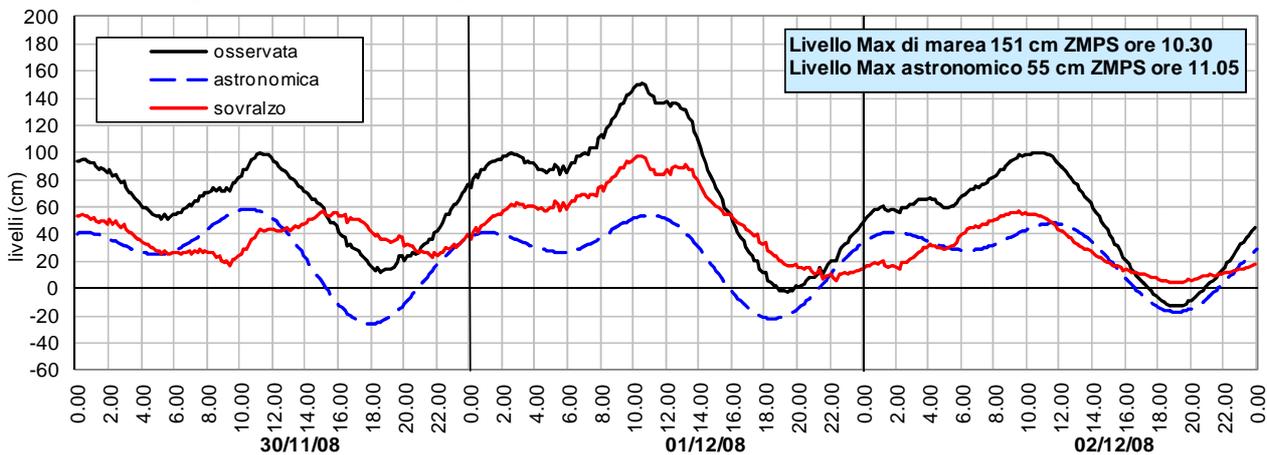


Figura 5/c - Stazione mareografica di Porto Caleri - Marea eccezionale del 1° dicembre 2008

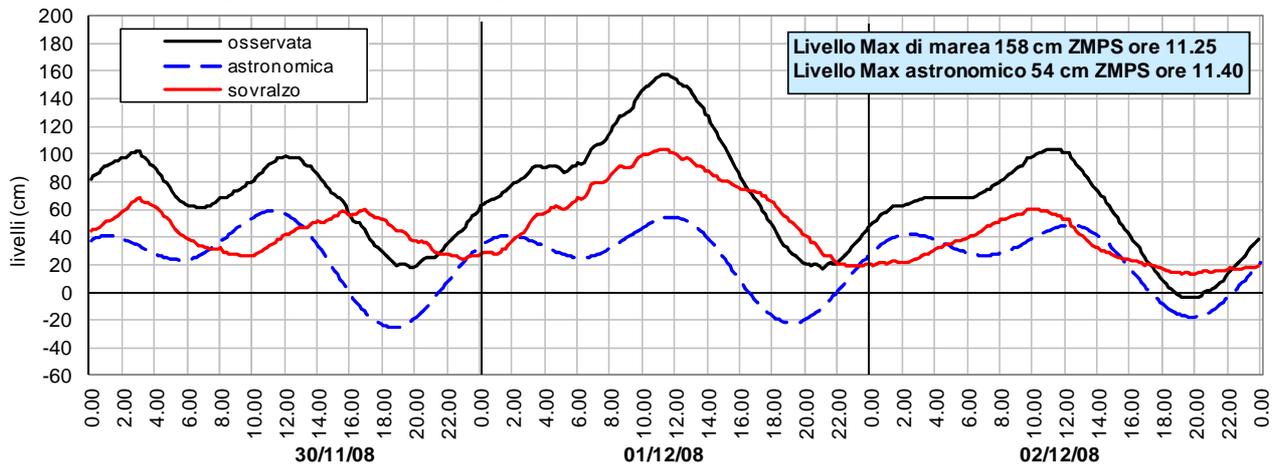


L'analisi del sovranzo mostra invece una certa differenza tra la stazione di Grado e le altre due. Si vede infatti in questo caso che nella giornata del 1° dicembre la fase crescente del sovranzo ha dato luogo a tre distinti picchi: il primo di 69 cm intorno alle 2.50, il secondo di 102 cm intorno alle 8.00 e infine il terzo, il più elevato che ha raggiunto i 113 cm alle 11.30. Ciò potrebbe essere dovuto agli effetti locali del vento che, ruotando dai settori più propriamente meridionali, durante la parte più significativa del fenomeno ha presumibilmente esaltato gli effetti di insaccamento verso il golfo di Trieste.

Si osserva inoltre che, analogamente a quanto già evidenziato per la stazione di Venezia Punta della Salute, il beve ritardo tra la condizione di massimo astronomico rispetto a quella di massimo sovranzo nelle tre stazioni di Grado, Lido Diga Nord e Porto Caleri, ha contribuito a dar luogo a quelle punte massime di marea di cui si è già sottolineato il carattere di eccezionalità.

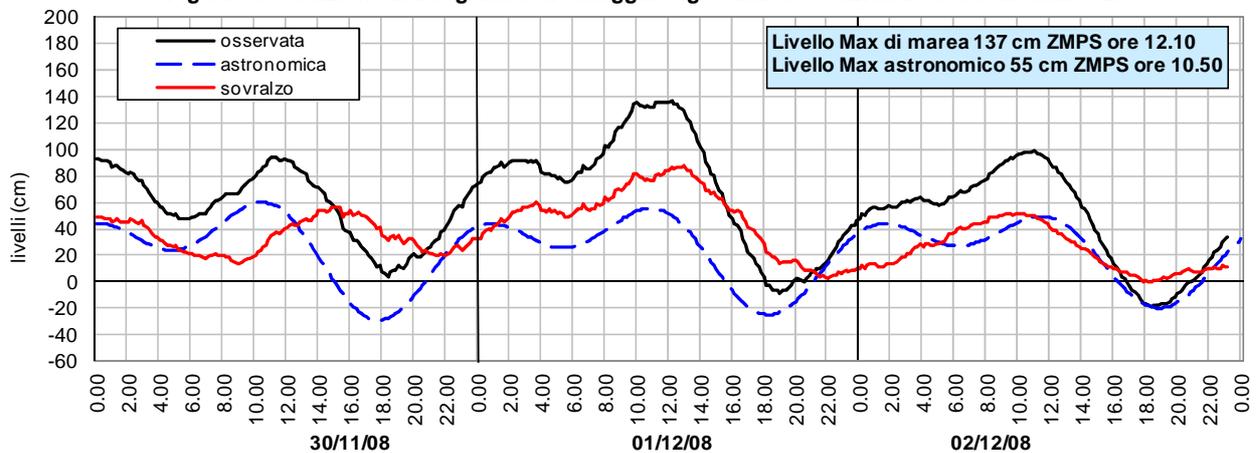
I caratteri straordinari dell'evento del 1° dicembre sono stati altresì confermati all'interno della laguna di Venezia, ed in particolare negli altri centri abitati lagunari e presso le località della parte centro-settentrionale della laguna stessa ove le stazioni mareografiche dell'ISPRA hanno registrato punte massime generalmente superiori a quelle relative alla parte meridionale. A Burano la punta massima è stata di 158 cm ZMPS, superiore di 2 cm rispetto a Punta della Salute e di ben 21 cm rispetto a Chioggia Vigo ove la marea si arrestata a 137 cm ZMPS.

Figura 6/a - Stazione mareografica di Burano - Marea eccezionale del 1° dicembre 2008



Le figure 6-a e 6-b mostrano l'andamento della marea registrata, della marea astronomica e del sovranzo osservato in corrispondenza, delle predette due stazioni distanti circa 35 km l'una dall'altra.

Figura 6/b - Stazione mareografica di Chioggia Vigo - Marea eccezionale del 1° dicembre 2008

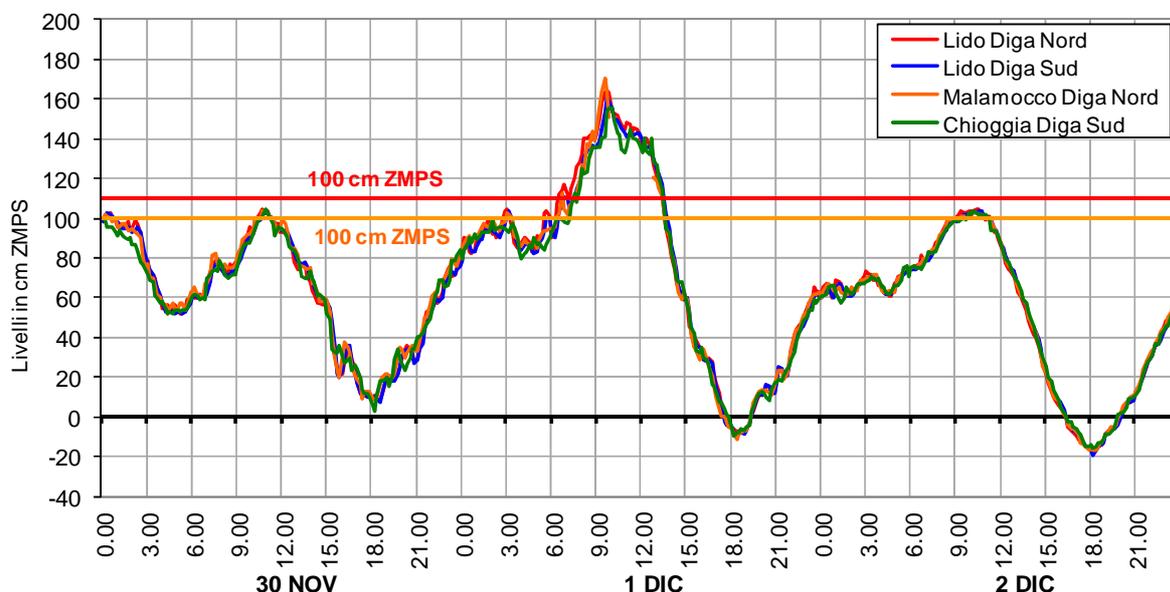


Nel caso di Burano il massimo sovralzò è risultato di 104 cm, superiore di 3 cm rispetto a quello che si è registrato a Venezia Punta Salute (101 cm). La condizione di massimo sovralzò a Burano si è avuta alle ore 11.30 del 1° dicembre, praticamente concomitante con la condizione di massimo astronomico calcolata per le ore 12.00 con 54 cm. Nel caso di Chioggia Vigo invece il massimo sovralzò è risultato di 88 cm, più basso quindi di 13 cm rispetto a Venezia Punta della Salute. Tale condizione a Chioggia si è registrata alle ore 13.00 con un ritardo di quasi 2 ore rispetto al massimo astronomico calcolato per le ore 11.10 con 55 cm.

E' più che acclarato che differenze così marcate nei caratteri della marea osservata alle due estremità della laguna sono da porre in relazione ai ben noti fenomeni di insaccamento dovuti al vento che soffia sulla superficie del bacino lagunare. In questa occasione il vento locale, provenendo dai quadranti meridionali (scirocco), ha favorito effetti di accumulo nella parte settentrionale della laguna dando luogo a punte massime significative come quelle registrate alle stazioni di Grassabò (162 cm ZMPS), di Torcello (159 cm ZMPS) e di Cavallino Centro (159 cm ZMPS) localizzate a nord della bocca di Lido, e alle stazioni di Campalto (161 cm ZMPS) e di Pagliaga (166 cm ZMPS) più prossime al contermine lagunare. Più basse, ma comunque significative, sono risultate le punte massime nella parte meridionale in località come ad esempio Valle Morosina (144 cm ZMPS) e Valle Fogolana (145 cm ZMPS) prossime al contermine lagunare, e Settemorti (141 cm ZMPS) poco più all'interno della bocca di Chioggia.

Si riportano infine alcune considerazioni sulle durate di permanenza della marea al di sopra delle soglie dei 100 e dei 110 cm ZMPS registrate nel corso dell'evento del 1° dicembre 2008. E' il caso di ricordare che la soglia dei 110 cm ZMPS è, al momento, quella alla quale è prevista l'entrata in azione delle opere mobili, oggi in costruzione alle bocche di porto, progettate per limitare il rischio di inondazione della città di Venezia e di altri centri abitati lagunari. Per la città di Chioggia, la quota di salvaguardia è, al momento, ancora fissata in 120 cm ZMPS.

Fig. 8 - Bocche di porto Laguna di Venezia - Evento del 1° dicembre 2008



In figura 8 è rappresentato l'andamento della marea registrato presso le 4 stazioni ISPRA posizionate in testa ai moli guardiani delle tre bocche di porto lagunari. Al di là delle inevitabili differenze nelle punte massime, come peraltro evidenziate in tabella I, si osserva che il raggiungimento della soglia dei 110 cm ZMPS è avvenuto alle ore 6.25 a Lido Diga Nord, alle 6.45 a Lido Diga Sud, alle 6.35 a Malamocco Diga Nord e alle 7.25 a Chioggia Diga Sud. Il dato più

significativo è il ritardo, di poco meno di un ora, tra la stazione di Chioggia Diga Sud e le altre 3 stazioni, che invece hanno avuto un reciproco ritardo valutabile tra i 10 e i 20 minuti.

E' quindi evidente che la scelta del momento della chiusura delle bocche, se le opere di regolazione fossero state già in esercizio alla data del 1° dicembre scorso, si sarebbe dovuta calibrare sulla base dei livelli osservati alle bocche di Lido e di Malamocco piuttosto che a quelli della bocca di Chioggia. Pertanto, tenuto anche conto che tempi tecnici stabiliti dai protocolli messi a punto per sollevare dal fondo le previste paratoie a spinta di galleggiamento sono stati valutati in circa 30 minuti, il via alla manovra si sarebbe dovuto dare intorno alle ore 5.55. Il momento della totale interclusione della laguna sarebbe avvenuto intorno alle ore 6.25 e la durata della chiusura si sarebbe protratta per circa 7 ore fino a quando cioè si sarebbero via via raggiunte le condizioni di equilivello laguna-mare alle tre bocche nella fase calante della marea.

In realtà, per tenere conto di tutti gli altri aspetti che comunque potrebbero favorire la permanenza di un certo rischio di allagamento per la città di Venezia anche a bocche chiuse (l'incertezza della previsione dell'acqua alta, gli apporti di acqua attraverso la bocche durante il transitorio di chiusura, il flusso dei cosiddetti traferri², i deflussi dei fiumi del bacino scolante, le precipitazioni dirette in laguna) i progettisti delle opere di regolazione hanno studiato vari scenari che evidentemente consigliano di adottare soglie più cautelative, anticipando quindi il momento della chiusura.

Con riferimento, ad esempio, ad una soglia di 100 cm ZMPS, la figura 8 mostra che, nel caso del 1° dicembre, tale livello è stato raggiunto alla stazione di Lido Diga Nord alle ore 5.25, alla stazione di Lido Diga Sud alle ore 5.40, alla stazione di Malamocco Diga Nord alle ore 6.15 e alla stazione di Chioggia Diga Sud alle ore 6.20. A differenza del caso precedente (soglia di 110 cm ZMPS), le due stazioni di Malamocco e Chioggia, praticamente in fase tra loro, sono risultate in ritardo di circa 45 minuti rispetto alle stazioni posizionate in testa alla bocca di Lido. In questo caso il via alla manovra di sollevamento delle paratoie si sarebbe ragionevolmente dovuto dare poco prima delle 5.00, calibrandolo ancora una volta sulla base dei livelli osservati alla bocca di Lido e quindi ipotizzando una durata di chiusura della laguna di 8-9 ore.

E' altresì opportuno ricordare che, per le esigenze della portualità veneziana, le manovre di chiusura delle bocche di porto in caso di acqua alta dovranno essere stabilite con un congruo anticipo (4 ore) rispetto al previsto momento di avvio dell'operazione di sollevamento delle paratoie. In questi casi infatti occorrerà interrompere l'eventuale transito del naviglio di grande stazza dalla bocca di Lido e riorganizzare il traffico attraverso la conca di navigazione alla bocca di Malamocco anch'essa oggi in costruzione in parallelo alle altre opere.

In tabella III sono infine raccolti gli orari di superamento delle soglie di 100 e 110 cm ZMPS, insieme alle rispettivamente permanenze, registrati alle stazioni ISPRA di Lido Diga Nord, Punta Salute, Burano e Chioggia Vigo. Dai dati riportati in questa tabella si rileva che a Venezia l'acqua è rimasta sopra i 110 cm ZMPS per oltre 6 ore e mezza, a Burano per quasi 7 ore, mentre a Chioggia per poco più di 5 ore. L'acqua invece è rimasta sopra i 100 cm ZMPS per quasi 8 ore a Venezia per poco più di 8 ore e mezza a Burano e per poco più di 8 ore a Chioggia.

² Il progetto MOSE prevede che l'interclusione della laguna venga realizzata tramite 4 schiere di paratoie da posizionare alle 3 bocche di porto. Ogni schiera di paratoie è composta da un certo numero di cassoni metallici incernierati al fondo lungo un bordo. Quando i cassoni vengono sollevati dal fondo per effetto del galleggiamento indotto dall'introduzione forzata di aria al loro interno, essi oscilleranno indipendentemente l'uno dall'altro attorno al bordo incernierato secondo una posizione di equilibrio che è definita dall'angolo di inclinazione del cassone stesso rispetto al fondo. Lo spazio libero di qualche decina di centimetri che intercorre tra un elemento e quello accostato di fianco si chiama traferro. Questo spazio è ovviamente sede di flusso d'acqua dal mare verso la laguna. La quantità d'acqua che nel corso di un evento può passare verso la laguna attraverso i traferri dipende da vari fattori quali il dislivello laguna-mare, la durata dell'evento, l'ampiezza di oscillazione dei vari elementi che, a sua volta, dipende dalla forza del moto ondoso che si instaura all'interno di ciascuna bocca.

Alta marea eccezionale del 1° dicembre 2008								
	Lido Diga Nord		Punta Salute		Burano		Chioggia Vigo	
	ORA	DURATA	OR A	DURATA	ORA	DURATA	ORA	DURATA
> 100 cm ZMPS	5.25	8 h – 35'	6.4	7 h – 55'	6.40	8 h – 35'	7.55	8 h – 10'
> 110 cm ZMPS	6.25	7 h – 00'	7.3	6 h – 40'	7.35	6 h – 50'	8.35	5 h – 10'

Tabella III - Orario di superamento e permanenza della marea sopra i 100 e 110 cm ZMPS.

CONCLUSIONI

Gli eventi di alta marea eccezionale registrati a dicembre nella laguna di Venezia e lungo il litorale nord Adriatico hanno assunto caratteri di rilevanza storica. La prevedibilità di tali fenomeni assume un significato di assoluto rilievo sia per gli aspetti legati alla gestione del rischio costiero sia, per le specifiche problematiche legate alla difesa dalla acque alte della città di Venezia attraverso le opere di regolazione delle maree, attualmente in costruzione alle bocche di porto.

La previsione dei fenomeni di *storm surge* è un compito proprio dei moderni servizi oceanografici come ad esempio il Proudman Oceanographic Laboratory di Liverpool che attraverso il National Tidal and Sea Level Facility (NTSLF) elabora e divulga ogni 6 ore le previsioni di *storm surges* in 36 località distribuite lungo la costa del Regno Unito. Tra gli altri esempi vale la pena ricordare quello statunitense del Center for Operational Oceanographic Products & Services (CO-OPS) che opera, in seno al National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), con oltre 100 stazioni distribuite tra le coste dell'Atlantico del Pacifico.

In Italia i compiti del servizio oceanografico vengono svolti, a livello nazionale, dall'Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA) attraverso il Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine. Per quanto riguarda il litorale nord Adriatico, ove i fenomeni di storm surges hanno l'impatto più significativo rispetto alle altre zone costiere della Penisola italiana, l'attività previsionale viene condotta dall'ISPRA attraverso il Servizio Laguna di Venezia. Le previsioni vengono effettuate attraverso codici di calcolo che fanno ricorso a metodologie di tipo statistico e di tipo deterministico. Il compito di questi modelli è quello di mettere matematicamente in relazione il sovrizzo della marea con i fattori predittivi quali i valori di pressione atmosferica osservati e o previsti in alcune località dell'area Mediterranea centro-settentrionale, i campi di vento previsti nell'area adriatica/mediterranea e i valori del medesimo sovrizzo osservato fino all'ora della previsione presso le principali stazioni di interesse (Grado, Venezia Lido Diga Sud, Venezia Punta Salute, Burano, Chioggia e Porto Caleri). L'indice di accuratezza medio stimato per tali modelli varia da ± 4 cm per previsioni con anticipo di 1 ora, a ± 20 cm per previsioni con anticipo di 48 ore. Tuttavia bisogna tenere a mente che si tratta di valori medi nel senso che lo scostamento tra lo *storm surge* previsto con i modelli e quello effettivamente osservato può raggiungere valori più alti (o più bassi), anche dell'ordine dei 40/50 cm su un orizzonte di previsione variabile tra 48 ore e 3, 4, 5 giorni.

Per quanto riguarda la valutazione dei fattori predittivi, il trattamento dei dati relativi alla pressione atmosferica, misurata e prevista, non presenta grandi incertezze. Si tratta infatti di un parametro che varia molto gradualmente sia nel tempo che nello spazio e i modelli globali di circolazione atmosferica, come quello utilizzato presso il Centro Europeo di previsione meteorologica di

Reading (UK), offrono informazioni sufficientemente affidabili ai fini della previsione dello *storm surges* nell'alto Adriatico.

Ben diverse sono le considerazioni sul vento che, al contrario, è assai mutevole in direzione e in intensità sia nel tempo che nello spazio. Nel caso del Nord-Adriatico, sono proprio gli effetti del vento a determinare gli scostamenti più inaspettati tra lo *storm surge* previsto e quello realmente osservato. L'influenza del vento nei meccanismi di generazione di tali fenomeni non può quindi essere affatto trascurata. Il monitoraggio in tempo reale della durata, dell'intensità e della direzione del vento *in tutto l'Adriatico* è quindi un elemento su cui sono oggi orientati alcuni filoni di ricerca per migliorare l'affidabilità delle previsioni dello *storm surge* e quindi dell'acqua alta nella laguna di Venezia e lungo il litorale Nord-Adriatico.

L'impiego delle 4 boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON), che l'ISPRA ha in corso di installazione al largo delle coste dell'Adriatico (Venezia, Ancona, Ortona e Monopoli), potranno essere utilizzate anche per integrare il monitoraggio del vento effettuato lungo la costa adriatica attraverso stazioni fisse, distanziate dai 20 ai 200 km l'una dall'altra. Queste ultime fanno capo alla Rete Mareografica della Laguna di Venezia e dell'alto Adriatico (Grado, Lido Diga Sud, Lido S. Nicolò, Malamocco Diga Nord, Chioggia Diga Sud, Foce Po) e alla Rete Mareografica Nazionale (Trieste, Venezia, Ravenna, Ancona, Bari e Otranto) entrambe gestite da ISPRA. I dati di queste stazioni vengono ricevuti in tempo reale presso le sedi di Venezia (Servizio Laguna di Venezia) e di Roma (Servizio Mareografico) del Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine e vengono divulgati attraverso il sito web dell'ISPRA. Ulteriori informazioni sul vento potranno ottenersi integrando nel sistema ISPRA le stazioni meteo in tempo reale esistenti presso le piattaforme AGIP in centro Adriatico, le stazioni meteo-mareografiche costiere dell'Idrografico di Spalato (Croazia), le stazione meteo-mareografica di Valona (Albania), peraltro già collegata con la Rete Mareografica Nazionale.

La RON, gestita dall'ISPRA attraverso il Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine, Servizio Mareografico, è stata invece progettata per misurare e trasmettere in tempo reale i dati relativi al moto ondoso al largo delle coste italiane. Tali dati assumono particolare rilevanza in occasione delle mareggiate che si abbattano sui litorali dell'area nord adriatica ove la concomitanza dei fenomeni di *storm surges* esaspera la forza erosiva del mare. La RON è costituita da n°15 boe ormeggiate a circa 4 miglia al largo dei principali porti italiani di cui, come già accennato, 4 saranno ormeggiate in Adriatico. I parametri di interesse rilevati e trasmessi ogni 30 minuti riguardano l'altezza e la direzione delle onde (altezza significativa, periodo di picco, periodo medio delle onde, direzione media di propagazione del moto ondoso) nonché la temperatura superficiale dell'acqua. Per ciascuna boa è previsto un sistema di localizzazione satellitare per facilitare le operazioni di recupero in caso di disormeggio. I dati di moto ondoso raccolti in quasi 20 anni di attività della RON, vengono tuttora utilizzati per varie finalità (progettazione opere portuali, protezione civile, taratura modelli, studio del clima ondoso, ecc.) e sono disponibili attraverso il sito web dell'ISPRA. Da ricordare che, a seguito del recente affidamento del nuovo contratto appalto per il servizio di ammodernamento e manutenzione la RON verrà potenziata con aggiornamenti per quanto riguarda l'efficienza delle boe che adesso potranno essere dotate anche di sensori meteorologici.